



Relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives dans une  
perspective de vieillissement sain

Par

Jean Nicolas Leduc Berryman

Thèse de doctorat effectuée en cotutelle

Département de kinésiologie

Université de Montréal

Faculté des sciences du sport

Université de Poitiers

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de  
Montréal en vue de l'obtention du grade de *Philosophiæ doctor* (Ph.D.) en Sciences de  
l'Activité Physique et à l'École doctorale BioSanté de l'Université de Poitiers en vue de  
l'obtention du titre de Docteur en Sciences

Décembre, 2013

©J Nicolas L Berryman

## Résumé

**Introduction** – Le vieillissement est associé à une augmentation du coût énergétique de la locomotion (CE) et à une diminution de la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ). De plus, les qualités neuromusculaires semblent aussi compromises chez les aînés. Ces phénomènes contribuent au ralentissement de la vitesse de marche spontanée et peuvent altérer la qualité de vie. En plus de ces qualités physiques, il est reconnu que les fonctions cognitives déterminent la mobilité. En effet, la capacité de combiner une tâche motrice (locomotion) à une tâche cognitive est associée à une réduction du risque de chuter. **Objectif** – L'objectif de cette thèse était de préciser les relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives dans une perspective de vieillissement sain. **Résultats** – Une étude méthodologique a été présentée pour spécifier les modalités d'évaluation du CE. Les résultats ont démontré que le CE est plus élevé lorsque la mesure est effectuée sur tapis roulant en comparaison avec une mesure directement au sol. Il a aussi été suggéré que le niveau d'association entre les deux modalités était insatisfaisant. Ainsi, lorsque la mesure sur tapis roulant est nécessaire, elle doit idéalement être accompagnée d'un test de marche au sol pour améliorer la validité externe. Ensuite, une approche transversale a été utilisée afin de préciser les déterminants de la condition physique associés à une meilleure mobilité et à un profil cognitif favorable. En plus de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , une force élevée caractérisait les individus qui présentaient les meilleures performances dans une tâche de flexibilité cognitive. Il a aussi été démontré que des tests cliniques comme le *Timed up and go* et la vitesse maximale de marche sur 10 mètres pouvaient être utilisés pour discriminer les individus qui présentent les profils physiques et cognitifs les moins favorables. Enfin, une étude d'intervention a été proposée afin de vérifier si un entraînement de l'aptitude aérobie et de la force visant une augmentation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et la réduction du CE allait permettre de meilleures performances cognitives lors d'une double tâche (motrice et cognitive). Les résultats démontrent, malgré que ce type d'intervention semble favoriser de meilleures performances en inhibition, qu'un programme visant le développement des habiletés motrices globales est aussi efficace pour induire des améliorations en inhibition. **Conclusion** – Ces résultats confirment la pertinence de l'évaluation d'un ensemble de déterminants de la condition physique allant de l'aptitude aérobie aux qualités neuromusculaires dans le suivi de la santé physique et cognitive des aînés. Des tests cliniques accessibles sont proposés afin de contribuer à un premier diagnostic physique et cognitif qui saura être confirmé par des mesures plus exhaustives. Par ailleurs, il est aussi suggéré que plusieurs interventions peuvent être proposées pour améliorer les fonctions cognitives. Malgré que l'entraînement de l'aptitude aérobie et des qualités de force soit le seul à induire des améliorations de la condition physique, il n'en demeure pas moins qu'un programme de développement des habiletés motrices puisse représenter une avenue intéressante dans le cas où les individus étaient au préalable très sédentaires.

**Mots clés :** Coût énergétique de la locomotion,  $\dot{V}O_2\text{max}$ , force, marche, fonctions exécutives, entraînement, motricité globale, aînés.

## Abstract

**Introduction** – Aging is characterized by an increase in the energy cost of locomotion (ECL) and a decrease in maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ). It also appears that neuromuscular performances are jeopardized in older adults. Taken together, these phenomena contribute to a slower gait speed, which could reduce quality of life. Moreover, it was shown that cognition was also a key determinant of mobility performances. Indeed, the ability to execute simultaneously two tasks (motor and cognitive) was associated with a lower risk of falling. **Objective** – The objective of this thesis was to specify the relationships between mobility, physical fitness and cognition in a perspective of healthy aging. **Results** – A study was conducted to clarify the ECL testing methods. Results demonstrate a higher ECL when testing occurs on a treadmill in comparison to an overground measure. Moreover, it was shown that the association level was unsatisfying between the two testing modes. It was concluded that, when a treadmill testing is necessary, a complementary functional walking test should be implemented to increase external validity in data interpretation. Afterwards, a cross-sectional analysis was used to determine the physical fitness factors associated with better cognitive and mobility performances. Along with  $\dot{V}O_2\text{max}$ , higher levels of strength were related to the fastest individuals both in mobility and in cognitive flexibility. Also, it was shown that clinical tests like the *Timed up and go* and the maximal walking speed over 10 meters were able to distinguish individuals with poorer physical fitness and cognitive performances. Finally, an intervention study was proposed to verify the effects of a combined aerobic and strength training program on physical fitness and cognition. It was hypothesized that reducing the ECL and increasing  $\dot{V}O_2\text{max}$  would induce better cognitive performances during a dual-task (motor and cognitive). Results showed that this intervention improved inhibition performances. However, data also suggested that a training program aiming for gross motor abilities development was as efficient as the fitness training intervention to improve inhibition. **Conclusion** – Taken together, these results confirm the relevance of a complete physical fitness assessment in an healthy aging perspective including both aerobic and neuromuscular components. Convenient clinical tests are also proposed to establish a first physical and cognitive diagnosis, which will be confirmed by subsequent more exhaustive tests. Moreover, it was suggested that many interventions were leading to better cognitive performances. Along with aerobic and strength training which is a privileged method to improve physical fitness, programs aiming for gross motor abilities development could also be implemented, especially in a context where individuals are particularly sedentary.

**Keywords** : Energy cost of locomotion,  $\dot{V}O_2\text{max}$ , strength, walking, executive functions, training, gross motor development, elderly.

## Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Liste des Figures .....	v
Listes des Tableaux .....	vi
Liste des Abréviations .....	vii
Remerciements.....	viii
1. Cadre Théorique.....	1
1.1. Introduction .....	1
1.2. Condition physique .....	4
1.2.1. Coût énergétique de la locomotion (CE) .....	4
Définition .....	4
Déterminants .....	4
CE et vieillissement .....	6
Modalités d'évaluation .....	8
1.2.2. Consommation maximale d'O <sub>2</sub> .....	19
Définition .....	19
Déterminants.....	19
VO <sub>2</sub> max et vieillissement .....	20
Modalités d'évaluation .....	21
1.2.3. Qualités neuromusculaires.....	24
Définition .....	24
Déterminants.....	25
Qualités neuromusculaires et vieillissement .....	31
Modalités d'évaluation .....	34
1.2.4. Interactions entre VO <sub>2</sub> max, CE, qualités neuromusculaires et mobilité .....	38
Énergie potentielle .....	38
Effets de l'entraînement.....	40

1.3.	Cognition, condition physique et mobilité .....	48
1.3.1.	Interactions entre condition physique et fonctions cognitives .....	49
	Méthodologie de la recherche .....	50
	Effets chroniques : hypothèse cardiovasculaire .....	51
1.3.2.	Relations entre la cognition et la mobilité .....	66
	Paradigme de la double tâche .....	66
1.4.	Résumé de la revue de la littérature et pertinence de la thèse .....	69
2.	Cadre Expérimental .....	71
2.1.	Description générale, objectifs et hypothèses .....	71
2.2.	Rapports de recherche .....	73
2.2.1.	Article #1 : CÉMAST .....	73
2.2.2.	Article #2 : IFACCE-t.....	93
2.2.3.	Article #3 : IFACCE .....	120
2.3.	Discussion.....	158
3.	Conclusion et perspectives.....	165
	Références .....	167

## Liste des Figures

**Figure 1** – Vitesse de marche et coût énergétique

**Figure 2** – Interactions entre le métabolisme de repos, le coût énergétique de la marche spontanée et  $\dot{V}O_2\text{max}$

**Figure 3** – Comparison of the gross energy cost of walking for both testing modes

**Figure 4** – Comparison of the net energy cost of walking for both testing modes

**Figure 5** – Relationship between the flexibility score of the Stroop task (flexibility condition – average of the naming/reading conditions) and TUG performance

**Figure 6** – Relationship between the flexibility score of the Stroop task (flexibility condition – average of the naming/reading conditions) and 10MWT performance

**Figure 7** – Flow chart

**Figure 8** – Relative changes %  $((\text{post-pré})/\text{pré}) * 100$  for :

a- Fat Free Mass

b- Fat Mass

c-  $\dot{V}O_2\text{peak}$

d- MECW at  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

**Figure 9** – Effect sizes for potential energy at different walking speed

**Figure 10** – Relative changes %  $((\text{post-pré})/\text{pré}) * 100$  for the inertial maximal strength

## Listes des Tableaux

**Tableau I** – Comparaison du coût énergétique mesurée sur tapis roulant ou au sol

**Tableau II** – Contribution respective des principaux déterminants à la réduction de la  $\dot{V}O_2$ max associée au vieillissement

**Tableau III** – Études répertoriées qui soutiennent l’hypothèse cardiovasculaire

**Tableau IV** – Études répertoriées qui suggèrent un lien entre les qualités neuromusculaires, la motricité globale et les fonctions cognitives

**Tableau V** – Participants characteristics

**Tableau VI** – Comparison of the treadmill and overground MECW

**Tableau VIII** – Medical/social characteristics of participants

**Tableau IX** – Stroop performance

**Tableau X** – Aerobic performance

**Tableau XI** – Neuromuscular performance

**Tableau XII** – Study overview

**Tableau XIII** – Aerobic training prescription

**Tableau XIV** – Strength training prescription

**Tableau XV** – Medical/cognitive characteristics of participants

**Tableau XVI** – Anthropometric characteristics

**Tableau XVII** – Aerobic performance (IFACCE)

**Tableau XVIII** – Neuromuscular performance (IFACCE)

**Tableau XIX** – Functional capacities

**Tableau XX** – RNG performance (single task)

**Tableau XXI** – RNG performance (dual-task)



## Liste des Abréviations

10MWT	Test de marche à vitesse maximale sur 10 mètres	kg	Kilogramme
1RT	Entraînement en résistance 1 fois par semaine	km	Kilomètre
2RT	Entraînement en résistance 2 fois par semaine	L	Litre
A	Entraînement aérobie	m	Mètre
$a-\bar{v} O_2$	Différence artério-veineuse en oxygène	M	Entraînement en musculation
AMT	Entraînement combiné aérobie et mémoire	Mec	Énergie mécanique
AP	Activité physique	MECW	Metabolic energy cost of walking
ATP	Adénosine triphosphate	MET	Métabolisme de repos
BDNF	Brain derived neurotrophic factor	MG	Motricité globale
°C	Degré Celcius	min	Minute
C	Contrôle	ml	Millilitre
CE	Coût énergétique de la locomotion	MT	Entraînement de la mémoire
CEB	Coût énergétique de la locomotion brut	N	Newton
CEMAST	Coût énergétique, marche, aînés, sol vs. tapis	O <sub>2</sub>	Oxygène
CEN	Coût énergétique de la locomotion net	OMS	Organisation mondiale de la santé
cm	Centimètre	PAM	Puissance aérobie maximale
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Urée	Q̇ <sub>c</sub>	Débit cardiaque
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone	QR	Quotient respiratoire
CRIUGM	Centre de recherche de l'institut universitaire de gériatrie de Montréal	RM	Répétition maximale Tâche de génération aléatoire de chiffres
CV	Coefficient de variation	RNG	Substrats énergétiques
E	Entraînement en équilibre	sec	Seconde
ECL	Energy cost of locomotion	SEM	Erreur standard de la mesure
EMGS	Electromyographie de surface	SNC	Système nerveux central
ES	Effect size	T	Chaleur
FC	Fréquence cardiaque	T.max.inc	Test maximal incrémenté
h	Heure	TE	Temps d'exécution
H	Hydrogène	TP	Touche principale
H <sub>2</sub> O	Eau	TUG	Timed up and go
ICC	Coefficient de corrélation intraclasse	VAM	Vitesse aérobie maximale Facteurs de croissance de l'endothélium vasculaire
ICP	Indice du coût physiologique	VEGF	
IFACCE	Intervention - Aérobie, Force Coût énergétique, Cognition	VES	Volume d'éjection systolique
IFACCE-t	Intervention - Aérobie, Force Coût énergétique, Cognition - Transversale	ṠO <sub>2</sub> max	Consommation maximale d'oxygène
IGF-1	Insulin-like growth factor 1	ṠO <sub>2</sub> pic	Pic de la consommation d'oxygène
IP	Intervalles préparatoires	W	Watts
kcal	Kilocalorie		

## Remerciements

Cette thèse marque la fin d'un long parcours à l'Université de Montréal. Le mardi 4 septembre 2001, je me suis présenté à mon premier cours au baccalauréat en éducation physique et à la santé. Malgré que j'exprimais déjà, très naïvement, le désir de poursuivre des études supérieures, je ne pouvais pas me douter être en train d'écrire ces lignes plus d'une douzaine d'années plus tard...

Les premiers remerciements s'adressent à Laurent Bosquet qui a été mon directeur depuis mon passage au 2<sup>e</sup> cycle. Sa rencontre à l'automne 2005 représente un point tournant dans ce cheminement. Au fil des années, une relation de confiance s'est établie et nous a permis de mener à terme ce projet d'études malgré la distance séparant Poitiers de Montréal. En plus de faire la démonstration constante de professionnalisme et d'une grande disponibilité, son calme devant les situations plus complexes et ses conseils judicieux ont su offrir un cadre de travail rassurant. Merci Laurent pour ce soutien tout au long de ces années. C'était un privilège de travailler sous ta direction. Ce sera maintenant une source inépuisable d'inspiration.

Le travail interdisciplinaire peut être très enrichissant mais aussi être source d'angoisses considérant l'ampleur des champs de compétences qui s'ouvrent devant nous. Grâce à son esprit vif, son ambition et sa passion pour la recherche, Louis Bherer a instauré une ambiance propice au dépassement de soi et à la réalisation de projets d'une grande envergure. Par sa présence, ses conseils et sa prise en charge de dossiers plus épineux, Louis a fait en sorte que mes travaux ont toujours pu avancer à bon rythme et sur de bons appuis. Voilà une première étape franchie. En route pour la prochaine... Merci.

Avec toutes ces années au département de kinésiologie de l'Université de Montréal, il me paraissait un peu étrange de quitter à la suite de ma maîtrise. François Prince est intervenu de manière à me permettre de demeurer affilié à cette institution qui m'a tant offert au fil des années. Merci pour cette confiance.

Parmi les avantages de la co-direction, se retrouve la possibilité de profiter des nombreuses collaborations établies au fil des projets de recherche. Ces professeurs et médecins provenant de différents milieux ont grandement contribué à l'élaboration de ce projet ainsi qu'à sa réalisation. Mes remerciements s'adressent ici à Sylvie Nadeau PhD, Mathieu Gayda PhD, Mylène Aubertin-Leheudre

PhD, Antony Karelis PhD, Martin Juneau MD, Anil Nigam MD, Marie Jeanne Kergoat MD et Thien Tuong Minh Vu MD.

Ce n'est pas un cliché de souligner le fait que la réalisation de ce projet aurait été impossible sans la contribution de ces professionnels et collègues étudiants. Merci à Florian Bobeuf PhD, Mélanie Renaud PhD, Chantal Mongeau PhD, Annie Fex, Lora Lehr, Marie-Ève Robillard, Nadia Jaffer, Dominic Beaulieu, Johane Landry, Régine Paul, Paulette Espinosa, Francine Giroux, Fanny Buannic, Marine Hopé, Séléna Lauzière, Carole Miéville, Philippe Gourdou, Majenta Whyte Potter-Mäl, Amira Boukadida, Michel Goyette, Chantal Daigle, Arthur Long, Lucie Lortie, Michèle Parenteau, Denis Arvisais, Julie Lalongé et Marie Cournoyer.

Un remerciement tout particulier à mes collègues Olivier Dupuy et Said Mekary avec qui j'ai eu le plaisir de partager de nombreux moments, les euphories comme les creux de vague.

Des remerciements vont aussi à l'équipe de l'Institut National du Sport du Québec avec Marc Gélinas, Jonathan Tremblay et André Fournier en tête qui m'ont permis de développer une carrière professionnelle en parallèle à mes études.

Toutes ces rencontres depuis maintenant 5 ans ont en commun de s'être déroulées sous le signe dominant de la bonne humeur. Merci d'avoir continué à sourire lors des moments plus difficiles.

Monique, Michael, Dominique, Léa, Ann-Léna et Alexandre.

Thomas et Philippe.

Mylène.

Merci.

# 1. Cadre Théorique

## 1.1. Introduction

L'organisation mondiale de la santé (OMS) estime que le nombre de personnes âgées de 60 ans et plus, aujourd'hui évalué à quelque 600 millions d'individus, doublera vers 2025 et atteindra deux milliards vers 2050 (OMS, 2006). Au Canada, on prédit que la population d'aînés passera de 4,2 à 9,8 millions d'ici 2036. À ce moment, plus de 24% des canadiens auront 65 ans et plus. L'OMS définit le vieillissement comme un processus graduel et irréversible de modification des structures et des fonctions de l'organisme résultant du passage du temps. Ces changements physiologiques affectent les capacités fonctionnelles de l'individu. Ceci peut altérer la qualité de vie et nécessiter l'intervention de professionnels de la santé et de membres de la famille rapprochée pour répondre aux besoins essentiels de la personne âgée.

La mobilité est un aspect important de la qualité de vie qui diminue avec l'âge. Par exemple, il est bien reconnu que le vieillissement s'accompagne d'une augmentation du coût énergétique de la marche (i.e., à une même vitesse de déplacement, un aîné déploie plus d'effort qu'un jeune adulte). Ce phénomène est combiné à la détérioration de la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ) et des qualités neuromusculaires. Par ailleurs, le vieillissement amène aussi une diminution des fonctions cognitives. La mémoire à court terme, l'attention et la vitesse de traitement de l'information sont souvent très altérées chez les personnes âgées. Enfin, des études récentes ont montré une relation entre le déclin de l'attention et la diminution de la vitesse de marche, suggérant que la cognition puisse jouer un rôle important sur la mobilité et les capacités fonctionnelles. Il a été également démontré que les aînés les plus à risque de chuter devaient spontanément cesser de marcher pour entretenir une conversation. Ce paradigme de double tâche met en lumière les limites des ressources attentionnelles; hypothèse qui suggère que deux tâches exécutées en même temps induiront une diminution de performance dans une ou deux tâches selon les exigences attentionnelles de celles-ci ainsi que leur importance relative selon le contexte immédiat.

Cependant, plusieurs études récentes suggèrent que la pratique régulière d'activités physiques, et spécialement l'entraînement de l'aptitude aérobie, peut aider à préserver les capacités fonctionnelles et cognitives des personnes âgées. D'autres méthodes d'entraînement s'avèrent aussi efficaces dans cette perspective. En effet les entraînements de la force musculaire ou de la motricité

globale semblent aussi être associées à de meilleures performances cognitives et fonctionnelles. Bien que les liens entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives des aînés restent à préciser, il apparaît une piste de recherche particulièrement intéressante. En effet, il a été proposé que l'interaction entre le coût énergétique de la marche et la  $\dot{V}O_2\text{max}$  représente un déterminant important de la vitesse de marche spontanée chez les aînés. La différence entre ces deux concepts ( $\dot{V}O_2\text{max}$  et coût énergétique de la marche) a été représentée comme une réserve d'énergie (énergie potentielle, traduction libre de *potential energy* tel que décrit par Schrack et collègues (1)) permettant à l'individu de participer à des activités physiques plus intenses que la simple marche spontanée. Plus cette réserve est grande, moins l'intensité relative des activités de la vie de tous les jours est élevée. Considérant la relation entre la locomotion et les fonctions cognitives chez les aînés ainsi que le paradigme de double tâche, il est permis de se demander si un programme d'entraînement induisant une amélioration de cette réserve énergétique permettra d'allouer davantage de ressources attentionnelles dans une situation de double tâche et ainsi d'améliorer les performances cognitives.

L'objectif de cette thèse est donc de préciser les relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives chez les aînés. Plus précisément, les effets d'un protocole d'entraînement visant à améliorer l'énergie potentielle seront vérifiés afin de déterminer l'efficacité d'un tel programme pour améliorer les fonctions cognitives en double tâche.

Ainsi, une revue de la littérature portera d'abord sur les principaux facteurs de la condition physique chez les aînés. Après une définition des concepts présentés et une discussion en regard des déterminants propres à chaque qualité, il sera question des altérations causées par le vieillissement. De plus, les modalités d'évaluation des différents paramètres de la condition physique seront présentées dans une perspective de suivi à long terme. Par la suite, une section portera sur l'interaction entre ces qualités physiques et le maintien de la mobilité chez les aînés. Entre autres, les effets de l'entraînement aérobie et musculaire sur la condition physique seront présentés. La revue de la littérature se tournera ensuite vers les relations entre les fonctions cognitives, l'activité physique et la mobilité. Différentes méthodologies seront décrites pour démontrer l'effet bénéfique de la pratique régulière de l'activité physique sur la cognition. Des hypothèses quant aux mécanismes sous-jacents seront aussi suggérées. Par ailleurs la relation étroite entre les fonctions cognitives et le

maintien de la mobilité sera aussi abordée alors que différentes considérations d'ordre méthodologique seront précisées.

Dans une 2<sup>e</sup> partie, le cadre expérimental, composé de trois projets de recherche, sera dévoilé. Dans un premier temps, un projet dont les enjeux sont reliés aux méthodes de mesure du coût énergétique de la marche chez les aînés sera présenté. Par la suite, une approche transversale permettra de préciser les relations entre des tests de marche, les principaux déterminants de la condition physique et les fonctions cognitives. Le 3<sup>e</sup> projet visera quant à lui à déterminer les effets d'un entraînement physique à haute intensité sur les performances cognitives en contexte de double tâche. Enfin, une discussion générale suivra afin de préciser les conclusions et perspectives de cet ouvrage.

