

Activité physique et processus cognitifs : aspects cérébraux et comportementaux

Cédric T. Albinet

CeRCA (UMR-CNRS 7295), Université de Poitiers
cedric.albinet@univ-poitiers.fr

Depuis le début des années 2000, un nombre croissant d'études se sont intéressées aux effets prophylactiques de l'activité physique chronique ou du niveau de condition physique sur le vieillissement des fonctions cognitives. Cette présentation fera le point sur les derniers résultats de la recherche dans ce domaine en mettant l'accent sur les principaux mécanismes neurophysiologiques actuellement proposés pour expliquer ces bénéfices.

Dans un premier temps, les études se sont centrées sur la recherche et la caractérisation des processus cognitifs les plus favorables aux effets de l'activité physique chez les seniors à un niveau comportemental. Certaines fonctions cognitives, très sensibles aux effets du vieillissement normal, comme la vitesse de traitement de l'information, la mémoire épisodique ou les fonctions exécutives, semblent ainsi fonctionner de manière plus efficiente sous l'effet de programmes d'activité physique ou en fonction du niveau de condition physique cardiorespiratoire (VO_2max). Nous montrerons que la compréhension de ce phénomène nécessite toutefois une analyse fine des processus cognitifs impliqués car toutes ces fonctions cognitives ou les tâches qui sont développées pour les évaluer ne semblent pas affectées dans les mêmes proportions. L'amélioration de la fonction d'inhibition par exemple, processus exécutif central, semble être particulièrement associée à l'entraînement physique ou au niveau de condition physique aérobie, bien que toutes les tâches utilisées dans les études pour l'évaluer ne montrent pas la même sensibilité (Abou-Dest et al., 2012 ; Boucard et al., 2012). Il se pourrait que l'inhibition, par sa nature centrale au sein des fonctions exécutives et dans le vieillissement cognitif, soit particulièrement sensible aux effets de l'exercice physique. Il est également possible, comme nous allons le développer, que les réseaux neuronaux et les structures cérébrales sous-tendant cette fonction cognitive soient préférentiellement renforcés par les effets cardiovasculaires de l'activité physique.

Dans un second temps, les études ont cherché à comprendre et caractériser les mécanismes neurophysiologiques potentiellement responsables de la relation positive entre activité physique et performances cognitives chez les seniors. Depuis les premiers travaux utilisant de l'imagerie cérébrale fonctionnelle, publiés par Colcombe et collaborateurs en 2004 (Colcombe et al., 2004), de nombreuses études ont investigué les substrats cérébraux impliqués lors de la réalisation de tâches cognitives en fonction du niveau d'activité physique ou de condition physique. Colcombe et al. ont ainsi été les premiers à montrer que des personnes âgées à haut niveau de VO_2max ou ayant suivi un entraînement physique aérobie montraient une plus grande activité métabolique corticale dans les régions frontales et pariétales spécifiquement impliquées dans la sélection spatiale et le fonctionnement inhibiteur, que leurs homologues inactifs ou ayant suivi un entraînement de type stretching, expliquant leurs meilleures performances d'inhibition. Utilisant une technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) structurale, Erickson et al. (2011) ont montré qu'un programme d'activité physique aérobie (marche) de un an entraînait une augmentation du volume de l'hippocampe antérieur de 2 %, associée à une amélioration des performances de la mémoire spatiale. Plus récemment, Albinet et al. (2014) ont utilisé une technique d'imagerie cérébrale optique (fNIRS, functional Near InfraRed Spectroscopy) pour examiner les variations de concentration en hémoglobine oxygénée et en hémoglobine désoxygénée dans le cortex préfrontal dorsolatéral chez des femmes âgées de 60 ans et plus, à haut et faible niveau de VO_2max , lors de la réalisation d'une tâche cognitive impliquant de l'inhibition. Les résultats de cette étude ont montré

qu'un plus haut niveau de condition physique aérobie est bien relié à un plus fort apport d'oxygénation cérébrale dans le cortex préfrontal droit, soutenant de meilleures performances d'inhibition. Dans l'ensemble, les résultats des études ces 10 dernières années semblent aller dans le même sens que les études sur l'animal démontrant les bénéfices de l'activité physique sur la plasticité cérébrale, notamment par la libération de facteurs neurotrophiques (le facteur neurotrophique dérivé du cerveau (BDNF), le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF), le facteur de croissance 1 de l'insuline (IGF-1)).