## 1.2. Condition physique

### 1.2.1. Coût énergétique de la locomotion (CE)

#### Définition

Le concept de coût énergétique dans les activités de locomotion (CE) est défini comme étant la quantité d'énergie utilisée pour parcourir une distance donnée (2). On rapporte que l'efficacité de la locomotion humaine est limitée à un rendement maximal d'environ 25%, ce qui signifie qu'une majorité du travail effectué par l'organisme est perdu en chaleur (3). Cette observation s'explique d'abord par le fait que l'efficacité de la mitochondrie telle que décrite par le rapport adénosine triphosphate (ATP)/oxygène (O) est d'environ 50% ainsi que par un rendement de la contraction musculaire qui ne semble guère dépasser, également, les 50% (3).

#### Déterminants

La figure 1 (4) illustre la relation entre la vitesse de marche et le CE. Il apparaît donc que les vitesses aux environs de  $4 \text{ km.h}^{-1}$  semblent être celles qui induisent le plus faible CE qui correspond approximativement à  $0,75 \text{ kcal.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$  (4-6) alors que les vitesses plus faibles ou plus élevées induisent une augmentation marquée de la dépense énergétique. Naturellement, l'être humain tend à adopter la vitesse de marche pour laquelle il est le plus économe dans ses déplacements (7, 8). Cependant, la sélection naturelle de la vitesse optimale en regard du CE semble reliée davantage à la fréquence des pas qu'à la vitesse elle-même (5). Il a été suggéré que la fréquence de pas optimale était déterminée par la fréquence de résonance propre à chaque individu de manière à minimiser le CE et les forces musculaires nécessaires au mouvement. Dans ce modèle, le membre inférieur est présenté comme un pendule qui oscille et qui permet, de manière cyclique, les transferts d'énergie potentielle et cinétique grâce à l'action du système musculo-tendineux (9). À cet effet, une étude intéressante présente les travaux effectués alors que la fréquence des pas a été manipulée pour une même vitesse de marche (10). Après avoir déterminé la fréquence de pas préférée des participants (8 hommes et femmes âgés entre 21 et 37 ans) durant une séquence de marche à vitesse spontanée, de nouvelles séquences de marche ont été expérimentées; toujours à la même vitesse mais cette fois en modifiant la fréquence des pas jusqu'à +/- 15 cycles par minute. La longueur de ceux-ci devait donc être adaptée afin de maintenir la bonne vitesse. Il a été rapporté qu'une relation en U décrit le lien entre le CE et la fréquence des pas. En effet, alors que la fréquence de pas spontanée est associée au CE le plus faible, une augmentation de 46% du CE caractérise la condition où la fréquence est ralentie

de 15 cycles par minute alors que cette augmentation atteint 18% lorsque la fréquence est plutôt augmentée de 15 cycles par minute. Les auteurs ont émis l'hypothèse que la combinaison longues enjambées/faible fréquence est associée à une plus grande instabilité et implique ainsi davantage les groupes musculaires responsables du maintien de l'équilibre. En augmentant graduellement la fréquence de pas, on passe par la zone optimale qui induit le CE le plus faible avant de voir ce dernier augmenter à nouveau lorsque la fréquence dépasse celle associée à la vitesse spontanée. On suggère qu'une meilleure utilisation de l'énergie élastique emmagasinée dans le système musculotendineux contribue à une élévation moins importante du CE dans cette dernière condition.

Ces différences ont mené à la description de deux hypothèses qui pourraient expliquer le choix de la fréquence de pas et de la vitesse optimale. C'est ainsi que les concepts d'approche dynamique et d'auto-optimisation ont été proposés. Alors que l'approche dynamique fait référence au fait que l'être humain est à la recherche de stabilité durant la démarche afin d'éviter les possibles chutes, l'auto-optimisation suggère que chaque individu est sensible au CE associé aux différentes conditions de marche. Ensemble, ces concepts proposent donc que la démarche appropriée est sélectionnée de manière à induire le plus faible CE (auto-optimisation) et la meilleure stabilité (approche dynamique) (11). Des travaux récents semblent appuyer cette hypothèse et offrent une indication quant à la séquence temporelle des ajustements faits par l'individu. Dans cette étude, les effets de perturbations de la vitesse durant la marche (tapis roulant) sur les ajustements de la fréquence des pas ont été vérifiés. Il en ressort que deux processus sont mis en place par les individus de manière à retrouver la fréquence optimale. Il semble que des ajustements sont exécutés très rapidement (délai inférieur à deux secondes) alors qu'une deuxième séquence d'ajustements survient ensuite durant les 30 secondes suivant les perturbations. Ces résultats ont été interprétés comme étant des phases distinctes qui réfèrent, respectivement, à des mécanismes pré-programmés qui font appel au système nerveux central (SNC) pour retrouver les conditions idéales de la démarche en fonction du contexte ainsi qu'à la contribution de chémorécepteurs et d'afférences musculaires (groupe IV) qui vont fournir au SNC les informations nécessaires aux ajustements fins qui induiront une modification de la démarche de manière à obtenir le CE plus plus avantageux (12).

Il semble donc que le CE est principalement déterminé par la fréquence de pas et la vitesse de déplacement. L'individu semble adapter ces paramètres selon une séquence précise en fonction de l'environnement immédiat de manière à minimiser le CE et à maximiser l'équilibre nécessaire à la



locomotion. À cet effet, les qualités neuromusculaires jouent un rôle important afin de contribuer de façon optimale aux transferts cycliques d'énergies potentielle et cinétique.

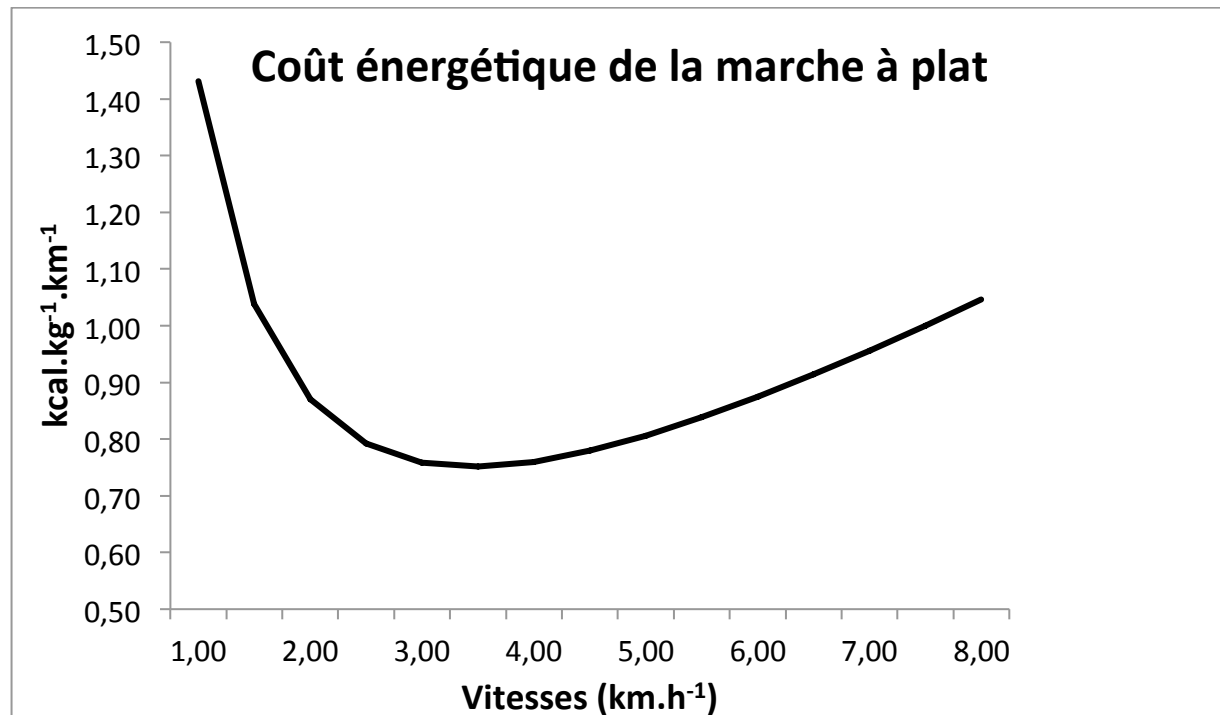


Figure 1 – Vitesse de marche et coût énergétique (à partir des travaux de Bunc et collègues (4)).

#### CE et vieillissement

En regard des données scientifiques disponibles, il apparaît que l'âge joue un rôle important sur la dépense énergétique lors de la marche. En effet, des auteurs suggèrent que le vieillissement est marqué par une hausse importante du CE (6, 13, 14). Dans cette perspective, il a été démontré que pour les mêmes vitesses de déplacement, le coût énergétique est augmenté de 12 et de 22% lorsque des jeunes adultes (âge moyen de 25 ans) sont comparés à des aînés de 65 et 80 ans, respectivement (6). Récemment, on a proposé l'augmentation des co-contractions agonistes/antagonistes comme possible mécanisme associé aux élévations du CE observées chez les aînés (15). Paradoxalement, ce phénomène de co-contraction peut potentiellement être favorable dans un contexte de stabilité articulaire accrue (15). Par ailleurs, il semble qu'une moins grande efficacité mitochondriale (diminution du rapport ATP/oxygène) puisse expliquer, en partie du moins, le CE plus élevé observé avec l'avancée en âge (16). De plus, la dynapénie définie comme étant une diminution de la force musculaire associée au vieillissement (17) peut également représenter un mécanisme associé à une

moins grande économie de la locomotion. Cependant, il semble que l'efficacité de la contraction musculaire telle que déterminée par le rapport entre la puissance produite par unité d'ATP dans les muscles quadriceps ne soit pas altérée avec le vieillissement (16). Malgré tout, il apparaît que des déficits musculaires lors de l'extension de la hanche (18) ainsi qu'une réduction de la force maximale volontaire des extenseurs du genou (6) sont associés à un un CE plus élevé.

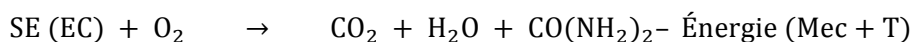
L'importance du CE dans un contexte d'évaluation de la mobilité des aînés a été récemment mise en évidence. D'abord, il apparaît que le ralentissement progressif de la vitesse spontanée de marche soit associé à un risque plus élevée de mortalité. À cet effet, les résultats émanant de l'étude longitudinale Whitehall II (Grande-Bretagne) suggèrent que chez un groupe d'aînés dont l'âge médian est de 61 ans (+/- 6; n = 6266 dont 29% de femmes), une vitesse de marche spontanée inférieure à 1.26 m.sec<sup>-1</sup> chez les hommes et à 1.09 m.sec<sup>-1</sup> chez les femmes est associée à un risque plus élevé de mortalité; toutes causes confondues (19). Cette relation semble se maintenir à un âge plus avancé alors que les résultats obtenus avec la cohorte Health ABC aux États-Unis (n = 3047; 74,2 +/- 2,9 ans; 51,5% de femmes) suggèrent qu'une vitesse spontanée inférieure à 1 m.sec<sup>-1</sup> est associée à un risque plus élevé de morbidité (20). Enfin, une étude longitudinale échelonnée sur 8 ans rapporte que le taux de mortalité était moins élevé chez les participants ayant amélioré leur vitesse de marche durant la première année du suivi (États Unis; n = 439; 73,9 +/- 5,6 ans; 44% de femmes) (21) ce qui suggère qu'une intervention visant à favoriser l'amélioration de la mobilité chez les aînés peut avoir une incidence sur la longévité des individus. Alors que ces données sont très intéressantes d'un point de vue clinique puisqu'elles permettent d'identifier certains seuils de vitesse en deça desquels les risques sur la santé sont nettement plus prononcés, il n'en demeure pas moins qu'elles sont peu révélatrices quant aux mécanismes qui expliquent cette diminution de la vitesse en vieillissant. À cet égard, les résultats d'une récente étude démontrent une étroite relation entre la réduction de la vitesse de marche spontanée associée au vieillissement et le CE. Il en ressort que l'augmentation du CE semble refléter l'image miroir de la diminution de la vitesse de marche (22). Le modèle proposé par ces auteurs suggère que le CE représente un déterminant de la vitesse de marche chez les aînés même après avoir pris en considération des variables comme l'âge, le sexe, la taille, les troubles de l'équilibre et un diagnostic de diabète. Cette étude américaine qui était basée sur les résultats obtenus par plus de 400 adultes dont l'âge moyen était de 68,1 +/- 12,5 ans tend à démontrer l'importance du CE dans une perspective de maintien de la mobilité chez les aînés et suggère une grande pertinence du suivi clinique de cette qualité physiologique au fil du temps.

## Modalités d'évaluation

### Calorimétrie indirecte respiratoire approximative

Le métabolisme est défini comme étant le taux de production de chaleur qui reflète l'ensemble des réactions se déroulant dans un organisme vivant. En mesurant la chaleur libérée par un individu, il est possible d'estimer le coût métabolique d'une activité. L'unité de base de cette mesure est la calorie qui est définie comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour qu'un gramme d'eau subisse une élévation de température de 1 degré Celsius (de 15 à 16 °C). Le procédé par lequel on effectue la mesure du coût métabolique en déterminant la production de chaleur est appelé calorimétrie (23).

La mesure directe de la chaleur libérée par un organisme demeure à ce jour assez complexe et peu conviviale, surtout dans le cas où on veut étudier un individu en mouvement (23). Il existe par ailleurs des techniques de mesures indirectes qui se basent sur la consommation d'oxygène ( $O_2$ ) d'un individu. Chez l'être humain au repos, c'est l'oxydation des substrats énergétiques (SE) provenant de l'alimentation (glucides, protéines et lipides) qui libère de l'énergie sous forme de chaleur à la suite de la respiration cellulaire (du dioxyde carbone -  $CO_2$ , de l'eau métabolique -  $H_2O$  ainsi que de l'urée -  $CO(NH_2)_2$  sont aussi produits). Pour créer un mouvement, une fraction de cette énergie chimique (EC) provenant des aliments est plutôt transformée en énergie mécanique (Mec); le reste étant toujours libéré sous forme de chaleur (T).



### *Équivalent énergétique approximatif de l' $O_2$*

La calorimétrie indirecte respiratoire approximative repose sur la connaissance de l'équivalent énergétique approximatif de l' $O_2$ . Ce concept est défini comme étant la quantité d'énergie libérée quand 1 litre d' $O_2$  est utilisé pour oxyder un mélange inconnu de SE. Sa valeur correspond à 5 kilocalories (kcal) (24). C'est donc dire qu'à partir de la consommation d' $O_2$  d'un individu, il est possible de mesurer le coût métabolique de l'activité pratiquée. Pour obtenir une mesure du coût énergétique dans le cas de la marche, il suffit de diviser la consommation d' $O_2$  ( $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ) par la vitesse de déplacement ( $m \cdot min^{-1}$ ). Depuis la valeur ainsi obtenue ( $ml \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$ ), il reste à utiliser l'équivalent énergétique de l' $O_2$  pour transformer la consommation d' $O_2$  en dépense énergétique ( $kcal \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$ ). Afin d'augmenter la précision de ce facteur de conversion (1 L d' $O_2$  = 5 kcal), l'utilisation de tables de quotients respiratoires (QR - mesurés à la bouche) non corrigés pour

l'oxydation de protéines permet de tenir compte de l'équivalent énergétique de l'O<sub>2</sub> spécifique au mélange de substrats utilisé durant l'effort (25). D'ailleurs, il a été récemment rapporté que de rapporter le CE en tenant compte du QR était plus sensible aux modifications de la vitesse en course à pied (26).

#### *Cinétique d'O<sub>2</sub> et état stable*

Au repos, la consommation d'O<sub>2</sub> est estimée à 3,5 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>(27). La pratique d'une activité physique a comme effet d'activer le métabolisme afin de répondre aux besoins énergétiques. Pour mesurer un coût énergétique associé à une activité qui soit bien le reflet de l'intensité prescrite au candidat, il est primordial d'obtenir un état stable dans la consommation d'O<sub>2</sub>. Cette condition n'est pas présente en début d'exercice. Il apparaît en effet que trois phases d'adaptation surviennent au départ. Il s'agit du modèle de Whipp (28, 29) tel que rapporté par plusieurs auteurs (24, 27, 30). La première, d'une durée de 15 à 25 secondes (30), est dite cardiodynamique et fait référence à une augmentation soudaine du retour veineux vers les poumons. Afin d'oxygéner la plus grande quantité de sang passant par les poumons, il y a une augmentation du prélèvement d'O<sub>2</sub> à partir des alvéoles (24). Une deuxième phase dite métabolique reflète quant à elle l'hydrolyse de la phosphocréatine (PCr) (24) et l'oxydation des substrats au niveau tissulaire (27). Enfin, une troisième phase survient après 3 à 4 minutes de travail constant et correspond à l'état stable de la consommation d'O<sub>2</sub> (27, 30). Cependant, pour des intensités très élevées (qui s'approchent de la puissance aérobie maximale), une autre phase aussi appelée composante lente apparaît. Durant cette phase, on constate une dérive de la consommation d'O<sub>2</sub> sans apparition de plateau ou d'état stable. Cette phase peut être causée par un recrutement plus important des fibres musculaires rapides (24, 30).

Ces considérations ont un impact important sur la mesure du coût énergétique de la marche à une intensité précise. Pour atteindre un état stable dans la consommation d'O<sub>2</sub>, il faut donc que l'exercice soit maintenu plus de 4 minutes. Il faut également éviter les intensités très élevées qui s'approchent de la puissance aérobie maximale afin d'éviter le phénomène de dérive.

#### **Coût énergétique brut et net: reproductibilité de la mesure**

Alors que certains auteurs utilisent le coût énergétique brut (CEB), d'autres font référence au coût énergétique net (CEN). Le CEB comprend deux composantes : le métabolisme de repos et le coût associé au maintien de l'équilibre en position debout et aux mouvements de la marche. Dans le cas du CEN, le métabolisme de repos est soustrait de l'équation. En utilisant une valeur nette, on obtient le coût réel de l'activité, sans tenir compte de la variabilité inter-individuelle qui peut être observée

pour le métabolisme de repos. Cette procédure permet entre autres d'atténuer les différences observées dans le coût énergétique de la marche lorsque des enfants sont comparés à des adultes (31). Tel que discuté dans une section précédente, le métabolisme de repos peut être estimé à  $3,5 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  (27). Il existe également de nombreuses équations qui permettent de prédire le métabolisme de repos à partir du poids, de la taille, de l'âge, du sexe, de la composition corporelle et de la surface corporelle (32). Ces valeurs obtenues ne sont que des estimations et une mesure réelle du métabolisme de repos mérite d'être effectuée à des fins de précision. Les recommandations pour procéder à cette mesure sont les suivantes (32):

- Le sujet doit être allongé complètement, éveillé et bien reposé.
- Le sujet doit être à jeun depuis 10 à 12 heures.
- La température ambiante doit être constante et située entre 22 et 26°C.
- Le sujet ne doit pas être soumis à un stress émotionnel particulier et doit être familier avec les procédures d'évaluation.

Il apparaît que plusieurs auteurs effectuent plutôt une mesure du métabolisme de repos dans la position debout ou assise (14, 31, 33, 34). Cependant, une critique de cette méthode réside dans le fait que le coût métabolique associé à l'activation des muscles des jambes et du tronc pour maintenir l'équilibre, la posture et supporter le poids du corps est inclus dans cette analyse. Parce que ces muscles sont activés avec le même objectif de contrôle de la posture lors de la marche, cette procédure élimine une faible portion du coût réel de cette activité ce qui n'est pas le cas avec le métabolisme de repos en position allongée (35).

Des études récentes ont tenté de vérifier si l'utilisation du CEB ou du CEN présentait des avantages en regard de la reproductibilité de la mesure. L'équipe de Vilhena de Mendonça (33) a invité 16 participants (9 hommes;  $22.3 \pm 4.3$  ans) sains à prendre part à deux séances de tests séparées au minimum de 2 jours mais par un maximum d'une semaine. Tous ces participants devaient porter un appareil pour mesurer les échanges gazeux (Quark b<sup>2</sup>, Cosmed, Srl, Rome, Italy). Une séance débutait typiquement par une période de repos de 15 minutes en position assise. La consommation d'O<sub>2</sub> des 5 dernières minutes était analysée. Le coût énergétique de la marche sur tapis roulant était ensuite évalué à une vitesse de  $4 \text{ km.h}^{-1}$  dans cinq conditions de pentes différentes (0%, 2.5%, 5%, 7.5% et

10%). Chaque intensité devait être maintenue durant 5 minutes. La consommation d'O<sub>2</sub> des 120 dernières secondes de chaque palier était utilisée pour les analyses. D'abord, les auteurs rapportent un ICC de 0,68 et un CV de 12,9 (+/- 3%) pour la mesure du métabolisme de repos. Aucune différence significative n'est signalée concernant les coefficients de variation pour les mesures de consommation d'O<sub>2</sub> brute et nette et ce pour toutes les intensités évaluées. Malgré des coefficients de corrélation intra-classe légèrement plus faibles pour le CEN (0,79 à 0,91 vs. 0,89 à 0,94 – différences non significatives), les auteurs concluent qu'il n'y a pas d'avantage, en termes de reproductibilité, à exprimer la mesure du coût énergétique de façon nette ou brute. Les ICC qui atteignent 0,9 sont considérés très élevés (36) ce qui est le cas dans les deux conditions de cette étude; particulièrement pour les intensités les plus élevées. Ce dernier constat semble en accord avec la littérature qui suggère une plus grande fidélité dans les mesures lorsque l'intensité augmente (37). Les valeurs plus faibles d'ICC rapportées pour le CEN sont probablement reliées à un métabolisme de repos plus variable.