Conclusion

Le vieillissement entraîne des modifications structurales et fonctionnelles du système nerveux central, associées à une diminution des performances cognitives. Toutefois, ces déclin semblent pouvoir être en partie réduits ou contrés par la pratique régulière d'activité physique et le maintien d'une bonne condition physique cardiorespiratoire. De nombreuses études récentes, comportementales et en neuro-imagerie, viennent en apporter un support empirique pertinent. La recherche des mécanismes neurobiologiques responsables de ces bénéfices doit maintenant permettre de mieux comprendre l'origine de l'impact à long terme de l'activité physique sur la santé cérébrale et la vitalité cognitive des seniors.

Références

- Abou-Dest, A., Albinet, C. T., Boucard, G., & Audiffren, M. (2012). Swimming as a positive moderator of cognitive aging: a cross-sectional study with a multitask approach. *Journal of Aging Research*, 2012: 273185.
- Albinet, C. T., Mandrick, K., Bernard, P. L., Perrey, S., & Blain, H. (2014). Improved cerebral oxygenation response and executive performance as a function of cardiorespiratory fitness in older women: a fNIRS study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6: 272.
- Boucard, G. K., Albinet, C. T., Bugajska, A., Bouquet, C. A., Clarys, D., & Audiffren, M. (2012). Impact of physical activity on executive functions in aging: a selective effect on inhibition among old adults. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 34(6), 808-827.
- Colcombe, S.J., Kramer, A.F., Erickson, K.I., Scalf, P., McAuley, E., & Cohen, N.J. ... Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 101, 3316-3321.
- Erickson, K.I., Voss, M.W., Prakash, R.S., Basak, C., Szabo, A., & Chaddock, L. ... Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108(7), 3017-3022.

La dédifférentiation des processus cognitifs et moteurs au cours du vieillissement : illustration à travers les effets de l'entraînement

Leslie M. Decker¹, Jan Bulla², Ingo Bulla³, Frédérique Retornaz⁴ & Jean-Jacques Temprado⁵

¹ UMR-S 1075 INSERM/Université de Caen Basse-Normandie
leslie.decker@unicaen.fr

Introduction

Au cours des dix dernières années, un nombre croissant de travaux sur le vieillissement se sont intéressés à l'évolution des relations entre les performances cognitives et les performances motrices. L'hypothèse sous-jacente à ces études est celle de la « dé-différentiation » qui prévoit que l'interaction entre les processus cognitifs et moteurs augmente au cours de l'âge en raison de l'existence de causes communes, structurales (*e.g.*, atrophie de la matière grise, modifications de la connectivité cérébrale) et fonctionnelles (*e.g.*, diminution de la vitesse de traitement de l'information) dans le système nerveux central (SNC). Le ralentissement comportemental, qui est observé à la fois dans les tâches cognitives et motrices, est un bon point d'entrée pour étudier la dé-différentiation cognitivo-motrice. En effet, il constitue un indicateur indirect de la vitesse de traitement de l'information dans le SNC (Eckert, 2011). Au cours d'une étude précédente, Sleimen-Malkoun et al. (2013) ont testé l'hypothèse de dé-différentiation en comparant l'évolution de la vitesse de traitement de l'information dans deux tâches : une tâche cognitive de temps de réaction (*i.e.*, tâche de Hick-Hyman ; Hick, 1952 ; Hyman, 1953) et une tâche motrice de pointage unimanuel (*i.e.*, tâche de Fitts ; Fitts, 1954). En comparant les pentes des fonctions d'efficacité de chaque tâche, les auteurs ont pu montrer que la diminution de l'efficacité du traitement de l'information dans le SNC pourrait expliquer le taux de ralentissement commun des réponses comportementales dans les deux tâches.