Brehm (34) a mesuré le coût énergétique de la marche chez deux groupes de sujets sains. Un groupe d'hommes et de femmes dont l'âge moyen était de 55 ans (n=14, 6 hommes) a complété 4 séances de tests durant lesquelles les mêmes procédures ont été répétées. Chaque séance était séparée de 7 jours. Les sujets devaient porter un système portable d'analyse des échanges gazeux (VmaxST; Sensormedics, Bilthoven, The Netherlands). D'abord, les sujets devaient s'asseoir sur une chaise durant 10 minutes en regardant un vidéo. Ensuite, les sujets devaient marcher 5 minutes sur une piste ovale de 50m située à l'intérieur. La consigne donnée par les expérimentateurs était de marcher à une vitesse *normale et habituelle*. En regard des résultats présentés, il apparaît que les mesures de coût énergétique de la marche (CEN et CEB) sont très reproductibles (36) comme en témoignent les coefficients de corrélation intra-classe (ICC) variant de 0,93 à 0,96. Cependant, les auteurs rapportent une plus grande variabilité intra-individuelle (+7%) lorsque le CEN est utilisé.

Plus récemment, 22 adultes (11 hommes, 24.7 +/- 6.1 ans) ont participé à une étude dans laquelle 6 vitesses de marche à plat ont été expérimentées sur tapis roulant (38). La reproductibilité des mesures a été vérifiée en comparant les résultats obtenus sur deux séances identiques séparées de 5.3 (+/- 1.8) journées. Chaque condition de marche était d'une durée de 5 minutes alors que la consommation d'O<sub>2</sub> (Cosmed K4b2, Cosmed, Italy) des deux dernières minutes était utilisée pour les calculs du CEN et du CEB. Au préalable, les participants étaient conviés à une période de repos de 10

minutes en position assise afin de pouvoir calculer le CEN. Les résultats démontrent un certain avantage en faveur du CEB (ICC = 0.84 à 0.93 vs. 0.69 à 0.90) relié principalement à une plus grande variabilité de la mesure du métabolisme de repos (ICC = 0.43). Ces auteurs concluent donc qu'un contrôle très strict durant la période de mesure de la consommation d'O<sub>2</sub> au repos doit être appliqué lorsque des mesures du CEN sont nécessaires.

Certains auteurs suggèrent que le coût énergétique de la marche doit être exprimé en tenant compte du métabolisme de repos et des différences anthropométriques inter individuelles; surtout lorsque des groupes hétérogènes en ce qui concerne l'âge et la stature sont comparés (31, 39, 40). Cependant, quand cette méthode est comparée au CEB, il a été démontré sur des mesures répétées que le coefficient de variation était significativement plus élevé (9% vs. 14%, p<0,05) lorsque les données anthropométriques et le métabolisme de repos étaient pris en considération. Il peut être malgré tout intéressant d'utiliser ce type d'approche lorsque des grandes différences de poids et de taille entre les sujets sont attendues (40).

En regard de ces données présentées dans la littérature, il apparaît que le CEN et le CEB sont deux méthodes d'analyse des résultats qui démontrent une grande fidélité. Il revient donc au chercheur de déterminer, en fonction des objectifs de l'étude, si la composante du métabolisme de repos doit être étudiée sachant que celle-ci semble entraîner une plus grande variabilité. Il est également intéressant de constater que la reproductibilité semble augmenter avec l'intensité de l'exercice. Cette information est fort pertinente dans le cadre d'une évaluation clinique dans la mesure où le sujet est apte à soutenir ces charges de travail plus élevées. Enfin, selon les caractéristiques anthropométriques attendues, il est possible d'inclure ces paramètres dans l'analyse.

### Choix de l'intensité

Considérant les informations présentées dans les sections précédentes, il ne semble pas y avoir de consensus quant à la vitesse qui doit être prescrite aux participants lors d'une évaluation clinique du coût énergétique de la marche. Alors que certains auteurs proposent aux sujets de choisir une vitesse spontanée et confortable qui implique une variabilité entre les sujets (34), d'autres suggèrent une vitesse déterminée au préalable qui sera la même pour tous (33). De même, certains auteurs dressent le portrait complet de la relation entre le coût énergétique et la vitesse de déplacement (6, 14) alors que certains ne suggèrent qu'une seule vitesse (33, 41). Il est certain que les objectifs de la recherche ou de l'intervention clinique doivent guider ces décisions. Cependant, il

semble très intéressant de vérifier les effets d'un programme d'entraînement sur l'ensemble de la relation CEB-vitesse afin de mieux comprendre les enjeux qui sont susceptibles de varier d'un individu à l'autre. En effet, il pourrait être suggéré que certains auront tendance à démontrer des valeurs élevées sur l'ensemble de la relation alors que pour d'autres, seulement une partie sera altérée. Dans le cas où les vitesses plus rapides induiraient un CEB particulièrement plus élevé, un effort pourra être fait afin d'augmenter  $\dot{V}O_2\text{max}$  et/ou réduire le CEB de manière à réduire l'intensité relative des activités de la vie quotidienne. De plus, il a été proposé que la reproductibilité de la mesure est améliorée alors que l'intensité est plus élevée (33). Par ailleurs, une augmentation marquée du CEB aux vitesses plus faibles pourra suggérer une intervention visant à améliorer l'équilibre.

#### Choix de l'ergomètre: tapis roulant vs. sol

Avec une plus grande accessibilité aux appareils portatifs qui permettent une mesure des échanges gazeux, il est maintenant possible de se déplacer sur le terrain pour évaluer un candidat dans un contexte qui sera spécifique aux conditions qui prévalent au quotidien. Cependant, dans ce milieu très spécifique, le contrôle sur l'ensemble des variables n'est pas toujours possible. Par exemple, dans un souci de reproductibilité, un chercheur peut vouloir contrôler la température, le taux d'humidité et les distractions environnantes, ce qui n'est pas toujours possible à l'extérieur du laboratoire. De plus, dans certaines recherches, plusieurs mesures sont effectuées simultanément pour répondre à l'ensemble d'une problématique. Il n'est alors pas toujours possible de déplacer tous les instruments sur le terrain. C'est pourquoi la marche, bien que pratiquée normalement sur un ensemble de surfaces autant à l'extérieur qu'à l'intérieur, est souvent évaluée sur tapis roulant en laboratoire. La question est de savoir si ce mode d'évaluation induit des différences significatives sur les variables étudiées et, plus précisément dans le contexte qui nous intéresse, sur le coût énergétique.

Cette question se pose depuis quelques années déjà comme le démontrent les travaux de Ralston (42). En 1960 sont publiés les résultats de cette étude qui vise à déterminer si la dépense énergétique de la marche (à 2,93 et 5,86 km.h<sup>-1</sup>) est équivalente selon qu'elle soit pratiquée sur le sol ou sur un tapis roulant. 6 sujets (4 hommes et 2 femmes) âgés de 21 à 52 ans ont participé à cette recherche. Les participants devaient d'abord marcher 10 minutes sur le sol, puis 10 minutes sur tapis avant de revenir pour 10 minutes sur le sol. Une deuxième séquence de même type est ensuite prévue à la différence que le tapis est expérimenté deux fois. Les échanges gazeux étaient mesurés à l'aide d'appareils de type Max Planck (respiromètre) et Beckman-Pauling (analyseur d'O<sub>2</sub>). Aucune



spécification n'est donnée par l'auteur quant au contrôle de la vitesse au sol. Les résultats pour les tests à 5,86 km.h<sup>-1</sup> sont présentés dans le tableau I.

Sujet	Série 1		Série 2		Moyennes		Écart		
	Sol	Tapis	Sol	Tapis	Sol	Tapis			
1	0,668	0,723	0,699	0,699	0,729	0,730	0,699	0,717	0,018
2	0,689	0,690	0,684	0,677	0,654	0,638	0,676	0,668	-0,008
3	0,586	0,616	0,606	0,608	0,632	0,604	0,608	0,610	0,002
4	0,712	0,761	0,761	0,709	0,736	0,700	0,736	0,723	-0,013
5	0,735	0,781	0,744	0,719	0,776	0,734	0,752	0,745	-0,007
6	0,745	0,767	0,712	0,758	0,737	0,737	0,731	0,754	0,023

Tableau I – Comparaison du coût énergétique mesuré sur tapis roulant ou au sol (42).

Résultats en kcal.kg<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>

L'auteur ne rapporte aucune différence significative d'un point de vue statistique pour les deux vitesses expérimentées. Cette étude présente tout de même quelques limites. D'abord, le nombre peu élevé de participants rend difficile la généralisation des résultats observés. De plus, il apparaît que ces sujets (surtout 2 et 3) sont particulièrement économes lorsqu'on compare les valeurs présentées par Ralston avec celles présentées dans la figure 1 par Bunc (4). Néanmoins, cette étude suggère que le sol et le tapis comme surfaces n'induisent pas de différence significative pour le CEB.

Les travaux de Pearce (43) présentent par ailleurs des résultats différents de ceux avancés par Ralston. En effet, il semble selon ces résultats que le coût énergétique de la marche soit inférieur pour le tapis roulant en comparaison avec la marche au sol. Dans cette étude, 42 hommes de 19 à 66 ans (moyenne de 48,3 +/- 3 ans) ont été invités à marcher d'abord dans un corridor à quatre vitesses dictées par les consignes suivantes : 1- Marchez plutôt lentement 2- Marchez à une vitesse normale : ni trop lente, ni trop rapide 3- Marchez à une vitesse plutôt rapide sans vous exténuer 4- Marchez le plus vite possible. Les sujets devaient marcher sur 240m (8 \* le corridor de 30m). Lors d'une autre séance, les sujets devaient marcher sur tapis roulant alors que les vitesses prescrites étaient les mêmes que celles qui avaient été établies par chaque individu lors du test au sol. Dans les deux situations, la consommation d'O<sub>2</sub> a été mesurée grâce à la méthode des sacs de Douglas. Les résultats démontrent que les trois vitesses les plus rapides (conditions 2, 3 et 4) ont induit un coût énergétique plus élevé lorsque la marche était pratiquée au sol en comparaison avec le tapis roulant (p<0,05). Les

auteurs proposent, pour expliquer cette différence, que l'énergie nécessaire pour élever le centre de masse est moindre sur le tapis roulant et que cette modification se traduit par un plus faible coût énergétique. Cependant, aucune donnée ne vient appuyer cette proposition.

Plus récemment, Parvatneni et collègues (44) ont publié les résultats d'une étude visant à déterminer d'éventuelles différences entre le sol et le tapis roulant pour déterminer le coût énergétique de la marche. Cinq hommes et 5 femmes sains ont participé à ce projet. Leur âge moyen était de 60,6 ans (+/- 7,4). Les mesures de consommation d'O<sub>2</sub> ont été effectuées avec un appareil portatif Cosmed K4b<sup>2</sup> (Cosmed, USA, Chicago). Le métabolisme de repos (position assise) était d'abord mesuré pendant 10 minutes. Ensuite, les sujets devaient marcher au sol dans un corridor à une vitesse spontanée jusqu'à ce qu'un état stable de la consommation d'O<sub>2</sub> soit observé. Une nouvelle mesure du métabolisme de repos (position assise) était ensuite effectuée avant de monter sur le tapis roulant à la vitesse moyenne maintenue durant l'essai au sol. La consommation d'O<sub>2</sub> retenue pour les analyses est celle qui a été enregistrée entre la sixième et la huitième minute du test. Il est à noter que des mesures biomécaniques (déplacements angulaires à la hanche, au genou et à la cheville – forces verticales de réaction au sol) ont aussi été effectuées durant ce protocole, et ce, autant au sol que sur le tapis. Les résultats de cette étude démontrent que le coût énergétique de la marche était plus élevé sur le tapis roulant (0,203 vs 0,165 ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>, p=0,005) sans pour autant que des modifications des variables biomécaniques soit significatives. Le phénomène de co-contraction musculaire est avancé pour expliquer cette situation. Par contre, il s'agit ici de spéculations puisqu'aucune mesure ne peut venir appuyer cette suggestion. À noter ici que les participants n'ont pas bénéficié d'une période de familiarisation sur le tapis roulant ce qui a peut-être été un facteur dans les résultats obtenus. Une séance minimale de 10 minutes est habituellement conseillée (45).

En regard des études présentées, il ne semble pas y avoir de consensus sur les impacts que peuvent avoir les modes d'évaluation (tapis ou sol) sur le coût énergétique de la marche. Des biais méthodologiques peuvent être à la base de ce phénomène : différences dans les appareils utilisés, familiarisation des sujets, sélection des vitesses prescrites, différences d'âge, etc. Il apparaît donc que des recherches sont nécessaires dans ce domaine afin de mieux répondre à la problématique. Une attention particulière devra être portée vers la standardisation des protocoles.

### Méthodes alternatives

Différents outils peuvent être utilisés pour quantifier la dépense énergétique d'un individu dans son environnement quotidien. Alors que les questionnaires sur la pratique d'activité physique peuvent représenter un moyen peu contraignant, il n'en demeure pas moins que cette démarche est empreinte d'une grande part de subjectivité (46). À l'autre opposé du spectre, la méthode de l'eau doublement marquée semble nettement plus objective mais offre peu d'information sur le contexte dans lequel les activités ont été pratiquées. De plus, l'accessibilité et le caractère invasif de la méthode en font un choix souvent limité à la recherche scientifique. En effet, cette méthode consiste à donner aux participants une eau marquée par des isotopes stables ( $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ ) et à estimer la production de  $\text{CO}_2$  à partir de la différence entre les taux d'élimination du  $\text{CO}_2$  et de l'eau métabolique. Cette méthode implique donc une analyse de fluides corporels (salive, sueur ou urine). La dépense énergétique est ensuite estimée en utilisant un équivalent énergétique approximatif du  $\text{CO}_2$  (46).

Par ailleurs, bien que la mesure de la consommation d' $\text{O}_2$  permette d'évaluer le coût énergétique d'une activité comme la marche, il n'en demeure pas moins que l'accessibilité à ces appareils de mesure dans le cadre d'un usage clinique n'est pas toujours possible. L'aspect financier est bien sûr à considérer mais il faut aussi penser à la convivialité des appareils. Ceux-ci demandent un entretien minutieux et la présence d'un technicien expérimenté pour en assurer le bon fonctionnement. De plus, les périodes de calibration (temps) et d'installation (aisance du sujet) qui précèdent le test ajoutent aux désagréments associés à l'utilisation des ces appareils. Enfin, pour des raisons de spécificité et de validité de l'évaluation, certains avanceront que le CE doit être évalué dans l'environnement habituel de l'individu. Quelques possibilités alternatives sont donc proposées.

#### *Utilisation de la fréquence cardiaque*

Considérant que la fréquence cardiaque (FC) et la consommation d' $\text{O}_2$  augmentent linéairement avec l'intensité de l'exercice (47, 48), il a été proposé que la FC peut être utilisée pour estimer la dépense énergétique d'une activité physique. Bien que l'accessibilité aux cardiofréquencemètres représente un avantage marqué de cette méthode, d'importantes limites ont été exposées dans un article de revue (48). D'abord, la relation linéaire  $\text{FC}/\dot{V}\text{O}_2$  à la base de ce concept n'est pas uniforme sur toute l'amplitude des intensités. Par exemple, lorsque l'effort est tout juste au dessus des valeurs de repos, il semble que la FC augmentera sans nécessairement observer d'élévation dans la consommation d' $\text{O}_2$ . De plus, il semble que la FC aura tendance à plafonner

légèrement avant l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène  $\dot{V}O_2\text{max}$  ce qui suggère que la FC n'est plus un bon témoin de l'intensité de l'exercice lorsque les puissances développées se rapprochent ou excèdent la puissance aérobie maximale (PAM). Dans la même perspective, il est rapporté que la relation  $FC/\dot{V}O_2$  est décalée dans un contexte d'efforts intermittents. En effet, un changement soudain de l'intensité de l'exercice implique une période d'ajustement de la FC pendant laquelle celle-ci témoigne de façon imprécise l'intensité de l'exercice. Ce constat s'applique autant dans la phase de transition entre le repos et l'activité que lors du retour au calme. Dans une perspective de suivi individuel, des écarts de l'ordre de -15 à 22% sont rapportés entre une estimation de la dépense énergétique à partir de la FC en comparaison avec la calorimétrie indirecte respiratoire (49).

Par ailleurs, des auteurs ont proposé le concept d'indice du coût physiologique (ICP) qui se base sur la FC pour estimer le coût énergétique d'une activité comme la marche (50). Cet indice est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\text{ICP (battements.m}^{-1}\text{)} = (\text{FC stable durant la marche} - \text{FC repos})/\text{vitesse (m.min}^{-1}\text{)}$$

Pour donner une valeur aux différentes variables de cette équation, il s'agit de mesurer d'abord la FC au repos puis de faire marcher le participant à sa vitesse de marche confortable spontanée. La distance parcourue et le temps pris pour franchir cette distance sont également mesurés afin de calculer la vitesse moyenne. Une fois la FC stabilisée, le test est terminé puis cette valeur de FC stable à l'exercice est enregistrée pour les analyses. Ce concept présente l'avantage d'être très simple à mettre en place dans un contexte clinique comme il nécessite peu de matériel. De plus, le temps de réalisation et d'analyse des résultats est bref ce qui permet d'évaluer un plus grand nombre de participants. Cependant, des auteurs ont tenté de vérifier la reproductibilité et la validité de cette approche. La méthode ICP a donc été comparée à une évaluation faite à partir de la consommation d' $O_2$ . Dans l'étude de Thomas (40), 42 enfants sains dont l'âge moyen était de 10,6 ans (+/- 3,2 ans) ont été testés en trois occasions à l'intérieur d'un mois. Après une période de repos de 10 minutes (FC de repos stable et métabolisme de repos), on demandait aux sujets de marcher à une vitesse de marche spontanée et confortable pendant 10 minutes pour enregistrer la consommation d' $O_2$  et la FC à l'effort. Les auteurs rapportent un coefficient de variation significativement plus faible pour le CEB lorsque comparé à l'ICP (9% vs 14%,  $p < 0,05$ ). Une absence de corrélation est aussi remarquée entre les valeurs de CEB et d'ICP ( $r = .12$ ,  $p = .45$ ). Des résultats

similaires sont rapportés par l'équipe de Graham (51) alors que cette fois les sujets évalués étaient des adultes sains (34,5 +/- 12,6 ans).

Ces données de la littérature scientifique semblent donc suggérer que ces approches, bien qu'elles soient accessibles, ne se positionnent pas de façon avantageuse lorsqu'elles sont comparées à la méthode de référence. L'application clinique de ces méthodes dans une perspective de suivi individuel est donc à reconsidérer.

#### *Accélérométrie*

Par ailleurs, il semble que l'accélérométrie représente une option très intéressante. Ces petits appareils pouvant facilement être fixés à la taille d'un individu permettent une mesure conviviale des accélérations et déccélérations du corps auquel l'appareil est fixé. Ces données, une fois analysées, renseignent quant à la quantité, la fréquence, l'intensité et la durée des activités physiques pratiquées (46). Plusieurs appareils sont disponibles sur le marché et se distinguent entre eux par rapport au nombre de dimensions du mouvement analysées (1D, 2D ou 3D) ainsi qu'en prenant en compte l'ajout de technologies supplémentaires (mesure de la température corporelle, de la fréquence cardiaque, etc.). Dans les dernières années, devant l'ajout de ces nouvelles technologies et considérant la pertinence de leur utilisation, la validité de ces appareils par rapport aux mesures étalon de calorimétrie indirecte respiratoire approximative a été étudiée. Alors qu'à la marche sur tapis roulant ces appareils qui mesurent la température corporelle et la fréquence cardiaque semblent surestimer le CE (52, 53), il apparaît que leur validité est remise en question pour apprécier le métabolisme de repos (54). Il semble donc que ces appareils, bien que jugés satisfaisants dans une perspective de validité (52, 55), sont associés à des différences significatives de mesures lorsque celles-ci sont comparées aux valeurs obtenues avec la calorimétrie indirecte respiratoire approximative. Par ailleurs, la sensibilité de ces appareils aux adaptations induites par une intervention reste à démontrer ce qui ajoute aux limites reliées à leur utilisation. Bien que ces appareils soient fort intéressants dans une perspective de quantification de la dépense énergétique globale au quotidien, il semble que la mesure de la consommation d'O<sub>2</sub> demeure la méthode privilégiée pour mesurer précisément le CE d'un individu.

### 1.2.2. Consommation maximale d'O<sub>2</sub>

#### Définition

La consommation maximale d'O<sub>2</sub> ( $\dot{V}O_{2max}$ ), exprimée en ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>, est définie comme étant la capacité maximale de transport et d'utilisation de l'O<sub>2</sub>, à partir de l'air ambiant jusqu'à la cellule, afin de contribuer à la respiration cellulaire durant une activité physique intense (56). En pratique, l'atteinte de la  $\dot{V}O_{2max}$  peut être vérifiée en observant un plateau dans la consommation d'O<sub>2</sub> malgré l'augmentation de la puissance de travail (56). En mesurant la  $\dot{V}O_{2max}$ , il est possible d'évaluer la puissance maximale de resynthèse aérobie de l'ATP (27). Ce composé chimique est la seule source d'énergie pouvant être immédiatement convertie en énergie mécanique et c'est grâce à sa resynthèse que l'exercice physique peut être maintenu au delà de quelques secondes.

#### Déterminants

L'équation de Fick démontre que la consommation d'O<sub>2</sub> est le produit du débit cardiaque ( $\dot{Q}_c$ ) et de la différence artério-veineuse en O<sub>2</sub> ( $a-\bar{v} O_2$ ) (23). À cet effet, la capacité de diffusion pulmonaire, le  $\dot{Q}_c$ , la capacité de transport de l'O<sub>2</sub> et les propriétés capillaires et mitochondriales du muscle représentent des facteurs susceptibles de déterminer la consommation d'O<sub>2</sub> (57).