L'étude présentée au cours de ce symposium s'appuie sur ces résultats et sur la dé-différentiation cognitivo-motrice pour étudier le transfert d'entraînement effectué dans une tâche motrice (tâche de Fitts) vers une tâche cognitive (tâche de Hick-Hyman). L'hypothèse testée était que si la vitesse de traitement de l'information est la cause commune qui explique le ralentissement dans le domaine cognitif et le domaine moteur, alors en améliorant la vitesse de traitement grâce à un entraînement dans la tâche de Fitts, on devrait observer une amélioration de la vitesse de traitement dans la tâche de Hick-Hyman, en particulier chez les personnes âgées ayant des troubles cognitifs, et donc présentant un plus fort degré de dé-différentiation cognitivo-motrice.

Méthode

11 personnes âgées vivant à domicile (1 homme et 10 femmes, 73.6 ± 6.4 ans, groupe « témoins ») et 11 résidents de l'EHPAD du Centre Gérontologique Départemental (CGD) de Marseille (3 hommes and 8 femmes, 80.7 ± 9.2 ans, groupe « patients »), ne présentant pas d'antécédents de troubles neurologiques ou psychiatriques, ont participé à l'étude. Les participants ont été soumis à une batterie de questionnaires (*i.e.*, caractéristiques sociodémographiques, antécédents médicaux, dépendance, espace de vie, nombre de chutes dans les 12 derniers mois, peur de chuter, dépression) et de tests neuropsychologiques (évaluation cognitive globale, fonctions exécutives, mémoires, vitesse de traitement de l'information). Les deux groupes ont réalisé : 1) une tâche de pointage unimanuel discret (type Fitts) comportant 4 niveaux de difficulté (3, 3.9, 4.7 et 5.6 bits), et 2) une tâche de temps de réaction simple et de choix (type Hick-Hyman) comportant 4 niveaux de difficulté (0, 1, 2 et 3 bits). Pour la tâche de Hick-Hyman, les associations stimulus-réponse (S-R) étaient présentées de manière compatible ou incompatible. Seuls les patients ont été entraînés dans la tâche Fitts (pointage unimanuel discret) pendant quatre semaines, à raison de trois sessions de 30 minutes par semaine. A la suite de la période d'entraînement, ils ont réalisé les mêmes tâches (*i.e.*,

Fitts et Hick-Hyman) que celles effectuées avant l'entraînement. Nous avons analysé : 1) les pentes des fonctions d'efficacité dans les deux tâches, Fitts (*i.e.*, temps de mouvement [TM], temps d'accélération [TA] et temps de décélération [TD]) et Hick-Hyman (*i.e.*, temps de réaction [TR]), et 2) les corrélations entre les pentes des fonctions d'efficacité et les scores aux questionnaires et aux tests neuropsychologiques.

Résultats

Pour l'essentiel, les résultats ont montré que les patients avant entraînement obtenaient des scores aux questionnaires et aux tests neuropsychologiques bien inférieurs aux témoins. De plus, les pentes des fonctions d'efficacité étaient plus élevées pour les patients que pour les témoins dans les deux tâches, Fitts (TM : $+33.4 \pm 4.9$ ms.bit⁻¹, TA : $+13.7 \pm 1.8$ ms.bit⁻¹, TD : $+19.2 \pm 3.7$ ms.bit⁻¹) et Hick-Hyman (TR : $+31.7 \pm 8.5$ ms.bit⁻¹). Après entraînement des patients, nous avons observé une nette diminution des pentes des fonctions d'efficacité dans la tâche de Fitts (TM : -36.5%, TA : 41.5%, TD : 32.5%), si bien que les pentes entre les deux groupes n'étaient plus significativement différentes. Également, nous avons observé une diminution des pentes des fonctions d'efficacité dans la tâche de Hick-Hyman, dans les conditions S-R compatible (TR : -20.8%) et incompatible (TR : -8.4%). Par ailleurs, chez les patients avant entraînement, les pentes des fonctions d'efficacité dans la tâche de Fitts étaient corrélées à la flexibilité mentale (*i.e.*, Trail Making Test, TMT-B minus A), au degré de dépendance (*i.e.*, activités basiques et instrumentales de la vie quotidienne), à l'espace de vie (*i.e.*, version canadienne-française du « UAB Life-Space Assessment ») et à la peur de chuter (*i.e.*, version française du « Falls Efficacy Scale-International »). Après entraînement, les pentes étaient corrélées non seulement à la flexibilité mentale et aux activités instrumentales de la vie quotidienne, mais aussi à l'efficacité cognitive globale (*i.e.*, Montreal Cognitive Assessment) et aux capacités d'inhibition (*i.e.*, Test du Stroop Victoria, adaptation francophone) et de vitesse de traitement de l'information (*i.e.*, subtests Codes et Symboles de la WAIS-III).

Discussion

Les résultats de la présente étude montrent clairement un transfert des effets de l'entraînement dans la tâche de Fitts vers les tâches de Hick-Hyman (associations S-R compatibles ou incompatibles), à travers une modification de l'efficacité du traitement de l'information. Ils permettent également d'identifier la nature des mécanismes qui ont été optimisés. Plus généralement, ils renforcent l'hypothèse de l'existence d'une cause commune au ralentissement cognitif et moteur, suggérée lors de travaux précédents. Ces résultats peuvent avoir des prolongements dans le domaine clinique pour l'évaluation et l'entraînement des personnes âgées, fragiles et/ou atteintes de troubles cognitifs.

Références

- Eckert, M.A. (2011). Slowing down: age-related neurobiological predictors of processing speed. *Frontiers in Neuroscience*, 5, 25.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Hick, W.E. (1952). On the rate of gain of information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 11-26.
- Hyman, R. (1953) Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 45(3), 188-196.
- Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J.J., & Berton, E. (2013). Age-related dedifferentiation of cognitive and motor slowing: insight from the comparison of Hick-Hyman and Fitts' laws. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 62.

The interplay between cognitive and sensorimotor systems during isometric force control: insights from dual-task

Solveig Vieluf¹, Jean-Jacques Temprado¹, Nicolas Bricot¹, Eric Berton¹ et Rita Sleimen-Malkoun^{1,2}

¹Aix-Marseille Université, CNRS, Institut des Sciences du Mouvement UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France

²Aix-Marseille Université, Inserm, Institut de Neurosciences des Systèmes UMR_S 1106, 13385, Marseille, France
solveig.vieluf@univ-amu.fr

Introduction

The control of isometric forces results from the interaction of multiple subsystems that assemble to form functional synergies (Clark & Manini, 2008; Vaillancourt and Newell, 2002). However, how force level affects these synergies and, in particular, the interplay between central demand, sensorimotor processing, and muscular mechanisms has been scarcely investigated. The present study addresses this issue by using a dual-task paradigm. To achieve this objective, we investigated the *principled co-variations* of specific variables related to the different sub-systems that is: i) efficiency of information processing through the measure of signal-to-noise ratio, ii) complexity of force output through the use of multiscale entropy (MSE), iii) attentional effort incurred by force control through the measure of reaction time and iv) adaptability of the force control system through the analysis of perturbations resulting from foot response in the dual-task situation. Our general hypotheses was that: i) nonlinear dynamics (i.e., U- and inverted U-shapes) should be observed for these different variables over a range of force levels and ii) these dynamics should be correlated, in particular the optima of the different curves should correspond.

Methods

25 healthy participants (23.44±1.55 years; 12 women) took part voluntarily in the study. All were healthy, right handed, and had normal, or corrected to normal, vision. Under dual task conditions they performed simultaneously a reaction time task and an isometric force maintenance task. At each force level (10, 20, 30, 40, 50, 60% of the individual's MVC), 6 trials of 15 seconds including 3 reactions each (inter-stimulus interval were randomly either 3 or 6 s) were performed. To analyze a stable period of force maintenance the last three seconds of the 6-second intervals were taken into account. The signal-to-noise ratio as a measure of efficiency, and the area underneath multiscale entropy curves as a measure of system's complexity were analyzed. On the basis of all 18 reactions per force level the reaction times were trimmed, i.e. 20% fastest and slowest reactions were excluded from further analysis, and averaged. Around the period of the reaction, the perturbation of the continuous force production was characterized by two independent types of perturbation, a first one for which the force increases (perturbation up) and a second one for which the force decreases (perturbation down). We analyzed the amplitude of both perturbations relative to the force level. Repeated measure ANOVAS were performed to test for statistical significance.