#### Facteurs Centraux

Les limites de la capacité de diffusion pulmonaire ont été soulignées lors d'une expérimentation durant laquelle des athlètes ont été comparés à des sédentaires. Puisque les athlètes démontrent des  $\dot{Q}_c$  plus élevés (40 vs 25 L.min<sup>-1</sup>) et une diminution du temps de transit des globules rouges dans le lit capillaire pulmonaire, il semble que ceux-ci soient plus enclins à présenter une réduction marquée de la saturation en O<sub>2</sub> (58). Lorsque des athlètes sont exposés à un environnement hyperoxique (concentration en O<sub>2</sub> de 26%), leur  $\dot{V}O_{2max}$  est augmenté de près de 7% en parallèle à une augmentation de la saturation en O<sub>2</sub> de 6%. Aucun changement significatif n'est rapporté pour les individus sédentaires (59). Par ailleurs, l'utilisation de traitements beta-bloquant qui ont comme effet de réduire la fréquence cardiaque de l'ordre de 25 à 30% et le  $\dot{Q}_c$  de 15 à 20%, peuvent induire une diminution de la  $\dot{V}O_{2max}$  d'environ 5 à 15% et ce malgré une légère élévation de la  $a-\bar{v} O_2$  (60). Alors que la capacité de transport de l'O<sub>2</sub> peut être améliorée en augmentant le contenu sanguin en hémoglobine à la suite de réinjections de son propre sang, il apparaît que ces manipulations effectuées en double aveugle induisent des améliorations de la  $\dot{V}O_{2max}$  de 4 à 9% (61).

## Facteurs Périphériques

En périphérie, alors qu'une augmentation de la densité capillaire du muscle observée chez les sujets entraînés semble être plutôt associée à un maintien du temps de transit et de la  $a-\bar{v} O_2$  lorsque le débit sanguin est très élevé à l'exercice intense (62), il semble que l'augmentation de la densité mitochondriale permette une meilleure extraction de l' $O_2$  depuis le flux sanguin améliorant ainsi  $\dot{V}O_{2max}$  (63).

## $\dot{V}O_{2max}$ et vieillissement

L'analyse d'études longitudinales et transversales révèle que le vieillissement est marqué par une diminution de la  $\dot{V}O_{2max}$  d'environ 10% par décennie et ce, autant chez les femmes que chez les hommes (64). Ces changements peuvent être liés à la fois à des adaptations centrales et périphériques. En effet, il semble qu'une diminution du  $\dot{Q}c$  et de la  $a-\bar{v} O_2$  soit reliée à une réduction de la  $\dot{V}O_{2max}$  observée avec l'avancée en âge (64). Les résultats d'une étude transversale démontrent la contribution relative de chacun des paramètres à ce phénomène (65). Ainsi, 110 participants ont ainsi été séparés en fonction de leur âge (20 à 72 ans) et de leur niveau d'entraînement. Il est d'abord intéressant de constater que la diminution de la  $\dot{V}O_{2max}$  rapportée est de 7,1 et de 11,3% par décennie chez les gens actifs et chez les sédentaires, respectivement. Quoique non significatif statistiquement dans cet échantillon, l'écart observé suggère un effet protecteur de l'activité physique sur la  $\dot{V}O_{2max}$ . Le tableau II présente les résultats qui démontrent une importante contribution du  $\dot{Q}c$  à l'écart de la  $\dot{V}O_{2max}$  observé entre les aînés et les jeunes adultes (72 à 89%). Il est intéressant de constater que cette différence semble expliquée par une réduction du volume d'éjection systolique (VES) (56 à 74%) davantage que par une diminution de la fréquence cardiaque maximale (FCmax - 26 à 44%). En périphérie, la  $a-\bar{v} O_2$  explique de façon plus modérée la réduction de la  $\dot{V}O_{2max}$  associée à l'âge (11 à 29%). Il semble que le niveau de pratique d'activité physique soit associé à un profil légèrement différent en regard de la  $a-\bar{v} O_2$ . En effet, ces résultats démontrent que la contribution de cette qualité périphérique soit plus marquée chez les individus sédentaires (10 à 17%). Il est suggéré pour expliquer ce phénomène que le sédentarisme induit une réduction de la densité capillaire et du débit sanguin vers les muscles actifs. Enfin, lorsque rapportés en fonction de la masse maigre des individus, il apparaît que la  $\dot{V}O_{2max}$ , le  $\dot{Q}c$  et le volume d'éjection systolique demeurent inférieurs chez des aînés (24, 17 et 8%, respectivement) lorsque comparés à de jeunes adultes. Il semble donc que les modifications de la composition corporelle ne puissent pas expliquer en totalité l'altération de la  $\dot{V}O_{2max}$  associée au vieillissement.

	Hommes inactifs	Hommes actifs	Femmes inactives	Femmes actives
$\dot{Q}_c$				
% Âge*	-29.4	-22.2	-30.4	-27.1
% $\dot{V}O_2\text{max}^\#$	71.5	81.0	71.9	89.1
$a-\bar{v} O_2$				
% Âge*	-11.7	-5.2	-11.9	-3.3
% $\dot{V}O_2\text{max}^\#$	28.5	19.0	28.1	10.9

Tableau II – Contribution respective des principaux déterminants à la réduction de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  associée au vieillissement (65)

\* % de réduction entre les jeunes adultes et les aînés

# Contribution (%) à la diminution associée au vieillissement

Dans les événements sportifs de longue durée (courses de fonds et de demi-fond), la  $\dot{V}O_2\text{max}$  s'établit comme un facteur déterminant de la performance (66, 67). Alors que les valeurs de consommation d' $O_2$  au repos sont environ de 3,5 à 5 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>, une valeur maximale de 90,6 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> a récemment été mesurée pour un skieur de fond champion Olympique (68). C'est donc dire que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  de cet athlète représente environ 18 à 25 fois son métabolisme de repos (MET). Considérant la relation linéaire observée entre la puissance de travail et la consommation d' $O_2$  lors d'un test incrémenté visant à déterminer  $\dot{V}O_2\text{max}$  (27), il semble que l'athlète engagé dans des épreuves de longue distance a tout avantage à optimiser cette qualité de manière à favoriser le travail à des intensités absolues plus élevées lors des compétitions. Si la performance sportive peut toujours représenter un idéal chez la personne vieillissante (69), pour la majorité des gens, une bonne capacité cardiovasculaire permet surtout de contribuer au maintien de l'autonomie dans la mesure où les activités de la vie quotidienne sont ainsi associées à des intensités relatives plus faibles (64). D'ailleurs, une  $\dot{V}O_2\text{max}$  entre 10 et 18 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> représente un critère pouvant être utilisé afin de déterminer si un aîné peut être considéré comme étant fragile (70). Enfin, la pertinence de cette qualité est davantage soulignée puisque celle-ci est reconnue pour être un prédicteur indépendant du risque de mortalité (64). L'évaluation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  apparaît donc comme étant essentielle au bon suivi de l'état de santé de la personne vieillissante.

## Modalités d'évaluation

### Test d'effort maximal

La mesure de  $\dot{V}O_2\text{max}$  implique évidemment une calorimétrie indirecte respiratoire approximative dont les principes ont été énoncés dans une section précédente. Le protocole d'évaluation classique est dit incrémenté; c'est-à-dire que la puissance de travail augmente graduellement par paliers de durées constantes de façon à induire une augmentation parallèle de la



consommation d'O<sub>2</sub> (27). À cet effet, il est recommandé que la charge soit augmentée de 5 à 25 watts (W) par minute jusqu'à l'épuisement du participant (71). Le choix de l'incrément exact revient au clinicien qui doit se baser sur le niveau du participant pour mettre en place un test qui s'échelonne entre 8 et 12 minutes (71). Théoriquement, le test est complété et l'atteinte de  $\dot{V}O_{2max}$  confirmée lorsqu'on observe un plateau dans la consommation d'O<sub>2</sub> malgré l'augmentation de la puissance de travail (<2.1 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>). Comme ce critère est rarement atteint, des critères secondaires peuvent être utilisés afin de valider la mesure effectuée; on fait alors plutôt référence à  $\dot{V}O_{2pic}$  (72). Malgré que la pertinence de ces critères ait été remise en question et qu'un protocole de vérification à intensité supra-maximale ait été proposé (72), il n'en demeure pas moins, qu'en l'absence du plateau dans la consommation d'O<sub>2</sub>, l'observation de l'épuisement du sujet et d'un QR supérieur à 1 peuvent rassurer quant à l'atteinte d'un véritable effort maximal par le participant aîné tout en maintenant une certaine convivialité dans l'épreuve (23, 73).

Par ailleurs, dans une perspective de prescription individualisée des intensités d'entraînement, il peut être intéressant de se référer aux puissances de travail développées durant le test incrémenté plutôt qu'à la valeur précise de  $\dot{V}O_{2max}$  ou de  $\dot{V}O_{2pic}$  (74). Considérant la relation linéaire observée entre la puissance de travail et la consommation d'O<sub>2</sub> (75), les concepts de vitesse aérobie maximale (VAM) et de puissance aérobie maximale (PAM) représentent respectivement la plus petite vitesse et la plus petite puissance induisant  $\dot{V}O_{2max}$  lors d'un test incrémenté (74, 76). Ainsi, le clinicien peut utiliser ces variables afin de prescrire des entraînements qui induiront des adaptations ciblées en fonction des capacités propres à chaque individu (74). Bien que la détermination de la VAM et de la PAM est dépendante du protocole de test utilisé (77), il n'en demeure pas moins que ces indices représentent, particulièrement en raison de l'intégration des concepts de coût énergétique de la locomotion et de rendement mécanique de l'individu (67), des variables de performance pertinentes dans un contexte de suivi longitudinal; à la condition de reproduire le plus fidèlement possible les conditions de test. À cet égard, les paramètres de reproductibilité de la mesure de  $\dot{V}O_{2max}$  sont favorables (CV de 5 à 8% et ICC de 0.88 à 0.92) (71, 78, 79) tout comme ceux rapportés pour la VAM et la PAM (CV de 1 à 4%) (74). D'ailleurs, le choix de l'ergomètre utilisé durant le test est déterminant dans la mesure de la  $\dot{V}O_{2max}$ . En effet, lorsque comparées aux mesures effectuées sur tapis roulant, les mesures sur ergocycle sont souvent 10 à 15% inférieures (23). La puissance des membres inférieures ainsi que que les habiletés techniques en

cyclisme peuvent être évoquées pour expliquer cette différence entre les deux modes d'évaluation (23).

Considérant qu'un ratio de 2 à 5 morts subites par 100000 mesures de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  lors de tests incrémentés a récemment été rapporté (71), il apparaît que des précautions doivent être prises pour s'assurer de la sécurité des patients dans un contexte d'effort physique maximal. Bien que le risque de complications est plutôt faible et varie selon la condition initiale du participant, la supervision d'un médecin est nécessaire durant ce type d'épreuve pour les hommes de plus de 45 ans et les femmes de plus de 55 ans. Le suivi de l'électrocardiogramme est également conseillé pendant l'épreuve ainsi que durant la période de récupération (71).

### Test d'effort sous-maximal

Pour différentes raisons (non-disponibilité de l'équipe médicale, condition médicale particulière, accumulation de facteurs de risques associés à un effort maximal), il peut être conseillé d'effectuer une estimation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  à partir d'un test d'effort sous-maximal. De nombreuses possibilités sont offertes mais il est important de bien comprendre les enjeux reliés à chacune d'elles. Par exemple, le test de marche de Rockport consiste à marcher le plus rapidement possible la distance de 1609 mètres. À partir du temps mis pour franchir cette distance, de la fréquence cardiaque post exercice, de l'âge, du sexe et de la masse du participant, il est possible d'estimer la  $\dot{V}O_2\text{max}$  d'un individu. Ce test a été validé sur une population de 169 adultes âgés de 30 à 69 ans (80). Les valeurs de consommation maximale d'oxygène mesurées et estimées sont fortement corrélées ( $r=0,92$ ). Une version pour tapis roulant a également été proposée (81). Cependant, une attention particulière doit être portée à l'interprétation des résultats surtout dans un contexte de suivi pré et post intervention. La démonstration qu'une amélioration de la performance dans ce type de test est nécessairement accompagnée d'une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  reste à effectuer. Bien qu'une diminution de la FC mesurée à la fin de l'épreuve peut représenter une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  (47, 82), il est aussi possible que des gains en force des membres inférieurs et/ou une amélioration du CE, par exemple, soient suffisants pour induire de meilleures performances au test de Rockport. Dans cette perspective, une meilleure compréhension des facteurs de performance de cette épreuve est à souhaiter.

Par ailleurs, lors d'un test à intensité incrémentée, on observe une augmentation linéaire de la fréquence cardiaque. À partir de ce protocole, plutôt que d'encourager le participant à maintenir l'effort jusqu'à l'épuisement, l'expérimentateur peut arrêter le test lorsque la fréquence cardiaque du

sujet atteint une valeur de 85% de la fréquence cardiaque maximale prédite (83, 84). Une extrapolation de la relation fréquence cardiaque – puissance permet ainsi de prédire la  $\dot{V}O_2$ max de même que les charges de travail associées (puissance en watts sur le vélo ou vitesse et inclinaison sur le tapis roulant). D'autres tests d'effort sous-maximal sont proposés et offrent aux cliniciens plusieurs options afin d'adapter le protocole aux besoins particuliers de l'individu. Des versions sur tapis roulant (85, 86) et sur ergocycle (87) sont ainsi disponibles mais, alors que la prédiction de la  $\dot{V}O_2$ max demeure intéressante, celle-ci ne permet pas une prescription précise de l'entraînement. Par ailleurs, la sensibilité de ces tests aux adaptations induites par une intervention reste à démontrer ce qui remet en question leur utilisation dans le contexte de suivi à long terme d'un individu.

Enfin, il a été récemment proposé d'estimer la  $\dot{V}O_2$ max à partir d'une simple équation basée sur l'âge, le sexe, l'indice de masse corporelle, la fréquence cardiaque de repos et le score obtenu à un questionnaire sur la pratique d'activités physiques au quotidien (88). Bien que cette démarche présente un intérêt dans le contexte d'une étude transversale impliquant une grande cohorte de sujets en favorisant la convivialité, il n'en demeure pas moins que cette approche devient encore une fois plutôt limitée dans le contexte du suivi des adaptations à long terme; la sensibilité de cette équation aux changements physiologiques n'ayant pas été vérifiée.

### 1.2.3. Qualités neuromusculaires

#### Définition

La force peut être définie comme étant la qualité physique qui permet à l'homme de vaincre ou de maintenir une résistance à l'aide de la contraction musculaire. Qualitativement, cette force peut s'exprimer de différentes façons et ainsi justifier une évaluation spécifique à chacune des modalités de production de force; ce qui peut générer une certaine confusion quant aux définitions proposées (89). Cependant, il est généralement admis que la force maximale, la force endurance, la force-vitesse et la force explosive représentent les qualités les plus pertinentes dans une perspective de maintien des capacités fonctionnelles durant le vieillissement (90). De plus, malgré qu'elle représente une qualité souvent oubliée dans les revues de question classiques, la constance de développement de la force apparaît comme étant une qualité fort pertinente dans la perspective d'un vieillissement sain (91).

Alors que la force maximale est définie comme étant la force la plus élevée que le système neuromusculaire est en mesure de produire lors d'une contraction maximale volontaire, la force

endurance représente plutôt la capacité de maintenir le plus longtemps possible ou sur un grand nombre de répétitions d'un mouvement spécifique un pourcentage élevé de cette force maximale (92). Par ailleurs la force-vitesse représente la capacité de vaincre par une contraction très rapide une résistance de manière à produire la puissance la plus élevée (92). Quant à la force explosive, celle-ci est déterminée par la capacité du système neuromusculaire de produire un taux de croissance de force le plus élevé possible à partir de l'initiation de la contraction musculaire (93). Enfin, la constance de développement de la force fait référence au contrôle du mouvement mesuré par les fluctuations de force lors d'un effort sous-maximal (91).

### Déterminants

Brièvement, la contraction musculaire peut être décrite comme une cascade d'événements à partir de la planification du mouvement jusqu'à son exécution. L'activation du cortex moteur et des voies corticospinales entraîne le déclenchement d'un potentiel d'action (influx nerveux) qui se propage tout au long du SNC de façon privilégiée grâce entre autres à la myélinisation de l'axone et de la conduction saltatoire rendue ainsi possible. Les motoneurones alpha dont le noyau se retrouve dans la moelle épinière sont responsables de l'innervation des fibres musculaires. L'unité motrice est ainsi composée de l'ensemble des fibres musculaires innervées par un motoneurone alpha. À la jonction neuromusculaire, l'arrivée du potentiel d'action provoque le relâchement du neurotransmetteur acétylcholine qui va se lier aux récepteurs nicotiques situés sur la plaque motrice associée à la membrane de la fibre musculaire. C'est ainsi le début du phénomène de couplage excitation/contraction qui correspond physiologiquement à la conversion de l'influx nerveux en potentiel d'action musculaire qui mènera ultimement à la contraction de la fibre musculaire (94). La liaison entre l'acétylcholine et les récepteurs nicotiques entraîne donc un potentiel d'action qui se propage le long du sarcolemme et intègre la fibre musculaire en profondeur via le tubule transverse activant ainsi les récepteurs à la dihydropyridine et à la ryanodine dont le rôle est de permettre le relâchement du calcium depuis le réticulum sarcoplasmique vers les myofilaments d'actine et de myosine. Le calcium peut alors se fixer à la troponine, protéine des filaments fins d'actine, et permettre les interactions avec les têtes de myosine. En glissant l'un sur l'autre, les filaments d'actine et myosine entraînent donc la contraction musculaire dont la force dépend du nombre de ponts formés entre ces filaments (24). Les propriétés de la contraction varient en fonction du type de fibre musculaire sollicitée. En effet, 3 types de fibres musculaires sont reconnus et leurs caractéristiques structurelles et fonctionnelles déterminent qualitativement la contraction musculaire résultant de

leur stimulation. Brièvement, les fibres de type 1 sont associées structurellement à un diamètre plus petit et à une densité capillaire et mitochondriale plus élevée que les fibres de type 2a et 2b. Fonctionnellement, ces fibres à contraction lente se retrouvent de façon typique dans les muscles posturaux et sont associées aux efforts en endurance pour lesquels la résistance à la fatigue est importante. Les fibres de type 2 (a et b) à contraction rapide sont associées aux efforts plus brefs nécessitant davantage de puissance (94). Par ailleurs, le principe de la taille énoncé par Henneman propose que les fibres musculaires soient recrutées dans un ordre bien précis en fonction de la force à développer pour réaliser le mouvement. Ainsi, les unités motrices associées aux fibres de type 1 sont recrutées en premier lieu avant de faire appel aux unités motrices associées aux fibres de type 2 (a et b) pour des actions impliquant davantage de force et de puissance (95).

La contraction musculaire et la production de force qui en résulte est donc déterminée par des facteurs centraux (SNC) et périphériques (l'appareil contractile) (96). Dans une revue de la littérature concernant le rôle des facteurs centraux sur la fatigue musculaire, le muscle était comparé à un moteur qui est mis en marche par le système nerveux central; l'action du muscle étant ajustée en fonction d'un système complexe de rétroactions mettant en jeu les afférences musculaires qui viennent renseigner, à différents niveaux du SNC, quant à l'état du muscle à l'effort (97). Ces afférences proviennent principalement des organes tendineux de Golgi et des fuseaux neuromusculaires. Alors que ces fuseaux disposés en parallèle aux fibres musculaires offrent au SNC des afférences principalement reliées au degré d'étirement du muscle, les afférences quant aux forces impliquées dans le mouvement sont obtenues grâce aux organes tendineux de Golgi composés de tissu conjonctif situés dans le tendon (94).

#### Facteurs centraux

L'étude des adaptations à l'entraînement en résistance est un modèle qui permet d'apprécier particulièrement la contribution de facteurs centraux à la production de force. En effet, il a été suggéré que les adaptations initiales à l'entraînement en résistance étaient davantage associées au système nerveux central qu'à une augmentation de la masse musculaire (98). À cet égard, il semble que l'augmentation de l'amplitude du signal obtenu à l'aide de l'électromyographie de surface (EMGS) survienne bien avant les augmentations de la surface de section transversale du muscle (99). Le signal de l'EMGS est révélateur de la somme des potentiels d'action générés dans les fibres musculaires associées à la région où sont positionnées les électrodes. Ce signal est le témoin des phénomènes complexes d'activation et de fréquence de stimulation des unités motrices (100). Plus

précisément, l'onde M représente la dépolarisation des motoneurons qui innervent les fibres musculaires (101). Dans cette perspective, il est suggéré qu'une activation plus complète des unités motrices (plus spécifiquement un recrutement plus rapide des unités motrices à seuil d'activation élevé - fibres de type 2) représente un des mécanismes par lesquels il est possible de développer davantage de force à la suite de l'entraînement (96, 98, 102). En effet, il semble qu'à l'aide de la technique de la secousse musculaire intercalée (*interpolated twitch technique*) qui consiste à imposer une stimulation supramaximale au motoneuron durant une contraction maximale volontaire du muscle, il est possible d'observer des augmentations de force de l'ordre de 2 à 5 % ce qui suggère une activation incomplète lors de la contraction maximale volontaire (103).

Par ailleurs, une augmentation de la fréquence de stimulation (50 à 100 hertz) ainsi qu'une synchronisation accrue des unités motrices sont associées à des taux de croissance de force plus élevés (96, 102). La synchronisation des unités motrices fait référence à la capacité de recruter simultanément plusieurs unités motrices plus fréquemment que ce qui pourrait être attendu lors d'un processus totalement aléatoire (102).

De plus, une meilleure coordination des muscles agonistes et antagonistes peut aussi être observée à la suite de l'entraînement en résistance. Alors que la co-contraction peut permettre une meilleure stabilité durant l'apprentissage de nouvelles tâches impliquant des résistances élevées, lors d'actions impliquant vitesse et précision et durant des mouvements ballistiques, il n'en demeure pas moins que la réduction des co-contractions permet une meilleure activation des muscles agonistes ainsi qu'une plus grande production de force dans la direction désirée (96). À cet égard, il semble que l'entraînement en résistance permette une diminution de l'inhibition, entre autres celle associée aux cellules de Renshaw (100), ce qui permettrait une meilleure activation des muscles agonistes (98).

Enfin, d'autres évidences du rôle du SNC dans les gains en force observés émanent du concept d'éducation du membre opposé (traduction libre du *cross education effect*) (104). En effet, il a été rapporté que l'entraînement d'un membre améliore la force du segment controlatéral et il apparaît que ce phénomène est observé autant pour le membre inférieur que pour le membre supérieur. Il est intéressant de constater que les gains en force du membre non entraîné sont de l'ordre de 15 à 25% après des interventions de 8 semaines à 4 mois (89). Comme ces gains en force du membre non-entraîné surviennent en l'absence de modifications de l'activité enzymatique et de la surface de section transverse du muscle, il est suggéré que des facteurs centraux sont en cause (89,

104). Alors que les mécanismes d'adaptation ne sont pas bien établis, il est possible que l'apprentissage des séquences d'activation inter musculaires (coordination) en début d'entraînement puisse être appliqué au membre non-entraîné (97). Comme le muscle agoniste est accompagné dans son action des muscles stabilisateurs et synergiques qui contribuent entre autres à l'équilibre postural, il a été suggéré que le phénomène d'éducation du membre opposé pouvait, en partie du moins, être expliqué par une contribution de ces muscles posturaux lors de l'entraînement du membre principal qui serait ensuite transférée au membre controlatéral. Cependant, il apparaît que l'activité EMGS de ces muscles synergiques est trop faible durant l'entraînement pour expliquer d'éventuels gains en force pour le membre non-entraîné (89). Il semble donc évident que de plus amples recherches sont nécessaires pour identifier les mécanismes responsables de ce phénomène pouvant avoir des répercussions dans plusieurs secteurs (réadaptation, vieillissement, etc.).

### Facteurs périphériques

Un déterminant périphérique important dans la production de force est la surface de section transverse du muscle (96). Tel que mentionné dans la section précédente, il est traditionnellement rapporté que le phénomène d'hypertrophie du muscle est associé à des adaptations plus tardives en comparaison avec les facteurs centraux. Il n'en demeure pas moins que l'augmentation de la surface de section transverse s'effectue de façon linéaire lors d'un plan entraînement en force sans qu'il n'y ait de signe de plafonnement après 6 mois d'intervention (105). Ce phénomène d'hypertrophie démontre donc une certaine plasticité du muscle soumis à une surcharge fonctionnelle; plasticité pouvant aussi être appréciée à la suite d'entraînements dont les qualités de volume, d'intensité et de vitesse d'exécution peuvent induire une modification de la typologie musculaire. S'il est assez bien admis que l'entraînement en résistance (intensité élevée, volume réduit, vitesse rapide d'exécution des mouvements) favorise l'expression des fibres de type 2a au détriment des fibres de type 2b, il semble que l'entraînement en endurance (grand volume, intensité faible et vitesse des mouvements réduite) favorise plutôt l'expression des fibres de type 1 (106-108). Par ailleurs, bien qu'il soit évident que toutes les fibres peuvent être hypertrophiées, il semble que les fibres de type 2 sont davantage sensibles à ce phénomène alors qu'on rapporte une capacité de croissance supérieure de la surface de section transverse d'environ 50% par rapport aux fibres de type 1 (109). Quant aux mécanismes qui déterminent l'hypertrophie du muscle, il semble que le stress mécanique induit par l'entraînement en résistance provoque une cascade d'événements moléculaires et cellulaires qui, à terme, favorisent la synthèse au détriment de la dégradation protéique (110). Par ailleurs, il est

également suggéré que l'entraînement en résistance induit des réactions métaboliques passant de l'accumulation de métabolites (phosphate inorganique, protons  $H^+$ , calcium) à une réponse hormonale accrue et à l'hypoxie du muscle qui pourraient servir d'intermédiaires au phénomène d'hypertrophie (110). Cependant, il devient difficile de distinguer avec justesse la relation de cause à effet entre le stress mécanique imposé par la résistance appliquée à l'entraînement, la réponse métabolique induite et l'adaptation de la surface de section transversale du muscle considérant la simultanéité des événements mécaniques et métaboliques (110). Par ailleurs, de récentes études remettent en question le rôle de la réponse hormonale en relation avec l'hypertrophie du muscle. Alors que la testostérone et la famille des hormones de croissance ont traditionnellement été identifiées comme étant des molécules primordiales pour induire une hypertrophie en réponse à l'entraînement en résistance (111, 112), il a été plutôt suggéré que ce rôle était probablement surévalué. En effet, la synthèse protéique semble indépendante des niveaux de testostérone et d'hormones de croissance observés tant à la suite d'exercices en résistance ponctuels (113, 114) qu'après un programme de 16 semaines d'entraînement (115). Il apparaît par ailleurs que, plutôt que l'intensité absolue lors des exercices en résistance, le facteur mécanique déterminant de l'hypertrophie du muscle est d'atteindre l'échec du mouvement, c'est-à-dire l'incapacité de poursuivre l'exercice en raison de la fatigue. À cet effet, il a été démontré que des entraînements à basse intensité (30% force maximale) étaient plus efficaces que des séances à haute intensité (80 à 90% force maximale) pour induire une synthèse protéique aïgue (116) et tout aussi efficace à long terme (après 10 semaines d'entraînement à raison de 3 séances par semaine) (117) à condition que l'entraînement à basse intensité mène à l'échec du mouvement. Une des hypothèses à la base de ce phénomène est relié au principe de la taille de Henneman. Il est ici avancé qu'un maximum d'unités motrices seront sollicitées non pas seulement parce que l'intensité est élevée mais aussi parce qu'au fil des nombreuses répétitions caractéristiques des efforts à basse intensité, la fatigue s'installe et de nouvelles unités motrices sont mises à contribution jusqu'à l'échec du mouvement ce qui correspond à un moment où la quasi-totalité des unités motrices sont recrutées (118).

Si l'hypertrophie du muscle semble reliée à un meilleur rapport synthèse/dégradation protéique à la suite d'un entraînement en résistance, il apparaît que ce type d'effort induise aussi une activation des cellules satellites du muscle (119). Ces cellules sont considérées comme étant les cellules couchées du muscle et possèdent donc, lorsqu'elles sont activées depuis la périphérie de la fibre musculaire, la propriété de se diviser pour réintégrer la fibre et ainsi offrir de nouveaux noyaux



cellulaires à la fibre ou de retourner en plus grand nombre en périphérie de celle-ci en prévision d'une prochaine activation. Une fois active dans la fibre musculaire, cette nouvelle entité induit une série d'événements biochimiques qui mènent ultimement à une synthèse protéique qui favorise l'augmentation de la surface de section transversale de chaque fibre (119). Alors que ce phénomène est associé à la croissance normale d'un jeune individu, il est maintenant bien établi qu'il contribue également à l'hypertrophie du muscle à la suite d'un entraînement en résistance chez l'adulte (96).

En plus des ces éléments reliés directement à la surface de section transversale du muscle, des facteurs architecturaux contribuent à la production de force et de puissance par le muscle. D'abord, la longueur des faisceaux musculaires est associée à la production de puissance considérant que de longs faisceaux sont en mesure de générer davantage de vitesse (102). Par ailleurs, l'angle de pennation du muscle qui décrit l'orientation des faisceaux musculaires en relation avec la ligne d'action du muscle (ligne joignant les centres des surfaces d'origine et d'insertion des muscles), semble optimal à environ 45 degrés; suggérant que cette position propose le meilleur agencement entre les composantes contractiles du muscle et son tendon (102). De plus, des facteurs mécaniques sont à considérer. La relation force/vitesse décrit une diminution de la force produite lorsque la vitesse d'exécution du mouvement augmente. Cette observation s'explique par une diminution du nombre de liens entre les filaments d'actine et de myosine quand la vitesse du mouvement augmente; les cycles d'attachement et de détachement nécessitant une certaine durée (102). Il faut aussi considérer la relation tension longueur qui stipule que la production de force est maximale lorsque le chevauchement, entre ces filaments d'actine et de myosine, est optimal. Un étirement ou un raccourcissement du muscle au-delà de cette zone optimale se traduit par une diminution de force (102). Par ailleurs, tel que décrit par le modèle classique de Hill (120), le système musculo-tendineux contribue, avec les composantes en parallèle (tissu conjonctif) et les composantes contractiles (ponts actine/myosine), au cycle étirement/raccourcissement. Ce cycle est décrit comme étant l'enchaînement très rapide des phases excentrique et concentrique du mouvement qui favorise un développement de force et de puissance plus important que lors d'une simple contraction concentrique. Ce phénomène est expliqué, entre autres, par la capacité de ce système à restituer l'énergie élastique emmagasinée lors de la phase excentrique (121). Par ailleurs, le système musculo-tendineux est aussi impliqué dans la protection du muscle en diminuant les forces impliquées sur les faisceaux musculaires lors certains mouvements nécessitant de rapides décélération (122).

## Qualités neuromusculaires et vieillissement

Le phénomène de dynapénie est défini comme étant la diminution de la production de force musculaire associée au vieillissement (17). Les qualités de force-vitesse semblent davantage altérée par l'avancée en âge en comparaison avec les performances en force maximale. Lorsque les performances de 50 hommes et de 50 femmes âgés de 65 à 89 ans ont été analysées dans une étude transversale, la force maximale était réduite de 1 à 2% par année alors que ces valeurs atteignaient 3 à 4% pour les qualités de force-vitesse (123). Plus récemment, la performance de 188 femmes et 127 hommes dont l'âge variait de 18 à 81 ans a été comparée dans le cadre d'une autre étude transversale (124). Les résultats démontrent une diminution relative de 8% par décennie de la puissance maximale développée dans une tâche de saut en contre mouvement effectué sur plateforme de force. Les auteurs rapportent que la force développée à la puissance maximale décline de 0.04 et de 0.07 N.kg<sup>-1</sup> par année, chez les femmes et chez les hommes respectivement. Quant à la vitesse développée à la puissance maximale, celle-ci est réduite de 0.01 et 0.02 m.sec<sup>-1</sup> par année, toujours chez les femmes et chez les hommes respectivement. Il est intéressant de constater que ces réductions des qualités de force-vitesse étaient fortement expliquées par l'avancée en âge (68 à 74% de r<sup>2</sup>). Par ailleurs, les qualités de force explosive étaient quant à elle réduites de 0.79 et de 0.88 Nm.sec<sup>-1</sup> par année, chez les femmes et les hommes respectivement alors qu'environ 20% de ce déclin est expliqué par le vieillissement lui-même. Cette dernière étude suggère que le déclin est davantage marqué (50%) chez les hommes que chez les femmes pour les qualités de force-vitesse (W/kg/année). Curieusement, les auteurs rapportent que la masse maigre tend à diminuer plus rapidement chez les femmes, ce qui suggère que l'altération de qualités neuromusculaires et tendineuses est plus prononcée chez les hommes (124). Enfin, des rapports révèlent que la constance de développement de la force est réduite chez les aînés ce qui peut avoir des répercussions fonctionnelles, entre autres lorsqu'il est question de motricité fine (125).

Les mécanismes à la base du déclin des qualités neuromusculaires observé chez la personne vieillissante sont nombreux. Si la sarcopénie, définie comme étant la diminution de la masse musculaire associée au vieillissement, a longtemps été identifiée comme étant étroitement associée aux réductions de force, il apparaît assez clairement aujourd'hui que la dynapénie est plutôt causée par un ensemble de facteurs tant centraux que périphériques (17). À cet égard, il a été récemment démontré que les diminutions de masse musculaire et de surface de section transverse des extenseurs de la jambe n'expliquent que 6 à 8% des changements de force des quadriceps (126).

Parmi les facteurs centraux susceptibles d'altérer la production de force et de puissance avec l'avancée en âge, il apparaît que des atteintes aux voies supérieures du système nerveux central doivent être considérées. Entre autres, des altérations anatomiques du cortex prémoteur ainsi qu'une diminution de l'intégrité de la matière blanche sont associées à l'avancée en âge. Par ailleurs, des modifications cellulaires et biochimiques altèrent également différents neurotransmetteurs (dopamine, sérotonine, acide glutamique). Ensemble ces éléments sont susceptibles de réduire la performance motrice, possiblement via une moins grande excitabilité des voies corticospinales (17). De plus, il apparaît que le vieillissement est marqué par une diminution du nombre de motoneurones (apoptose) ce qui induit une dénervation de certaines fibres musculaires, affectant particulièrement les fibres de type 2 (17, 127). Dans une étude qui rapporte les résultats obtenus par trois groupes d'hommes séparés en fonction de leur âge (jeunes adultes: 23 à 32 ans, adultes âgés: 61 à 69 ans, aînés: 80 à 89 ans), il est rapporté que le nombre estimé d'unités motrices diminuait progressivement en fonction de l'âge dans le muscle tibial antérieur (jeunes adultes: 150 +/- 43, adultes âgés: 91 +/- 22, aînés: 59 +/- 15) alors que la diminution de force lors d'une contraction maximale volontaire demeurait stable sauf pour les aînés (jeunes adultes: 42.6 +/- 6.0, adultes âgés: 42.6 +/- 7.7, aînés: 29.5 +/- 7.4 Nm) (128). Une hypothèse alors émise, pour expliquer ce maintien de la force dans le groupe d'aînés malgré la baisse du nombre de unités motrices, propose que certaines de ces fibres ayant subi une dénervation se retrouvent innervées par des motoneurones actives environnantes pouvant ainsi combler durant un certain temps une partie de la charge de travail supplémentaire induite par le phénomène initial de dénervation (17, 127, 128). De plus, le vieillissement est marqué par une diminution de l'activation et de la fréquence de stimulation des unités motrices (17) résultant entre autres de l'altération des propriétés conductrices de la myéline et de lésions axonales; particulièrement dans la région lombaire ce qui suggère que les membres inférieurs sont davantage susceptibles d'être affectés par ce phénomène (127, 129). À cet égard, dans une récente étude impliquant 92 participants divisés en deux groupes (jeunes; n=46, 18 à 32 ans et aînés; n=46, 64 à 84 ans), il a été démontré que l'activation centrale, définie comme étant le ratio entre la force maximale volontaire et la force mesurée lorsqu'une stimulation supramaximale est ajoutée à l'effort volontaire (secousse musculaire intercalée), était significativement réduite chez les aînés (87% vs. 98%) lors d'un effort des extenseurs de la jambe (130) ce qui suggère une moins grande capacité d'activation des unités motrices disponibles.

En plus des altérations centrales observées lors du vieillissement, il apparaît que le couplage excitation/contraction est lui aussi affecté par l'avancée en âge. En effet, il semble que le vieillissement soit caractérisé par une diminution du nombre de récepteurs à la dihydropyridine ce qui entraîne un déséquilibre entre ces récepteurs et ceux à la ryanodine induisant ainsi une réduction du relâchement de calcium par le réticulum sarcoplasmique en réponse au potentiel d'action, une baisse de la concentration en calcium vers les myofilaments et, au final, une diminution de la force contractile (17). Par ailleurs, il apparaît qu'une réduction du niveau de pratique d'activités physiques de même que l'altération des facteurs centraux (baisse du nombre d'unités motrices et diminution de l'activation) peuvent expliquer la diminution progressive de la masse musculaire (129) dont les déterminants sont le nombre de fibres musculaires et leur surface de section transversale (131). À cet effet, il est proposé que les fibres de type 2, qui se retrouvent agencées à des unités motrices de type 1 à la suite du phénomène de dénervation, s'adapteraient en fonction des propriétés de la nouvelle unité motrice (127). Le résultat net à la suite de cette réorganisation des unités motrices serait donc une conversion des fibres de type 2 vers des fibres de type 1 (127). Cependant, cette hypothèse tend à être invalidée par de récents résultats qui suggèrent plutôt que la diminution de masse musculaire associée au vieillissement est expliquée de façon exclusive par une réduction de la surface de section transversale des fibres de type 2 sans toutefois observer une diminution de leur nombre (131). Il est d'ailleurs intéressant de constater que cette atrophie ne semble pas être aussi significative pour les fibres de type 1 (131, 132). Parmi les autres mécanismes périphériques considérables, l'infiltration de tissu adipeux inter (entre les groupes musculaires) et intra (entre les faisceaux musculaires) musculaire contribue à la dynapénie en réduisant le ratio force/unité tissulaire (17). De plus, dans une étude très récente regroupant 13 enfants (moins de 18 ans) et 152 adultes de sexe masculin dont l'âge variait de 18 à 86 ans, on rapportait que l'atrophie préférentielle des fibres de type 2 par rapport aux fibres de type 1 était associée à une diminution du contenu en cellules satellites ce qui tend à confirmer une moins grande possibilité régénératrice associée au vieillissement (132). Enfin, des modifications à l'architecture du muscle (diminution de l'angle de pennation de plus de 13%) de même qu'une augmentation de la compliance des tendons ont été associées, respectivement, à une diminution de la production de force (133) et de la force explosive (taux de croissance de force) (127).

Bien que les qualités neuromusculaires sont déterminantes dans le geste sportif et la performance athlétique, il n'en demeure pas moins que ces qualités sont aussi associées à la mobilité, l'autonomie et la qualité de vie dans les activités quotidiennes. L'adoption d'un mode de vie sain et

actif passe donc inévitablement par des activités favorisant le maintien de la force. En effet, il a été démontré que les qualités de force maximale, de force-vitesse et de force endurance sont déterminantes pour l'exécution de tâches fonctionnelles (90); principalement celles impliquant les membres inférieurs (134). Par exemple, la capacité de se lever d'une chaise, de marcher plus rapidement et de maintenir son équilibre est associée à de meilleures qualités neuromusculaires (90, 135-138). De plus, il est suggéré que les qualités de force-vitesse et de force explosive sont particulièrement mises à contribution dans un contexte de tâches réactives telles que des manœuvres pour éviter une chute (124, 139, 140). Par ailleurs, l'enchaînement de cycles étirement/raccourcissement détermine les activités de locomotion de la vie quotidienne telles que la marche et la montée d'escaliers (4, 124). Il semble donc évident que l'évaluation de ces paramètres neuromusculaires est essentielle dans le suivi à long terme de la personne vieillissante; surtout dans une perspective de maintien de la mobilité, de l'autonomie et de la qualité de vie.

### Modalités d'évaluation

Différentes modalités d'évaluation de la force fonctionnelle peuvent être mises en place. Ainsi, on distingue la dynamométrie isométrique, isocinétique et inertielle.

#### Force isométrique

Le dynamomètre isométrique signifie que la force est développée par le sujet contre un objet sans qu'il n'y ait de mouvement et donc de modification dans l'angle articulaire impliqué (141). Cette modalité d'évaluation très sécuritaire permet l'appréciation, non seulement de la force maximale mais aussi des taux de croissance de la force, c'est-à-dire de la force explosive. Lors d'un effort maximal, il est ainsi possible d'apprécier le temps (en ms) qui sépare le début de la contraction de l'atteinte de la force maximale (93). Afin d'optimiser les performances, la consigne donnée au sujet doit mentionner que la contraction doit être exécutée afin de produire une force maximale le plus rapidement possible (141). De plus, le mode isométrique permet d'apprécier la constance de développement de la force lors d'une contraction sous-maximale volontaire. Typiquement, il est demandé au sujet de maintenir un niveau de force assez faible alors qu'une rétroaction visuelle est disponible en tout temps pour que le participant puisse ajuster la contraction en fonction du niveau attendu (91).

En plus des instructions données au participant, il est reconnu que la standardisation de l'angle de contraction, de la position globale du participant et du nombre d'essais est primordiale afin

de favoriser une reproductibilité optimale qui est d'ailleurs considérée élevée (0.85 à 0.99) pour cette modalité d'évaluation (141). Enfin, dans une perspective de suivi longitudinal, il est important de considérer la sensibilité de la mesure isométrique aux éventuelles adaptations induites par un entraînement des qualités neuromusculaires. À cet égard, il est mentionné que la mesure isométrique est plutôt sensible aux entraînements impliquant des mouvements lents avec résistances élevées mais beaucoup moins aux efforts davantage axés sur le développement de vitesse et de puissance (142). Par ailleurs, la spécificité du geste semble représenter dans cette perspective un enjeu primordial. En effet, il a été rapporté qu'un entraînement en force composé essentiellement de *squats* n'induisait pas de modifications significatives de la force maximale isométrique mesurée spécifiquement aux extenseurs de la jambe alors que des gains en force maximale isométrique ont été obtenus à la suite du même entraînement lorsque la mesure était effectuée dans une position (développé des jambes assis) se rapprochant de celle des gestes effectués à l'entraînement (98).

### Force inertielle

La dynamométrie inertielle implique que la force gravitationnelle est constante sur toute l'amplitude du mouvement (141). Pour décrire cette modalité, le terme isoinertiel a été proposé mais semble inapproprié dans la mesure où l'inertie n'est pas constante (143). Il s'agit donc *des exercices dynamiques réalisés contre une charge de masse constante afin de modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps* (143). C'est avec cette modalité d'évaluation que le concept de 1 RM (1 répétition maximale) est proposé pour apprécier les qualités de forces maximales d'un individu. Ce concept est défini comme étant la résistance la plus élevée pouvant être soulevée une seule fois avec la bonne technique (143). Le protocole d'évaluation de cette qualité implique une démarche par essais et erreurs où, à partir de charges estimées à 90% du 1RM, une augmentation de la charge est effectuée après chaque répétition réussie. Un repos d'au moins 3 minutes doit être accordé entre chaque essai alors qu'il est souhaitable de déterminer le 1 RM après 4 à 6 tentatives afin d'éviter l'accumulation de fatigue (143). Bien que la manipulation de charges élevées lors de ce type de test puisse représenter un certain risque de blessures musculosquelettiques, il n'en demeure pas moins que les informations obtenues renseignent quant aux qualités de force maximale fonctionnelle d'un individu. D'ailleurs, cette procédure a été validée avec des aînés (144) et la grande reproductibilité (CV : 2 à 8%) démontrée (145, 146) pourvu qu'une période de familiarisation ait été accordée (145-147) et que l'activation en début de séance soit appropriée (143). Il existe cependant des méthodes permettant d'estimer le 1 RM à partir de charges sous-maximales (143, 148). Malgré leur intérêt

considérant que le risque de blessures est moindre, il n'en demeure pas moins que ces méthodes n'offrent qu'une approximation de la force maximale qui est nettement insuffisante dans un contexte de prescription individualisée de l'entraînement et de suivi à long terme. Cependant, cette démarche d'évaluation à partir de charge sous-maximale peut s'avérer tout à fait appropriée dans une perspective de mesure des qualités d'endurance de force exprimées par le plus grand nombre de répétitions pouvant être effectuées avec une résistance fixe (92).