Results

Efficiency, $F(5,24) = 10.76$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .309$, complexity, $F(5,24) = 2.65$, $p = .04$, $\eta_p^2 = .100$, reaction time, $F(5,24) = 4.05$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .144$, as well as the relative amplitude of perturbations down, $F(5,24) = 15.27$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .389$, changed over force levels. Only the relative amplitude of the perturbation up did not differ between force levels. Following up ANOVA results, second order polynomial fitting of the evolution of the different variables over the range of force levels showed an inverted-U shape pattern for the signal-to noise ratio and the reaction times, whereas the perturbation down and the complexity followed a U pattern. All peaks were aligned around 40 % of the MVC (see Figure 1).

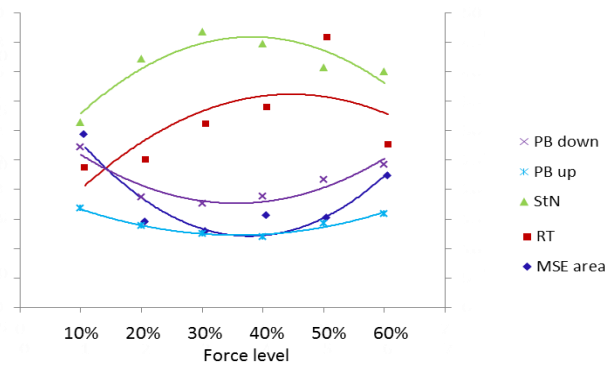


Figure 1. Co-variation of efficiency (StN), complexity (MSE area), reaction times (RT), and relative amplitudes of the perturbations up (PB up) and down (PB down) over the range of force levels.

Discussion

For all variables, except for the relative amplitude of perturbation up, we confirmed the hypothesis of nonlinear evolution over the range of force levels. The correspondence of the optima confirmed the co-variation of the variables. Consequently, highest attentional effort was related to highest efficiency and lowest complexity. In line with findings in our previous paper (Vieluf et al., 2015) for lower scales, efficiency and complexity showed opposing developments. Slifkin and Newell (1999) suggested that optimal information processing interrelates with specific changes in motor-unit recruitment, i.e., increase in force level up to 30-40% are realized by adding motor units and beyond this level the discharge rate of the motor units is increased. In combination with this we assume an optimal organization of underlying control processes, including cognitive effort targeted to the task as one of them, at this level, that accordingly leads to a nonlinear evolution of variables characterizing behaviour. The idea of two independent perturbations is supported by the different evolutions of amplitude over the range of force levels. The perturbation up had the same amplitude for all levels. We assume that this part reflects the hand-foot coupling during the reaction. The evolution of the relative amplitude of the perturbation down suggests that the highest adaptability, i.e. smallest perturbation amplitude, is related to the optimal state of the sensorimotor system.

Conclusion

In sum our results confirm that the system underlying the force control shows signatures of a nonlinear dynamic system with a range of optimal functioning at intermediate force levels. The findings suggest that sensorimotor, muscular, and the cognitive systems interact during force control in a way that the highest efficiency is related to highest attentional costs. This underlines the strong coalition of cognitive involvement and sensorimotor control processes in functional synergies during force control tasks.

References

- Clark, B. C., & Manini, T. M. (2008). Sarcopenia \neq dynapenia. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 63(8), 829-834.
- Slifkin, A. B., & Newell, K. M. (1999). Noise, information transmission, and force variability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(3), 837-851.
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiology of aging*, 23(1), 1-11.
- Vieluf, S., Temprado, J. J., Berton, E., Jirsa, V. K., & Sleimen-Malkoun, R. (2015). Effects of task and age on the magnitude and structure of force fluctuations: insights into underlying neuro-behavioral processes. *BMC Neuroscience*, 16(1), DOI 10.1186/s12868-015-0153-7.
- Zijdewind, I., van Duinen, H., Zielman, R., & Lorist, M. M. (2006). Interaction between force production and cognitive performance in humans. *Clinical Neurophysiology*, 117(3), 660-67.

Le rôle de l'activité physique dans le déclin cognitif au cours du vieillissement : quels bénéfices ?

Olivier Dupuy¹

¹ Laboratoire MOVE « Mobilité, Vieillissement et Exercice » (EA 6314), UFR STAPS, Université de Poitiers

olivier.dupuy@univ-poitiers.fr

Le processus de vieillissement s'accompagne inévitablement d'un déclin dans de nombreux domaines cognitifs (Drag and Bieliauskas, 2010). Parmi les processus cognitifs, les fonctions exécutives et de contrôle attentionnel sont particulièrement sensibles au vieillissement (McDowd et Shaw, 2000). Les fonctions exécutives sont généralement des fonctions "de niveau supérieur" (planification, inhibition, flexibilité) impliquée dans le contrôle et la régulation des processus cognitifs (Miyake et al. 2000). Plusieurs études en neuro-imagerie ont démontré que les fonctions exécutives telles que l'inhibition et la flexibilité sont sous le contrôle du cortex préfrontal (Fuster, 2000; Turner & Spreng, 2012). La diminution de ces capacités liée à l'âge a souvent été associée à des changements anatomiques et physiologiques importants (Bishop et al., 2010) et en particulier dans les régions frontales du cortex cérébral (Yuki et al. 2012). Néanmoins, il a également été suggéré que l'atrophie de cerveau âgé et les changements neurophysiologiques associés à l'âge peuvent être réduits grâce à une activité physique régulière (Yuki et al. 2012).

Actuellement, il est reconnu que l'activité physique régulière est la meilleure stratégie (DeWeerd, 2011) pour promouvoir la santé générale. Plusieurs études ont mis en évidence une diminution du déclin cognitif chez les personnes physiquement actives (Angevaren et al. 2008). Le maintien d'un niveau élevé de la capacité aérobie permettrait ainsi de protéger le cerveau contre les effets du vieillissement ainsi que les effets cumulatifs de problèmes de santé associés à l'âge (McAuley et al. 2004). Les études d'intervention ont également tendance à soutenir l'idée que l'entraînement aérobie est un moyen efficace pour améliorer la cognition, et plus spécifiquement, les fonctions exécutives, chez les personnes âgées. En effet, les résultats de la méta-analyse de Colcombe et Kramer (2003) montrent qu'après une période d'entraînement de type aérobie, l'amélioration des processus cognitifs est plus grande dans le domaine exécutif. Ces résultats sont, en outre, soutenus par des résultats plus récents (Boucard et al. 2012; Predovan et al. 2012.). Dans leur étude transversale, Boucard et ses collègues (2012) démontrent qu'une meilleure condition physique est associée sélectivement à de meilleures performances d'inhibition. Predovan et al. (2012) observe également que des individus ayant complété trois mois d'entraînement de type aérobie ont des améliorations significatives dans les processus exécutif (évaluation lors de l'exécution d'un test de Stroop). Néanmoins, ces résultats ne sont pas seulement obtenus suite à des entraînements de type aérobie, puisque semblerait-il, l'entraînement en musculation peut avoir le même type d'effet sur la cognition (Berryman et al. 2014).