La dynamométrie inertielle permet également d'apprécier les qualités de force-vitesse d'un individu. En effet, des mouvements ballistiques tels que des sauts ainsi que des mouvements traditionnels en musculation réalisés avec une intention de vitesse maximale peuvent être utilisés pour évaluer les qualités de puissance. À cet effet, les sauts en contre mouvement permettent de mettre en lumière le cycle étirement/raccourcissement qui implique une phase excentrique durant laquelle le participant fléchit les genoux et prend ainsi un élan afin d'optimiser la phase concentrique qui suit et la hauteur de saut atteinte. Il est à noter que des instruments spécifiques tels que des encodeurs linéaires et des plateformes de force sont nécessaires pour apprécier ces qualités de force-vitesse. Récemment, la reproductibilité de ces approches chez les aînés a été démontrée (145, 149) (sauts : CV < 10% - phase concentrique, 8 à 18% - phase excentrique; mouvements musculation : 2 à 8%) alors que l'évaluation de ces paramètres semble très pertinente d'un point de vue fonctionnel (124). La standardisation de la mesure de force et de puissance inertielle nécessite par ailleurs une attention toute particulière quant à ce cycle étirement/raccourcissement. Il a été démontré que la présence de cette composante élastique lors d'un mouvement pouvait induire des améliorations de la force et de la puissance en comparaison avec un mouvement impliquant seulement un volet concentrique (150). Il apparaît donc que la prise en considération de ce paramètre est primordial afin d'optimiser la reproductibilité de la mesure. De plus, le positionnement de l'individu doit être minutieusement reproduit afin de contrôler l'amplitude du mouvement qui est susceptible de modifier, en raison de la relation tension-longueur, la capacité de générer de la force (102). Enfin, des enjeux de sensibilité de la mesure sont aussi à souligner. En effet, des résultats démontrent que l'entraînement inertiel peut mener à des gains significatifs quant au 1 RM sans modification de la force isocinétique. L'inverse a aussi été démontré : l'entraînement isocinétique améliore la force isocinétique sans que des gains au 1 RM soient rapportés (151). Il en ressort donc que la spécificité entre la méthode d'entraînement et le mode d'évaluation est primordiale afin de bien apprécier les adaptations induites par l'intervention.

## Force isocinétique

Quant à l'isocinétisme, cette modalité fait référence à l'évaluation des qualités de force et de puissance en utilisant un dynamomètre qui maintient constante la vitesse du mouvement sur toute l'amplitude du geste (141). Cette méthodologie possède l'avantage d'être très sécuritaire tout en permettant l'évaluation précise d'une articulation isolée (141). À ce sujet, des tests de force isocinétique des extenseurs de la jambe ont été effectués et les pics de force mesurés ont permis d'identifier des normes reliées à la mobilité des aînés (152). Des ratios agonistes/antagonistes peuvent être aussi établis tout comme les différences bilatérales, favorisant ainsi l'appréciation d'éventuels déséquilibres musculaires (153). En plus des pics de force mesurés sur toute l'amplitude du mouvement, le travail total (force endurance) peut aussi être évalué en tenant compte de l'ensemble des répétitions effectuées (153). Le grand contrôle de l'environnement immédiat qu'offre cette modalité (vitesse d'exécution, technique, implication d'autres segments corporels) est souvent associé à une plus grande objectivité de la mesure. Cependant, la validité externe de cette méthode est remise en question puisque ces dynamomètres ne permettent pas l'appréciation des cycles étirement/raccourcissement tels que représentés dans bon nombre de tâches fonctionnelles et athlétiques (154). Par ailleurs, il est suggéré que le choix des vitesses angulaires lors du test isocinétique doit être spécifique à la tâche pertinente pour le participant (153).

La reproductibilité de cette modalité a été jugée très bonne comme en témoignent les indices de corrélation intra-classe (0.81 à 0.99) rapportés pour un groupe d'aînés dont l'âge moyen était de 71 ans (155). Dans cette perspective, afin de standardiser la mesure isocinétique, il est important de mentionner que l'ajustement du dynamomètre en fonction des repères anatomiques propres à chaque articulation est primordial (156). Par la suite, une activation appropriée est nécessaire afin de familiariser le sujet avec cette modalité d'évaluation et pour diminuer le risque de blessures musculaires. Il est recommandé d'exécuter au moins 3 essais maximaux afin d'améliorer la reproductibilité de la mesure. De plus, il est important de considérer que ce mode d'évaluation, bien que soi-disant isocinétique, implique nécessairement une phase d'accélération et une phase de décélération. Ainsi, l'isocinétisme sera d'autant plus marqué que la vitesse de mouvement sera réduite (157). Finalement, tel que mentionné pour les deux autres modalités d'évaluation, des enjeux de spécificité doivent être considérés afin d'optimiser la sensibilité du test aux adaptations induites par une intervention (151).



#### 1.2.4. Interactions entre $\dot{V}O_2\text{max}$ , CE, qualités neuromusculaires et mobilité

##### Énergie potentielle

Afin de décrire les interactions entre le CE et  $\dot{V}O_2\text{max}$ , le concept d'énergie potentielle a été présenté (1). Dans ce modèle (figure 2), on distingue ainsi l'énergie essentielle, l'énergie disponible et l'énergie potentielle. Pour établir chacune de ces composantes, on mesure la consommation d'oxygène au repos (métabolisme de base), lors d'un effort sous-maximal à la marche et lors d'un effort maximal. L'énergie essentielle représente le métabolisme de repos et l'effort sous-maximal associé à la marche (énergie nécessaire au maintien de l'autonomie). Ce concept est étroitement relié au CEB à la seule différence que les valeurs sont exprimées sans tenir compte de la vitesse de marche et sans subir une transformation à partir de l'équivalent énergétique approximatif de l'oxygène. L'énergie potentielle décrit, quant à elle, la réserve d'énergie qui correspond à la différence entre l'effort maximal et l'effort sous-maximal. Enfin l'énergie disponible représente la différence entre l'effort maximal et le métabolisme de repos (1) et reflète l'amplitude des activités physiques possibles.

Dans une étude américaine regroupant 350 participants âgés en moyenne de 70.3 ans (écart de 50 à 96 ans) (1), il a été démontré que l'énergie essentielle augmente de façon significative avec l'âge ( $p < 0.001$ ) et ce indépendamment du sexe et de la taille. Cette observation réfère donc à l'augmentation du CEB associée au vieillissement (6). Il est rapporté que la ratio masse grasse/masse maigre était un important facteur dans ce modèle ( $p = 0.003$ ) ce qui suggère que les gens qui démontrent une masse grasse plus élevée présentent le CEB le plus élevé. Par ailleurs, l'énergie disponible et l'énergie potentielle diminuent significativement avec l'avancée en âge ( $p < 0.001$ ). Encore une fois, le ratio masse grasse/masse maigre représente un facteur déterminant de cette relation, indiquant que les gens qui présentent une masse grasse plus importante voient les niveaux d'énergie potentielle et disponible diminuer davantage que ce qui est observé normalement lorsque seul l'âge est pris en considération.

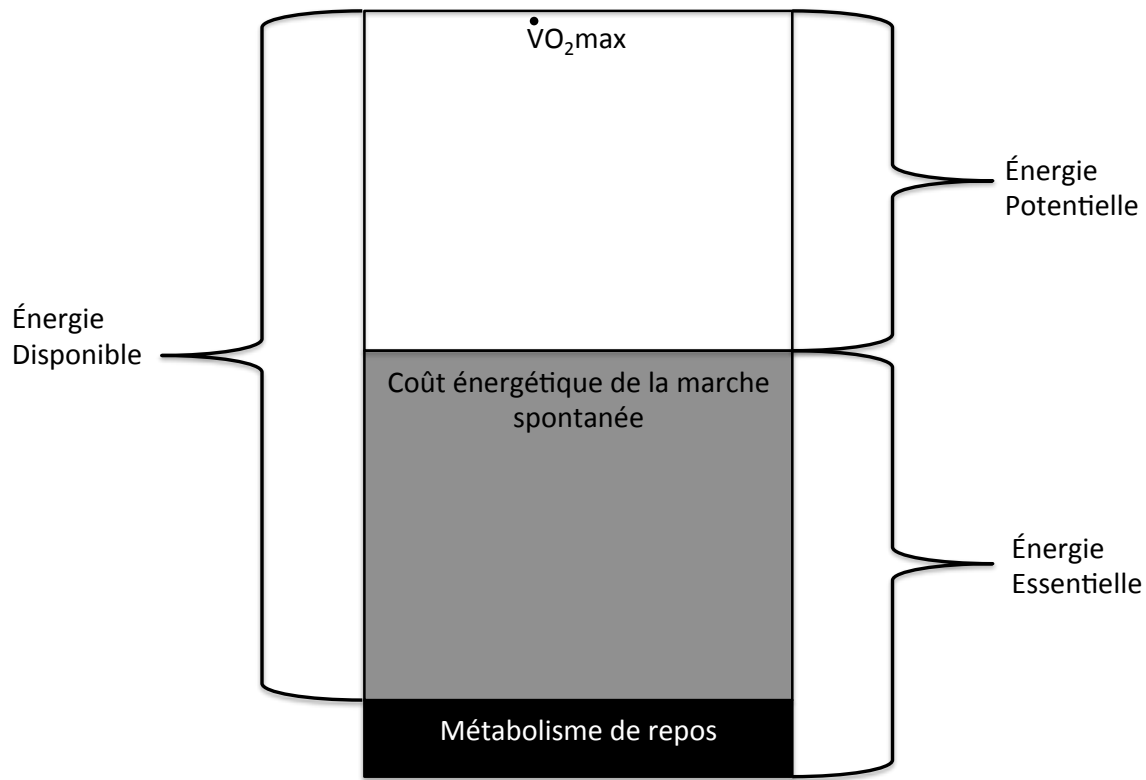


Figure 2 – Interactions entre le métabolisme de repos, le coût énergétique de la marche spontanée et  $\dot{V}O_2\text{max}$  (1)

Ces concepts et cette nouvelle terminologie mettent donc en lumière l'importance de considérer de façon simultanée le CEB et  $\dot{V}O_2\text{max}$  dans le contexte d'un suivi longitudinal avec des aînés. Intuitivement, un exemple simple permettra d'illustrer cette relation. Un individu qui, à 65 ans, présente une consommation d'oxygène de  $16 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  en marchant à  $4 \text{ km.h}^{-1}$  et une  $\dot{V}O_2\text{max}$  de  $35 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  devrait voir, une décennie plus tard, ces valeurs passer à  $18 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  (6) et  $31.5 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  (64), respectivement. C'est donc dire que l'intensité relative de la marche à  $4 \text{ km.h}^{-1}$  a été augmentée de 46 à 57%. Ce phénomène pourrait éventuellement amener cet individu à ralentir la vitesse de marche afin de maintenir une intensité relative plus faible ce qui, à terme, peut mener à un cercle vicieux de réduction de la pratique régulière d'activité physique jusqu'à la perte d'autonomie. Cette hypothèse a récemment été validée auprès d'une cohorte américaine de 405 adultes âgés de 33 à 94 ans (158). Dans cette étude, l'énergie potentielle était décrite comme étant le ratio entre la consommation d'oxygène lors de la marche sous-maximale et  $\dot{V}O_2\text{max}$ ; un ratio élevé correspondant à

une énergie potentielle réduite. Il a été démontré que ce ratio était un important déterminant de la vitesse de marche spontanée en plus de facteurs comme l'âge et la composition corporelle. Cette relation décrit ainsi une diminution de la vitesse de marche spontanée lorsque le ratio augmente (ou l'énergie potentielle diminue). En fait, il est intéressant de constater que cette relation est significative seulement lorsque les gens ayant  $\dot{V}O_2\text{max}$  inférieure à  $18.3 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  sont inclus dans le modèle. Cette observation suggère donc que lorsque la  $\dot{V}O_2\text{max}$  passe sous un seuil critique, le CE devient un facteur particulièrement important pour déterminer la vitesse de marche spontanée (158).

## Effets de l'entraînement

### Entraînement aérobie

Considérant que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  représente un déterminant de la qualité de vie, du maintien de l'autonomie et du risque de mortalité, il est très intéressant de comprendre comment améliorer cette qualité et ce particulièrement dans un contexte de vieillissement.

À cet effet, une méta-analyse publiée en 2005 permet de mieux comprendre le type d'intervention à prescrire de même que l'amplitude des bénéfices attendus. Ce travail rétrospectif incluait des articles dont les résultats des groupes expérimentaux avaient été comparés à un groupe contrôle, alors que seul un entraînement aérobie avait été prescrit (159). Par ailleurs, les sujets devaient être sédentaires au moment de l'inclusion dans le programme et être âgés d'au moins 60 ans. Ces critères ont permis d'analyser, à partir de 41 articles, les résultats obtenus par 2102 participants dont 1257 avaient été inclus dans une intervention visant l'amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Le niveau des participants au moment de prendre part aux entraînements variait de  $14.7$  à  $30.8 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  et ces valeurs étaient statistiquement comparables aux sujets des groupes contrôles. L'âge moyen de ces participants était de  $67.1 \pm 4.7$  ans. Cette méta-analyse révèle qu'un entraînement de 16 à 20 semaines incluant 3 séances hebdomadaires d'une durée de 30 à 35 minutes à une intensité de 55 à 60% de la PAM permet une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  de l'ordre de  $4 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  ce qui représente approximativement 16% des valeurs mesurées initialement. Les amplitudes d'effets rapportés passaient de  $0.68 \pm 0.42$  (modérée) à  $0.83 \pm 0.43$  (grande) (160) pour les essais randomisés et non randomisés, respectivement. Il est par ailleurs intéressant de constater que les interventions analysées étaient d'une durée variant de 8 à 52 semaines et que les séances avaient lieu à une fréquence d'une à 5 fois par semaine. Enfin, les durées variaient de 20 à 60 minutes alors que

les intensités prescrites ne dépassaient pas 80 à 85% de la FC max, de la  $\dot{V}O_2$ max ou de la FC de réserve. Il devient donc pertinent de vérifier si des approches différentes peuvent mener à des résultats semblables, voire améliorés.

Dans cette perspective, l'entraînement par intervalles à haute intensité représente une stratégie qui permet d'atteindre des intensités très élevées, correspondant typiquement à 85-100% de la  $\dot{V}O_2$ max, durant de courtes périodes d'effort et d'alterner ces moments avec des temps de repos actifs ou passifs (161). Parmi les modèles présentés, il apparaît que l'enchaînement de périodes de 15 secondes d'effort à une intensité correspondant à 100% de la PAM suivies de repos passif (0% PAM) offre une stimulation physiologique appropriée tout en étant particulièrement bien tolérée par les participants (162). Alors que l'efficacité de ces méthodes d'entraînement a été démontrée dans les cercles sportifs (74), il est maintenant bien accepté que ces approches sont aussi très efficaces et sécuritaires avec les aînés (163) et les patients (161). Par ailleurs, un nouveau modèle d'entraînement par intervalles a récemment fait l'objet d'une méta-analyse. Il s'agit de l'entraînement en sprints qui consiste à donner un effort maximal durant de très courtes périodes (10 à 30 secondes) avant de prendre un repos d'au moins 5 fois la durée de la période d'effort. Le volume de ces séances est faible comparativement aux entraînements traditionnels (moins d'une douzaine de répétitions de ces cycles efforts/repos). Les résultats démontrent que des améliorations de la  $\dot{V}O_2$ max de l'ordre de 7% sont attendues après deux semaines de ce régime alors qu'on approche les 10% après 4 à 8 semaines (164). Les populations étudiées jusqu'à maintenant sont des adultes sédentaires asymptomatiques. Il reste donc à déterminer la validité clinique de cette approche avec des aînés et des patients. Malgré tout, ces observations suggèrent que les entraînements par intervalles à haute intensité, dont l'innocuité a été démontrée, sont conviviaux et efficaces pour améliorer la santé cardiovasculaire tout en offrant la possibilité de réduire le temps d'engagement à l'entraînement. Davantage de travaux sont nécessaires afin de préciser la relation dose/réponse et ce particulièrement chez les aînés.

Par ailleurs, il convient de préciser qu'il semble possible d'améliorer  $\dot{V}O_2$ max et ce peu importe l'âge où le niveau initial des participants. À ce sujet, un rapport paru en 2003 révèle des résultats fort intéressants (73). Un groupe d'hommes et de femmes fragiles (83 +/- 3.6 ans) s'est entraîné sur tapis roulant, ergocycle et rameur durant 6 mois à raison de 3 séances par semaine. La charge d'entraînement comprenait 20 à 60 minutes d'exercice par séance à une intensité de 50 à 75% de la FC maximale. Après 4 à 6 semaines de ce régime, un entraînement par intervalles a été proposé

alors que des périodes de 5 minutes d'effort à une intensité correspondant 85-90% de la FC maximale étaient suivies de 3-4 minutes de repos actif. Les résultats de cette intervention ont été comparés à ceux obtenus par des participants impliqués dans un groupe contrôle pour lequel un programme d'exercices légers a été proposé (étirements, relaxation, yoga). Alors que ces participants du groupe contrôle n'ont pas amélioré leur  $\dot{V}O_2\text{max}$  (15.6 +/- 2.7 à 15.2 +/-3.4 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>), l'entraînement aérobic a permis une amélioration significative ( $p<0.001$ ) de 12.5% (16.0 +/- 2.3 à 18.0 +/- 2.5 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>). Ces gains étaient par ailleurs reliés à une augmentation du  $\dot{Q}c$  sans modification de la  $a-\bar{v} O_2$ .

Bien que les aînés semblent préserver une certaine capacité d'adaptation à l'entraînement aérobic, il convient de préciser que l'amplitude des effets rapportés est réduite par rapport aux jeunes adultes. À cet effet, une très récente étude a comparé, en fonction de l'âge, les adaptations à un entraînement aérobic intermittent à haute intensité d'une durée de 8 semaines à raison de 3 séances par semaine (165). Les séances comprenaient 4 répétitions de 4 minutes à une intensité induisant une élévation de la FC entre 90 et 95% de la FC maximale. Une période de repos actif de trois minutes à 70% de FC max était allouée entre les périodes plus intenses. Après l'intervention, autant les jeunes adultes (n=13, 24+/-2 ans) que les aînés (n=13, 60+/-3 ans) ont amélioré  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Cependant, les gains étaient significativement plus modestes chez les aînés (13 +/-6% vs. 6 +/- 7%,  $p<0.01$ ). Pour les deux groupes, aucun changement significatif de la  $a-\bar{v} O_2$  n'a été rapporté. Cependant, il est intéressant de constater que les adaptations centrales ( $\dot{Q}c$ ) démontrent une tendance vers des gains plus prononcés chez les jeunes adultes (16 +/-14% vs 11+/-12%).

### Entraînement en force

Bien que l'entraînement de l'aptitude aérobic représente un moyen privilégié pour améliorer la santé cardio vasculaire, il semble que cette pratique ne soit pas suffisante pour optimiser les bénéfices de l'activité physique sur la santé globale d'un individu. À cet effet, une étude qui s'est intéressée aux qualités d'athlètes de la catégorie *maîtres* est très révélatrice. Des candidats sédentaires (n=8) ont ainsi été comparés à un groupe d'athlètes habitués à l'entraînement en force (n=7; lancer du poids, sprints et sauts) et à un groupe d'athlètes impliqués dans des événements de longue distance (n=9; course et cyclisme) (139). Tous ces athlètes, impliqués dans des compétitions nationales et internationales, avaient une expérience d'entraînement d'au moins 50 ans à une fréquence de 2 à 5 séances par semaine. Les participants, âgés de 70.5 à 73.9 ans, se distinguaient entre autres par leur  $\dot{V}O_2\text{max}$ ; sans surprise, les athlètes endurants démontrant des valeurs plus élevées que les deux autres groupes ( $p<0.01$ ). Par ailleurs, malgré que la force maximale isométrique

était similaire chez les endurants et les athlètes spécialistes de la force, il n'en demeure pas moins que ces derniers étaient avantagés à certains égards quant aux qualités neuromusculaires. Il est intéressant de constater que seuls ces athlètes se distinguaient des sédentaires en ce qui concerne les taux de croissance de force et la surface de section transverse des fibres musculaires ( $p < 0.05$ ). Ces observations suggèrent que l'entraînement aérobie en endurance n'est pas suffisant pour éviter le déclin des qualités neuromusculaires associé à l'âge ce qui offre des appuis à l'intégration d'un entraînement en force parmi les activités physiques pratiquées quotidiennement.

À cet effet, il est maintenant bien accepté que les capacités d'adaptation des aînés à l'entraînement en force sont préservées. D'abord, il semble qu'autant l'activation que la fréquence de stimulation des unités motrices peuvent être améliorées à la suite d'un entraînement en force et ce spécialement au début de l'intervention (98, 129, 166). De plus, des rapports suggèrent que l'entraînement en force peut favoriser une diminution de la co-activation chez des individus démontrant des valeurs de base élevées (activité antagoniste > 20-25% de l'activité maximale agoniste) (129) ainsi qu'une augmentation de la constance de développement de la force (167). En périphérie, il a récemment été démontré que la surface de section transverse des fibres musculaires pouvait être augmentée à la suite d'un entraînement en force et ce plus particulièrement pour les fibres de type 2 (131), phénomène qui est associé à une augmentation du contenu en cellules satellites (132). Chez les participants très âgés (âge moyen > 75 ans, limite supérieure = 95 ans), il semble que l'hypertrophie du muscle est toujours possible quoique l'amplitude semble de beaucoup réduite (amélioration d'environ 2% en rapport aux valeurs initiales) et à l'intérieur des écarts associés à l'erreur de mesures des techniques d'imagerie utilisées (168). Cependant, il apparaît que la force peut être améliorée chez ces sujets très âgés (38.8 à 156%) ce qui tend à confirmer que l'hypertrophie du muscle n'est pas nécessaire pour engendrer des gains en force (168).