L'ensemble de ces résultats amène à nous interroger sur les mécanismes neurophysiologiques sous-jacents à l'entraînement physique régulier. Plusieurs études démontrent que l'activité physique régulière induit une plasticité cérébrale, augmentant ainsi le volume de la matière grise (Yuki et al. 2012) et le volume de la substance blanche (Tseng et al. 2013) dans le cerveau, ainsi que l'augmentation du volume de l'hippocampe (Szabo et al. 2011). En ligne avec les études animales sur ce sujet, des facteurs neurotrophiques servent à promouvoir la neurogénèse et la synaptogénèse. (Cotman et al. 2007; Davenport et al. 2012). Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour appuyer cette hypothèse chez l'homme. D'autres mécanismes neurophysiologiques pourraient également expliquer la relation entre la condition physique et la cognition. Le bon fonctionnement des processus cognitifs étant dépendant du débit sanguin et de l'apport en oxygène, l'exercice physique régulier apparaît comme étant un puissant stimulant pour améliorer la santé vasculaire, le débit sanguin cérébral (Ainslie et al, 2008) ainsi que l'oxygénation cérébrale (Dupuy

et al, 2015). En effet, l'entraînement physique régulier induirait une amélioration de la fonction endothéliale cérébrale par une libération de facteurs de croissance vasculaire.

Références

- Angevaren, M., Aufdemkampe, G., Verhaar, H.J.J., Aleman, A., and Vanhees, L. (2008). Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. doi: Cd00538110.1002/14651858.CD005381.pub3.
- Berryman N, Bherer L, Nadeau S, Lauzière S, Lehr L, Bobeuf F, Lussier M, Kergoat MJ, Vu TT, Bosquet L. Multiple roads lead to Rome: combined high-intensity aerobic and strength training vs. gross motor activities leads to equivalent improvement in executive functions in a cohort of healthy older adults. *Age (Dordr)*. 2014;36(5):9710. doi: 10.1007/s11357-014-9710-8. Epub 2014 Sep 7.
- Boucard, G.K., Albinet, C.T., Bugajska, A., Bouquet, C.A., Clarys, D., and Audiffren, M. (2012). Impact of Physical Activity on Executive Functions in Aging: A Selective Effect on Inhibition Among Old Adults. *Journal of Sport & Exercise Psychology* 34, 808-827.
- Colcombe, S., and Kramer, A.F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychological Science* 14, 125-130. doi: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430.
- Deweerd, S. (2011). PREVENTION Activity is the best medicine. *Nature* 475, S16-S17.
- Dupuy O, Gauthier CJ, Fraser SA, Desjardins-Crèpeau L, Desjardins M, Mekary S, Lesage F, Hoge RD, Pouliot P, Bherer L. Higher levels of cardiovascular fitness are associated with better executive function and prefrontal oxygenation in younger and older women. *Front Hum Neurosci*. 2015 Feb 18;9:66. doi: 10.3389/fnhum.2015.00066. eCollection 2015.
- McAuley E, Kramer AF, Colcombe SJ. (2004) Cardiovascular fitness and neurocognitive function in older adults: a brief review. *Brain Behaviour and Immunity*. 18(3):214-20.
- Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cogn Psychol*. 41(1):49-100.
- Predovan, D., Fraser, S.A., Renaud, M., and Bherer, L. (2012). The effect of three months of aerobic training on stroop performance in older adults. *J Aging Res* 2012, 269815. doi: 10.1155/2012/269815.
- Salthouse, T.A. (2010). Selective review of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society* 16, 754-760. doi: 10.1017/s1355617710000706.
- Szabo, A.N., McAuley, E., Erickson, K.I., Voss, M., Prakash, R.S., Mailey, E.L., Wojcicki, T.R., White, S.M., Gothe, N., Olson, E.A., and Kramer, A.F. (2011). Cardiorespiratory Fitness, Hippocampal Volume, and Frequency of Forgetting in Older Adults. *Neuropsychology* 25, 545-553. doi: 10.1037/a0022733.
- Tseng, B.Y., Gundapuneedi, T., Khan, M.A., Diaz-Arrastia, R., Levine, B.D., Lu, H., Huang, H., and Zhang, R. (2013). White matter integrity in physically fit older adults. *Neuroimage* 82, 510-516. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.06.011.
- Yuki, A., Lee, S., Kim, H., Kozakai, R., Ando, F., and Shimokata, H. (2012). Relationship between Physical Activity and Brain Atrophy Progression. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 44, 2362-2368. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182667d1d.