D'un point de vue fonctionnel, les effets d'un programme d'entraînement en force chez les aînés ont fait l'objet de plusieurs études et démontrent de façon assez claire les bénéfices associés à ce type d'intervention. Dans une méta-analyse incluant 22 études portant sur des sujets dont l'âge était de plus de 65 ans (169), il était rapporté que les gains en force maximale dépendaient de l'intensité lors de l'entraînement. En effet, les intensités supérieures à 75% du 1RM se sont avérées plus efficaces que les intensités modérées (55-75% 1 RM) et les intensités faibles (<55% 1 RM). Cependant, cette relation n'était plus significative en ce qui concerne les capacités fonctionnelles

alors que toutes les intensités améliorent de la même façon la performance dans les tâches de la vie quotidienne. À cet égard, il apparaît que l'entraînement des qualités de force-vitesse (ou de puissance) est particulièrement efficace pour améliorer les capacités fonctionnelles tout en étant aussi efficace que l'entraînement traditionnel en force pour améliorer la force maximale. Cette observation suggère donc un avantage marqué pour l'entraînement des qualités de puissance chez les aînés. Cependant, l'importance de l'intensité à l'entraînement en force a été remise en question par une plus récente méta-analyse effectuée chez les aînés de plus de 55 ans incluant 15 études et 528 participants. Il est intéressant de constater que parmi les variables sélectionnées pour une analyse par régression, la durée du programme d'entraînement représentait le seul facteur déterminant des gains en force observés. Ainsi, parmi les durée d'interventions analysées (8 à 52 semaines), plus le programme s'échelonne sur une longue période, plus les adaptations en force sont prononcées et ce peu importe le volume (nombre de séries effectuées), l'intensité (en % du 1 RM) ou la fréquence des entraînements (séances par semaine). Par contre, il est important de mentionner que certaines limites sont ici à considérer. D'abord, les auteurs rapportent une assez grande homogénéité dans les protocoles d'entraînement étudiés ce qui peut restreindre la capacité de distinguer les effets des méthodes proposées qui ne sont pas, au final, très différentes l'une de l'autre. De plus, le fait que les participants étaient sédentaires au début des études analysées peut favoriser des adaptations assez rapide et ce peu importe la stimulation présentée.

En résumé, les résultats de ces méta-analyses suggèrent que l'intensité (en % du 1RM) est une variable déterminante des adaptations en force. Cependant le développement des qualités de puissance semble une méthode privilégiée pour induire des gains en force mais aussi pour améliorer les capacités fonctionnelles. Par ailleurs, dans une perspective d'optimiser la prise de masse musculaire chez des aînés, il est pertinent de rappeler des résultats évoqués dans une section précédente à l'effet que le volume d'entraînement et plus particulièrement l'atteinte de l'échec du mouvement représentent des déterminants de l'hypertrophie du muscle (116, 117). Dans certaines circonstances où l'utilisation de charge élevée est à déconseiller (participants fragiles, problèmes musculosquelettiques, etc.), il peut être intéressant d'utiliser des résistances relatives plutôt moindres mais d'encourager les répétitions du mouvement jusqu'à l'épuisement. Enfin la durée du programme d'entraînement semble déterminer les gains en force. Il est à noter que les performances étudiées dans ces méta-analyses ne concernaient que les extenseurs de la jambe. Malgré que ce

critère peut sembler restrictif, il n'en demeure pas moins que ce groupe musculaire est étroitement associé à la mobilité et à l'autonomie chez les aînés (152).

### Force et CE

En plus des bénéfices directs sur les qualités neuromusculaires, l'entraînement en force est reconnu pour induire des adaptations favorables en regard du CE dans différentes disciplines sportives de longue distance (170). Par exemple, l'ajout d'un entraînement hebdomadaire en force explosive durant une période de 8 semaines a permis de réduire le CE en course à pied chez des athlètes de niveau régional (171). Des améliorations du CE en course à pied ont aussi été observées à la suite d'entraînement en force maximale (172, 173). Les effets positifs de ce type d'intervention sont maintenant bien reconnus alors que les améliorations attendues du CE sont de l'ordre de 4 à 8% après un cycle d'entraînement en force 6 à 14 semaines (174). Devant ces évidences observées chez les athlètes, il a été suggéré que ce type d'entraînement pouvait être prescrit pour réduire le CE chez les aînés. Cependant, les résultats des études ne sont pas sans équivoque.

D'abord, un entraînement en force de 12 mois à raison de 3 séances (dont 2 supervisées) de soixante minutes par semaine a permis à un groupe de 25 hommes et femmes d'améliorer la force, l'équilibre et les capacités fonctionnelles de façon plus importante que les participants inclus dans un groupe contrôle à qui on avait demandé de maintenir les activités quotidiennes normales (interactions groupe \* temps :  $p < 0.05$ ) (14). Cependant, aucune modification du CE à la marche n'a été rapportée, ni de relation entre les changements de force et les variations de CE, chez ces participants dont l'âge moyen était de 73.3 +/- 3.5 ans. Il faut cependant noter que la force était mesurée aux extenseurs de la jambe et que ces muscles ne sont pas les seuls à contribuer à la marche. Il aurait été approprié de vérifier les adaptations à la cheville et à la hanche. Par ailleurs, une intervention de 8 semaines à raison de 3 séances d'entraînement de la force maximale (4 séries de 4 répétitions maximales, développé des jambes) a permis d'améliorer la force maximale, le taux de croissance de force ainsi que le CEN de façon plus importante chez des participants coronariens (10 hommes, 66.5 +/- 5.5 ans) en comparaison avec le groupe contrôle ( $p < 0.05$ ) (175). Les auteurs suggèrent que ces améliorations étaient principalement reliées à des adaptations centrales (meilleure activation et augmentation de la fréquence de stimulation des unités motrices), pouvant affecter la perfusion du muscle en oxygène. En effet, il est rapporté qu'une restriction transitoire du débit sanguin périphérique survient lors de contractions musculaires qui correspondent à des intensités aussi faibles qu'à 15% de la force maximale (176). Les efforts musculaires nécessaires à la marche ont



donc le potentiel de contribuer à cette réduction transitoire du débit sanguin périphérique. Ainsi, il est suggéré que le participant qui augmente la force de ses membres inférieurs à la suite d'une intervention marche en utilisant un plus faible pourcentage de sa force maximale ce qui pourrait contribuer à amoindrir la réduction du débit sanguin (175). Malgré que ces idées étaient tout à fait spéculatives, il n'en demeure pas moins qu'elles reçoivent malgré tout un certain support scientifique alors que des améliorations du taux de croissance de force sont associées à un temps de relaxation musculaire plus important, une diminution de l'occlusion musculaire et à une augmentation du temps de transit capillaire qui, à terme, peut favoriser une meilleure perfusion du muscle en oxygène et à une diminution du CE (177).

Dans une autre étude, 47 participants dont l'âge moyen était de 77.2 +/- 5.4 ans ont complété un programme d'entraînement de 12 semaines à raison de 2 séances hebdomadaires de 60 minutes (178). Deux interventions ont été comparées; celles-ci impliquaient d'abord un groupe dont l'entraînement était orienté vers des activités d'équilibre, de développement de la force et de marche alors que le deuxième groupe devait développer sa coordination et son synchronisme à la marche grâce à différentes activités de locomotion. Les qualités neuromusculaires, appréciées depuis le temps mis pour se lever d'une chaise et s'asseoir 5 fois consécutives, ont été améliorées significativement dans les deux groupes. Cependant, le CE a été amélioré seulement dans le groupe coordination/synchronisme. Bien que l'objectif de cette étude n'était pas de vérifier directement les effets d'un entraînement en force sur le CE, il n'en demeure pas moins que ces résultats soulèvent des interrogations quant à la relation entre les qualités neuromusculaires et le CE. S'il est vrai que le test choisi ne permet qu'une évaluation indirecte de la force d'un individu, il est permis de constater d'après ces résultats que des gains en force ne prédisent pas toujours des améliorations du CE.

Très récemment, une autre étude s'est intéressée aux liens entre l'entraînement en force et le CE. Il a été démontré qu'un entraînement en circuit de musculation qui est associé à des très faibles temps de pause entre les exercices a permis une diminution de la consommation d'oxygène à des intensités sous-maximales alors que ce phénomène n'a pas été observé chez des participants ayant été impliqués dans un programme de musculation traditionnel (78). Les auteurs ont ainsi proposé l'idée qu'en plus des adaptations centrales et périphériques induites par l'entraînement en musculation classique, le circuit d'entraînement sollicitait davantage le système cardiovasculaire ce qui pourrait induire des améliorations associées à l'efficacité mitochondriale.

Ensemble, ces résultats suggèrent que l'entraînement des qualités neuromusculaires demeure une avenue intéressante dans une perspective de réduction du CE dans le contexte du vieillissement. Cependant, davantage de travaux sont nécessaires afin de mieux comprendre la relation dose/réponse ainsi que les mécanismes impliqués.

#### Variabilité de la réponse à l'entraînement

Les résultats des différents avis scientifiques sont assez clairs à l'effet que la pratique régulière d'activité physique favorise le vieillissement sain ainsi qu'une augmentation de l'espérance de vie (179). De plus, les informations présentées dans les dernières sections suggèrent que l'entraînement ciblé de certaines qualités déterminant la condition physique d'un individu permet des adaptations significatives en regard de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et des qualités neuromusculaires, aspects qui tendent à décliner avec l'avancée en âge. Bien que les effets statistiques globaux soient très favorables au maintien d'une vie active, il n'en demeure pas moins qu'une certaine variabilité des adaptations interindividuelles est rapportée. À cet effet, il a été démontré chez un groupe de 175 participants âgés en moyenne de 53 +/- 8 ans que les adaptations à un programme qui combinait un entraînement aérobie à un entraînement en force variaient de -8 à 42% pour  $\dot{V}O_2\text{max}$  et de -12 à 87% pour la force maximale lorsque les résultats sont représentés en pourcentage de changement par rapport au niveau initial (180). Il est pertinent de constater que cette intervention de 21 semaines était basée sur une prescription individualisée de l'entraînement; c'est-à-dire que les intensités relatives étaient ajustées en fonction du niveau initial et de mi-programme de chaque individu. Par ailleurs, aucune corrélation significative n'était rapportée quant aux adaptations à l'entraînement en force et aux adaptations à l'entraînement aérobie. Cette observation suggère que la capacité d'adaptation n'est pas systématique et donc, varie selon la stimulation présentée. Alors que l'âge et le niveau initial peuvent expliquer une petite partie de la capacité d'adaptation des participants inclus dans cette étude (180), il apparaît que de plus amples recherches sont nécessaires afin de comprendre cette variabilité interindividuelle observée à la suite d'une prescription d'entraînement précisée en fonction du niveau de chaque sujet. Ces résultats suggèrent que, malgré les bienfaits associés traditionnellement à ces entraînements physiques, certains individus auront tendance à s'améliorer davantage en force alors que d'autres seront plus susceptibles de constater des améliorations de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ ; des adaptations négatives pouvant même être rapportées. Il apparaît donc qu'un diagnostic rapide de ces profils permettra au clinicien de mieux cibler les interventions à

prescrire tout en évitant de promettre des changements drastiques à des candidats qui pourraient être fortement déçus par l'absence de résultats après de longs efforts à l'entraînement.

### **1.3. Cognition, condition physique et mobilité**

La cognition fait référence aux fonctions du cerveau et aux processus mentaux allant de l'analyse perceptive à la commande motrice. Un contrôle exécutif assure la coordination de ces fonctions cognitives dont les mécanismes, supportés par le cortex préfrontal, interagissent pour permettre à l'individu de s'ajuster à son environnement et de prendre les décisions nécessaires à l'adoption d'un comportement adéquat (181, 182). Dans cette perspective, l'attention représente une fonction cognitive très importante. Considérant que les ressources attentionnelles sont limitées pour chaque individu et que les tâches effectuées peuvent solliciter une portion de la réserve attentionnelle, il apparaît que dans un contexte où les stimulations environnementales exigent des ressources attentionnelles qui dépassent la capacité individuelle, la réponse exigée sera ainsi altérée (183). Parmi les processus attentionnels, l'attention sélective semble représenter un intérêt particulier puisque cette qualité permet à un individu de choisir, parmi toutes les stimulations qui sont présentées dans un contexte particulier, les informations qui sont véritablement pertinentes pour la réalisation d'une tâche particulière. À cet égard, l'inhibition est décrite comme étant une fonction exécutive déterminante de l'attention sélective. Ce concept est défini comme étant l'habileté qui permet à l'individu de supprimer le traitement attentionnel de stimulations impertinentes qui interfèrent avec une réponse plus appropriée aux exigences de l'environnement de façon à allouer le traitement nécessaire à cette réponse appropriée (184). Par ailleurs, la flexibilité attentionnelle fait quant à elle référence à la capacité d'alterner notre attention d'une information à l'autre. Il est question ici de flexibilité inter-stimulus et de flexibilité inter-tâches. Quant à la mémoire de travail ou la mise à jour, ce concept fait référence à la rétention et à l'utilisation d'informations dans un délai plutôt bref. Ces fonctions, en raison de leur importance dans les tâches de la vie quotidienne et considérant leur altération associée au vieillissement (185), méritent un suivi particulier.

Le vieillissement s'accompagne souvent de changements neuroanatomiques et neurophysiologiques qui peuvent affecter un grand nombre de fonctions cognitives. Ainsi, ces altérations sont caractérisées par une diminution importante du volume des régions préfrontales du cortex cérébral, des atteintes à l'intégrité de la matière blanche et de la matière grise et une diminution du nombre de récepteurs aux neurotransmetteurs (dopamine et sérotonine). Dans une

perspective comportementale, ces atteintes touchent de façon plus particulière les fonctions exécutives dont la mémoire de travail, l'attention sélective ou l'inhibition, la flexibilité attentionnelle, la régulation de la vitesse de traitement de l'information et la préparation à répondre aux stimuli de l'environnement (185-187). À partir de techniques d'imageries comme la résonance magnétique fonctionnelle, il est possible d'apprécier les effets du vieillissement sur l'activité cérébrale. Parmi les hypothèses neurocognitives avancées, notons d'abord le phénomène de compensation (185). Ce concept fait référence à l'activation plus prononcée de certaines régions du cerveau (en particulier le cortex préfrontal) chez les aînés en comparaison avec ce qui est observé chez de jeunes adultes. Alors que cette suractivation préfrontale peut être associée à de meilleures performances chez les aînés, il semble que le contraire puisse aussi être observé, c'est-à-dire que de moins bonnes performances sont remarquées. Il est ainsi proposé, pour expliquer ce phénomène, que les aînés recrutent davantage de ressources cérébrales que des jeunes adultes pour exécuter des tâches de faible niveau de difficulté (compensation) alors que cette stratégie n'est plus efficace lorsque la tâche se complique ce qui résulte en de moins bonnes performances (185). Par ailleurs, le concept de *dédifférentiation* fait référence au fait que les zones cérébrales activées lors de certaines tâches cognitives bien précises sont moins distinctes avec l'avancée en âge (185). Ces phénomènes sont associés à une moins grande efficacité dans l'utilisation des ressources cérébrales (185).

### **1.3.1. Interactions entre condition physique et fonctions cognitives**

*Mens sana in corpore sano (Juvénal - Satires, X, 356) – Esprit sain dans un corps sain*

Cette maxime de Juvénal est aujourd'hui utilisée pour suggérer que le corps et l'esprit doivent être entretenus en équilibre afin de maintenir une santé globale. Les recherches démontrent qu'au-delà de l'intuition, cette maxime possède des bases scientifiques. Il est en effet bien admis que l'activité physique joue un rôle important sur les fonctions cognitives, plus particulièrement dans le cas des personnes âgées. Pour expliquer ce lien entre la condition physique et la cognition, certains auteurs proposent l'hypothèse cardiovasculaire. Cette hypothèse suggère que la participation régulière à des activités physiques, en favorisant une meilleure  $\dot{V}O_2\text{max}$ , permet d'améliorer les performances cognitives via une augmentation de l'oxygénation cérébrale (188). Plusieurs rapports originaux, revues de la littérature et méta-analyses appuient cette hypothèse (189-193). Cependant, quelques aspects méthodologiques sont d'abord à considérer.

## Méthodologie de la recherche

Trois catégories d'études ont été principalement menées sur le sujet. Alors que les études transversales ont comparé, à un moment donné, des groupes d'aînés qui étaient différenciés par le niveau de condition physique, des études longitudinales et des études d'interventions ont permis de suivre les mêmes individus sur une plus ou moins longue période.

Les études transversales démontrent généralement que les gens en bonne condition physique sont également plus performants que les sédentaires lors de différentes épreuves cognitives. Lorsque ces études comparent des jeunes à des aînés, les différences dans les performances cognitives associées à l'âge peuvent être diminuées, voire absentes si les aînés sont en très grande forme physique (182).

Les études d'intervention (programme d'entraînement de la condition physique) permettent de vérifier si les adaptations physiologiques sont reliées à de meilleures performances cognitives. En raison de contraintes reliées à la mise en place de ces études (investissement de temps pour les sujets, risques d'abandons, etc.), le traitement prescrit (l'entraînement) est souvent assez bref (de quelques semaines à un an). Il devient alors difficile de comparer les résultats obtenus avec des études transversales dans lesquels les sujets sont souvent actifs (ou sédentaires) depuis une très longue période. De plus, ces études ne tiennent pas compte de l'effet à long terme de l'intervention. En effet, il est possible que des modifications dans les habitudes de vie surviennent à la suite du traitement et que les adaptations induites ne soient perceptibles que plusieurs mois après l'entraînement sans qu'elles ne fassent l'objet d'un suivi de la part du chercheur. Enfin, il est également difficile dans ce genre de protocole de contrôler les sujets à l'extérieur de la salle d'entraînement. Certains sujets peuvent être tentés de modifier leurs habitudes alimentaires et même d'augmenter leur niveau quotidien de pratique d'activités physiques dans le but d'optimiser les adaptations positives. Pour contrôler cet aspect et faciliter la comparaison des sujets entre eux, des journaux alimentaires et d'activités physiques peuvent être rapportés mais ajoutent à la lourdeur du protocole.

Enfin, les études longitudinales ont bien sûr l'avantage de permettre un suivi sur une plus longue période. Cependant, ce suivi peut devenir moins précis en raison de la présence d'un très grand nombre de participants ce qui oblige les équipes de recherche à mettre en place des mesures très accessibles au détriment parfois d'une certaine précision. Le cas de la mesure de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  est

ici très pertinent. Plutôt que de procéder à une mesure directe, certains auteurs proposent des estimations qui ne sont pas sans limites (88). De plus, certains sujets abandonnent en cours de route (motivation, blessures, déménagements, mortalité, etc.) ce qui induit une certaine sélection naturelle : les sujets les plus doués et motivés se retrouvent en très grande proportion dans les analyses (182, 189).

Effets chroniques : hypothèse cardiovasculaire

#### Études transversales

Récemment, une étude présentait des résultats qui prennent en considération la  $\dot{V}O_2\text{max}$  (194). En effet, 110 sujets âgés de 60 à 79 ans ont été séparés en deux groupes selon leur niveau de condition physique estimée à partir du test de marche de Rockport décrit dans une section précédente (80). La médiane du groupe complet ( $n=110$ ) pour la  $\dot{V}O_2\text{max}$  été utilisée pour former les sous-groupes en fonction de la condition physique. Ces sujets devaient ensuite participer à une tâche de préparation à répondre. Les sujets devaient, au signal sonore, maintenir enfoncée grâce à l'index la touche d'un clavier (touche principale - TP). Dans le cas de la tâche de temps de réaction simple, lorsqu'un cercle noir apparaissait à l'écran, les sujets devaient laisser la TP pour appuyer avec l'index sur la touche immédiatement à droite. Dans le cas de la tâche de temps de réaction aux choix, le cercle noir apparaissait à droite ou à gauche d'un cercle blanc sur l'écran. En fonction de la position du cercle noir par rapport au cercle blanc, les sujets devaient appuyer sur une touche à droite ou à gauche de la TP (si le cercle noir apparaissait à droite, il fallait appuyer à droite de la TP). Les délais (intervalles préparatoires – IP) entre l'appui sur la TP et l'apparition du cercle noir étaient variables. Deux fenêtres temporelles étaient alors utilisées. Les IP courtes étaient de 1, 3 ou 5 secondes alors que les IP longues étaient de 5, 7 ou 9 secondes. Les IP étaient présentées aléatoirement et revenaient toutes le même nombre de fois pour chaque sujet. Les participants devaient répondre le plus rapidement possible et ils étaient encouragés à réduire les erreurs au minimum. Les variables à l'étude étaient le temps d'initiation (TI - délai entre l'apparition du cercle noir et le relâchement de la TP) et le temps d'exécution (TE - délai entre le relâchement de la TP et l'appui sur la touche de réponse). Les résultats démontrent que les sujets avec une bonne condition physique présentaient les meilleurs TI pour les IP courts de la fenêtre temporelle courte. De plus, ces mêmes sujets maintenaient un état de préparation à répondre plus élevé sur une longue période de temps (9 secondes). Par ailleurs, chez les participants les plus âgés (70 à 79 ans), les sujets avec une faible condition physique démontraient des TE plus lents que les participants avec une bonne condition

physique. Ces résultats suggèrent donc que chez les aînés, une bonne  $\dot{V}O_2\text{max}$  est associée à une meilleure préparation à répondre dans des tâches de temps de réaction. L'attention qui supporte l'exécution de ce type de tâche semble donc sensible à la condition physique. Une  $\dot{V}O_2\text{max}$  plus élevée semble également diminuer les ralentissements associés à l'âge dans l'exécution de réponses.

D'autres études transversales suggèrent un lien favorable entre l'activité physique, la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et les fonctions cognitives. Plus particulièrement, il apparaît que la fonction d'inhibition est sensible au niveau de pratique d'activité physique alors que la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , estimée à partir du test de Rockport, est présentée comme un médiateur de cette relation (187). Dans cette étude, 60 aînés de 60 à 81 ans étaient comparés à 63 jeunes de 18 à 28 ans. Malgré une tendance favorable, l'effet rapporté pour l'inhibition n'était pas significatif pour les fonctions de mémoire de travail et de flexibilité attentionnelle.

En plus de ces études comportementales, il semble que des liens significatifs sont rapportés entre la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et les structures cérébrales. En effet, il a été rapporté dans une étude impliquant 165 adultes âgés de 59 à 81 ans que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  était un facteur déterminant de la préservation du volume de l'hippocampe même après avoir tenu compte de variables comme l'âge, le sexe et le niveau d'éducation (195). Ces résultats étaient de plus appuyés par les performances comportementales dans une tâche sollicitant la mémoire spatiale alors qu'une bonne  $\dot{V}O_2\text{max}$  était associée à de meilleures performances cognitives. En support à ces résultats, une très récente étude suédoise rapporte un lien entre le niveau de pratique d'activité physique rapporté par les participants, dont l'âge moyen était de 75 ans, et le volume de certaines structures cérébrales (matière blanche, grise). Ces observations étaient supportées par la présence de meilleurs résultats comportementaux chez les sujets les plus actifs lors d'un test d'inhibition (196).

Prises ensemble, ces études transversales semblent donc appuyer l'hypothèse cardiovasculaire. Des études longitudinales sont également favorables à cette idée.

### Études longitudinales

Dans une revue de la littérature examinant le lien entre l'activité physique et la cognition à partir des résultats rapportés dans les études longitudinales, les auteurs en arrivent à la conclusion que les fonctions cognitives semblent bénéficier d'un effet protecteur procuré par des habitudes de vie favorisant la pratique régulière d'activités physiques (189). Ces études longitudinales présentent l'avantage de permettre un suivi à long terme d'une grande cohorte de sujets. Il est par contre

important de considérer que ces protocoles ne rapportent pour la plupart aucune mesure directe et objective de la condition physique. Généralement dans ces études, les sujets devaient plutôt présenter (journaux, questionnaires) leurs habitudes concernant la pratique d'activités physiques. Il en ressort que plus les participants étaient actifs physiquement, plus leurs performances cognitives étaient préservées (197). Par ailleurs, un niveau élevé de pratique d'activité physique est associé à une apparition retardée des symptômes de démence et d'Alzheimer (198). Comme aucune mesure directe de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  n'est rapportée dans ces études, il est plutôt difficile de conclure quant à la validité de l'hypothèse cardiovasculaire. Cependant, une étude longitudinale très récente offre un appui à cette hypothèse. Dans cette publication américaine, 1400 participants âgés de 19 à 94 ans ont été suivis sur une durée moyenne de 7 ans (+/- 3) (199). Une mesure directe de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  à la suite d'un test incrémenté a été effectuée pour tous ces participants. Les auteurs rapportent un effet protecteur de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  sur les fonctions cognitives et ce particulièrement pour les tâches impliquant la mémoire. Dans la même perspective, une autre étude longitudinale est très intéressante puisqu'elle a permis un suivi de 349 sujets âgés de plus de 55 ans durant une période de 6 ans tout en présentant une mesure de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  effectuée au départ de ce projet (200). Il a été démontré que les sujets qui possédaient les plus faibles valeurs de  $\dot{V}O_2\text{max}$  lors de cette évaluation initiale étaient aussi ceux qui démontraient les plus grandes diminutions de performance aux tests cognitifs. Ces dernières études semblent donc appuyer l'hypothèse cardiovasculaire.

### Études d'intervention

En 1999 sont publiés les résultats d'une étude d'intervention maintenant classique en lien avec l'hypothèse cardiovasculaire (201). 124 participants âgés de 60 à 75 ans ont été assignés de façon aléatoire à un groupe d'entraînement aérobic (A) ou à un groupe effectuant des exercices visant à tonifier les muscles (M). Le protocole d'entraînement de 6 mois a permis aux sujets du groupe A d'améliorer leur  $\dot{V}O_2\text{max}$  de 5.1% alors que les participants du groupe M ont vu cette valeur diminuer de 2.8%. Il est à noter que les auteurs rapportent que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  était équivalente pour les deux groupes avant l'intervention. Aucune autre précision n'est donnée quant aux caractéristiques du test visant à déterminer la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Les précisions concernant l'entraînement n'étaient pas non plus fournies (description d'une séance type, volume hebdomadaire, intensités prescrites, etc.). En plus du test visant à mesurer la capacité cardiovasculaire, les sujets étaient soumis à une série de tests cognitifs. Afin de vérifier l'hypothèse de travail selon laquelle les fonctions exécutives (alternance, inhibition) allaient être particulièrement sensibles aux effets de l'entraînement aérobic, les auteurs



ont donc proposé des tâches permettant de cibler ces fonctions en comparaison avec d'autres tâches pour lesquelles elles sont moins impliquées. Les résultats démontrent que les performances des sujets du groupe A se sont améliorées après l'intervention dans toutes les tâches cognitives impliquant les fonctions exécutives et ce significativement davantage que le groupe M. Pour les tâches impliquant dans une moindre mesure ces fonctions exécutives, aucune différence n'est rapportée entre les performances offertes par les deux groupes expérimentaux à la suite de l'entraînement. Cette étude suggère donc que l'hypothèse cardiovasculaire est valide mais également que les effets d'une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  sont reliés de façon préférentielle aux fonctions exécutives qui sont particulièrement altérées avec l'avancée en âge (181, 202, 203).

Dans une autre étude, 32 sujets de 60 à 76 ans ont été assignés aléatoirement dans un des quatre groupes d'intervention inclus dans ce projet (204). Le groupe A était impliqué dans un entraînement aérobie, le groupe MT a participé à un entraînement de la mémoire et le groupe AMT combinait les deux programmes. Enfin un groupe contrôle (C) participait à des activités sociales (chant, peinture, etc.). Le nombre de visites avec les intervenants de ce projet de recherche était le même pour tous les groupes. Chaque participant devait passer avant et après le protocole d'entraînement une batterie de tests visant à déterminer la  $\dot{V}O_2\text{max}$  (test incrémenté sur ergocycle) ainsi qu'un test de mémoire (Wechsler Memory Scale). L'entraînement aérobie impliquait 2 séances hebdomadaires d'une durée de 60 minutes chacune. On demandait alors aux sujets d'alterner les séquences de marche et de course avec des périodes de repos. L'intensité prescrite était individualisée en fonction de la fréquence cardiaque atteinte au seuil ventilatoire tel que mesuré lors du test incrémenté sur vélo. Quant à l'entraînement de la mémoire, les séances étaient d'une durée de 90 minutes à raison d'une visite par semaine. Les thèmes abordés durant ces séances touchaient entre autres les habiletés perceptives, l'attention, l'imagination et le langage. La durée totale du protocole d'entraînement était de deux mois. Les résultats démontrent que les sujets des groupes A et AMT ont amélioré leur  $\dot{V}O_2\text{max}$  de 12 et 11% respectivement à la suite du protocole d'entraînement ( $p < 0.05$ ). Les groupes MT et C n'ont pas vu cette variable être modifiée. Quant au test de mémoire (Wechsler Memory Scale), il a été amélioré de 8.5, 7.4 et 9.2% respectivement pour les groupes AT, MT et AMT ( $p < 0.01$ ). L'amélioration moyenne était statistiquement plus importante pour le groupe AMT ( $p < 0.001$ ). Le groupe contrôle s'est amélioré de 0.8% sans que ce ne soit statistiquement significatif. Cette étude démontre donc que l'entraînement aérobie qui induit une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  permet à des sujets âgés de 60 à 76 ans d'améliorer leur mémoire telle

que mesurée par le Wechsler Memory Scale. Des améliorations semblables peuvent être signalées à la suite d'un entraînement cognitif. De plus, il apparaît que la combinaison des deux types d'entraînement est davantage efficace. Ces résultats sont obtenus après un protocole de 2 mois à raison de 2 séances aérobies et d'une séance cognitive par semaine.

### Méta-analyses

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été publiées sur le lien entre l'activité physique et les performances cognitives. Les résultats n'étant pas toujours sans équivoque lorsque comparés les uns aux autres et afin de mieux quantifier les effets observés, certains auteurs ont proposé récemment des méta-analyses sur le sujet.

D'abord, un premier travail rétrospectif paraît en 2003 rapportant les résultats d'une recherche faite sur les études d'intervention publiées entre 1996 et 2001 dont les participants étaient âgés de 55 à 80 ans (191). Au total, 167 articles ont d'abord été analysés mais 18 d'entre eux ont finalement été retenus. Les critères d'exclusion étaient les suivants : études transversales, sujets assignés non-aléatoirement, entraînement physique non supervisé, entraînement qui ne comprend pas une partie aérobie, sujets âgés de moins de 55 ans. Au total, 197 sujets (101 dans les groupes expérimentaux et 96 dans les groupes contrôles) ont fait partie des analyses. Les résultats de cette méta-analyse sont très intéressants. D'abord, il en ressort que les sujets ayant bénéficié d'un entraînement physique sont toujours avantagés par rapport aux sujets des groupes contrôles concernant les performances cognitives ( $ES = 0.48$  vs  $0.16$ ,  $p < 0.05$ ). Les fonctions cognitives qui semblent les plus sensibles aux effets de l'entraînement physique sont les fonctions exécutives ( $ES = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ) ce qui est très intéressant considérant que ces qualités sont particulièrement altérées par le vieillissement (181, 202, 203). De plus, il apparaît que les méthodes d'entraînement les plus efficaces sont celles qui combinent à la fois le développement des aptitudes aérobies et des qualités neuromusculaires ( $ES = 0.59$ ,  $p < 0.05$ ). Cependant, l'entraînement aérobie prescrit seul semble donner aussi de bons résultats ( $ES = 0.41$ ,  $p < 0.05$ ). Des entraînements d'une durée de 4 à 12 semaines sont efficaces ( $ES = 0.52$ ,  $p < 0.05$ ) mais les entraînements de plus de 6 mois le sont davantage ( $ES = 0.67$ ,  $p < 0.05$ ). De plus la durée optimale de chaque séance semble être de 31 à 45 minutes ( $ES = 0.61$ ,  $p < 0.05$ ). Enfin, le groupe d'âge le plus sensible aux effets de l'entraînement physique semble être celui compris dans la fourchette 66 à 70 ans ( $ES = 0.69$ ,  $p < 0.05$ ). Cependant, les autres groupes d'âge

Études transversales				
Auteurs	Participants (n)	Âge	Mesure AP	Fonctions cognitives
Renaud et al. (194)	110	60-79	Rockport	Préparation à répondre
Boucard et al. (187)	60	60-81	Rockport	Inhibition
Erickson et al. (195)	165	59-81	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Mémoire spatiale Préservation du volume de l'hippocampe
Benedict et al. (196)	331	75	Auto-rapporté	Cognition générale Fluidité verbale Inhibition Maintien du volume cérébral
Études longitudinales				
Yaffe et al. (197)	5925	≥65	Auto-rapporté	Cognition générale
Larson et al. (198)	1740	≥65	Auto-rapporté	Apparition retardée de démence et Alzheimer
Barnes et al. (200)	349	59-88	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Cognition générale Attention Fonctions exécutives
Wendell et al. (199)	1400	19-94	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Mémoire
Interventions				
Kramer et al. (201)	124	60-75	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Flexibilité Inhibition
Fabre et al. (204)	32	60-76	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Mémoire
Voelcker-Rehage et al. (205)	44	62-79	T. max. inc. ( $\dot{V}O_2\text{max}$ )	Fonctions exécutives

Tableau III – Études répertoriées qui soutiennent l'hypothèse cardiovasculaire

AP : Activité physique

T. max. inc. : Test maximal incrémenté

bénéficient aussi de ce type d'intervention (55 à 65 ans : ES = 0.29,  $p < 0.05$ ; 71 à 80 ans : ES = 0.55,  $p < 0.05$ ). Malgré la pertinence de cette étude, il est clair que les résultats ne permettent pas de conclure quant à la validité de l'hypothèse cardiovasculaire. Il est vrai que cette méta-analyse suggère que l'entraînement de l'aptitude aérobie est associé à de meilleures performances cognitives. Cependant, pour appuyer sans réserve l'hypothèse cardiovasculaire, il faudrait être assuré que ces entraînements ont induit des améliorations de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ ; ce que les données présentées ne permettent pas de faire. De plus, le fait que l'entraînement combiné de la force et de l'aptitude aérobie soit associé à de meilleures performances cognitives en comparaison à un simple entraînement aérobie laisse à croire que des mécanismes physiologiques autres que des améliorations de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  sont en cause.

En 2008 paraissait une autre méta-analyse qui offre des pistes de réponses complémentaires aux données avancées précédemment (193). Un total de 11 essais cliniques randomisés ont été inclus dans cette analyse portant sur des sujets de plus de 55 ans qui révèle que les programmes d'entraînement aérobie qui induisent une amélioration moyenne de 14% de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  sont associés à des améliorations cognitives (fonctions motrices, mémoire, attention). De plus, ces auteurs suggèrent que l'intensité plutôt que le volume des entraînements devrait être au centre des préoccupations afin d'induire un effet optimal sur la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Cette indication repose sur des bases scientifiques reconnues (161). Ces observations laissent croire que l'hypothèse cardiovasculaire est valide mais il demeure difficile de confirmer une relation cause/effets.

En 2010, une nouvelle méta-analyse est publiée, cette fois rapportant des résultats plus modérés (192). En effet, 29 études ont été regroupées dans cette analyse totalisant plus de 2000 sujets. Les essais randomisés chez des sujets de plus de 18 ans dont le traitement de plus d'un mois incluait un entraînement aérobie étaient inclus. La taille des effets de l'intervention est plutôt modérée pour l'attention et la vitesse de traitement ( $g=0.16$ ,  $p=0.003$ ) ainsi que pour les fonctions exécutives ( $g=0.12$ ,  $p=0.018$ ) et la mémoire ( $g=0.13$ ,  $p=0.026$ ) alors que la mémoire de travail ne semble pas affectée par ces interventions ( $g=0.03$ ,  $p=0.642$ ). Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que des interventions combinées sont plus efficaces que seul l'entraînement aérobie (attention et vitesse de traitement :  $g=0.35$  vs.  $0.10$ ,  $p=0.026$ ; mémoire de travail :  $g=0.29$  vs.  $-0.04$ ,  $p=0.028$ ). Il est également intéressant de constater que la durée de l'intervention de même que l'intensité de l'entraînement ne semblent pas être des modérateurs déterminant des résultats observés. De plus, il ressort que les participants démontrant des déficits cognitifs légers peuvent particulièrement bénéficier de ces interventions pour améliorer la mémoire en comparaison avec les participants dont les fonctions cognitives ne sont pas altérées. ( $g=0.23$  vs.  $g=0.10$ , tendance seulement). Les auteurs attribuent une partie de ces effets moins favorables à l'égard des bienfaits de l'entraînement en lien avec le rejet de deux études qui ne satisfaisaient pas les exigences d'un essai clinique randomisé alors que celles-ci avaient été analysées par d'autres groupes de travail. Par ailleurs, l'ajout de jeunes adultes peut aussi avoir influencé les conclusions présentées. À cet égard, seulement 4 études sur les 29 répertoriées rapportent des résultats qui ne sont pas spécifiques aux aînés.

Ensemble, les résultats de ces méta-analyses suggèrent un effet modéré de l'entraînement aérobie sur les fonctions cognitives des aînés. Cependant, le constat selon lequel des activités complémentaires semblent procurer un avantage suggère que l'hypothèse cardiovasculaire à elle seule ne peut expliquer en totalité les gains observés en regard des fonctions cognitives.

#### Critique de l'hypothèse cardiovasculaire

Une étude parue en 2008 vient remettre en question cette hypothèse cardiovasculaire (206). 57 sujets sains âgés au minimum de 64 ans ont été aléatoirement divisés en deux groupes expérimentaux. Le groupe aérobie (A) incluait 28 participants alors que les 29 autres candidats ont été inclus dans le groupe musculation (M). Les sujets devaient participer à un programme d'entraînement physique d'une durée de 10 mois à raison de 3 séances de 60 minutes par semaine. Pour les deux groupes, chaque entraînement commençait par 10 minutes d'activation (augmentation de la fréquence cardiaque et étirements) et se terminait par 10 minutes de retour au calme (travail d'équilibre et étirements). Les participants du groupe A devaient compléter 25 à 30 minutes d'exercices aérobies sur un appareil de leur choix (tapis roulant, appareils elliptiques, ergocycles, rameur, etc.). L'entraînement était continu et l'intensité était prescrite en fonction de la fréquence cardiaque de réserve et d'une échelle de perception de l'effort (13 à 15/20). Quant au groupe M, ces sujets étaient invités à participer à des exercices de Tai Chi et de musculation en utilisant des élastiques et des poids libres. Les principaux groupes musculaires étaient visés grâce à un programme de 8 à 10 exercices de 10 à 15 répétitions. La batterie de tests pré et post entraînement comprenait une évaluation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  estimée à partir d'un test incrémenté sur tapis roulant. Les fonctions cognitives ont été évaluées à partir de tests visant 4 domaines cognitifs : temps de réaction simple/vitesse, habiletés visuo-spatiales, attention contrôlée et fonctions exécutives. Les résultats démontrent que les deux groupes ont amélioré de façon significative la  $\dot{V}O_2\text{max}$  (A = 18%, M = 13%;  $p=0.001$ ). Aucune différence entre les groupes n'est signalée à l'évaluation initiale ni à la fin de l'entraînement. Quant aux fonctions cognitives, seules les fonctions exécutives ont été améliorées à la suite de l'entraînement ce qui semble confirmer l'hypothèse avancée auparavant (190, 191). En regard de l'hypothèse cardiovasculaire, il est à noter que seuls les sujets du groupe A ont démontré une amélioration de ces fonctions. Considérant que le groupe M a également amélioré la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , sans différence significative en comparaison au groupe A, il est ici permis de remettre en question l'hypothèse cardiovasculaire. L'augmentation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  max de 13% observée pour le groupe M correspond par ailleurs aux conclusions d'une méta-analyse qui propose que des gains moyens de

14% sont reliés à des meilleures performances cognitives (193). De plus, aucune corrélation significative entre les variations de  $\dot{V}O_2\text{max}$  et les variations dans les performances cognitives chez les sujets du groupe A n'a été rapportée. Les données de cette étude ne permettent donc pas de valider l'hypothèse cardiovasculaire. Cependant, il est possible de remettre en question l'évaluation de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  qui est basée sur une estimation ce qui ne permet pas de détecter avec autant de précision les variations possibles entre des sujets qui atteignent les mêmes intensités de travail lors du test (75).

Cette remise en question vient appuyer les conclusions d'une méta-analyse (37 études, 1306 sujets) publiée en 2006 (188). Malgré que ces auteurs rapportent une association positive entre l'activité physique et la cognition ( $p < 0.05$ ), il apparaît que les avantages en termes de cognition que possèdent les individus actifs ne sont pas déterminés par les différences observées pour la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Les auteurs proposent que cet indicateur de la condition physique ne représente qu'un intermédiaire qui entraîne une série d'événements physiologiques associés plus directement à de meilleures performances cognitives.

## Hypothèses alternatives

### *Activité physique et adaptations moléculaires*

Tel que mentionné dans la section précédente, il apparaît que l'hypothèse cardiovasculaire peut être remise en question dans la mesure où les variations de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  à la suite d'un entraînement physique ne semblent pas toujours expliquer les modifications observées dans les performances cognitives. Il est alors proposé que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  ne représente en fait qu'un témoin indirect de changements moléculaires, survenant à la suite d'un entraînement physique, qui modifient les structures cérébrales.

D'abord, notons une régulation à la hausse des *Brain Derived Neurotrophic Factor* (BDNF) chez l'animal à la suite d'un entraînement physique (207-209). Neeper (209) est le premier à rapporter que l'activité physique induit une augmentation de la production des BDNF et ce particulièrement dans l'hippocampe. Ces neurotrophines sont des protéines qui agissent comme médiateurs dans la protection des neurones dans le cadre du vieillissement (207). Les BDNF participent aussi à la synaptogenèse et à la neurogenèse (210, 211). L'effet de ces BDNF sur la mémoire et l'apprentissage a été récemment démontré chez l'être humain (211). De plus, il apparaît que l'activité physique induit des effets bénéfiques sur les neurotransmetteurs. Les niveaux de

sérotonine sont augmentés à la suite d'un programme d'activité physique chez le rat. Cette adaptation est très importante dans la mesure où des niveaux élevés de sérotonine sont associés à une prolifération neuronale (210, 211). Il semble également que l'exercice permet une augmentation des récepteurs à la dopamine. Chez le modèle animal, il est suggéré que cette adaptation réduise l'incidence de la maladie de Parkinson (211). Par ailleurs, l'IGF-1 (insulin-like growth factor 1) est un biomarqueur associé à l'activité physique, à l'hypertrophie musculaire, à la densité minérale osseuse, aux risques de mortalité, au cancer et aux fonctions cognitives (212). Cette hormone est reconnue comme étant un facteur neuroprotecteur (213) associé à la croissance neuronale (212). De plus, des récepteurs d'IGF-1 ont été trouvés en abondance dans le cortex préfrontal et l'hippocampe (214). Chez les animaux (rats) qui présentaient des déficiences en IGF-1, l'injection de ce composé permettait à ces espèces de retrouver des fonctions mnésiques normales (212). Chez l'être humain, il apparaît que l'IGF-1, dont les concentrations diminuent avec l'âge, joue aussi un rôle sur les fonctions cognitives; de faibles concentrations étant associées à de faibles performances cognitives particulièrement dans le domaine de la vitesse de traitement de l'information (215, 216). Enfin, le rôle des VEGF (facteurs de croissance de l'endothélium vasculaire) dans la neurogénèse de l'hippocampe animal à la suite de l'exercice est bien reconnu (217) (218).

À cet égard, des auteurs proposaient récemment que la réserve cérébrovasculaire pouvait représenter un facteur déterminant de la relation entre l'activité physique et la cognition chez les aînés (219). Cette réserve est définie comme étant la propriété des vaisseaux sanguins de s'adapter aux stimulations de l'environnement immédiat (variations métaboliques, chimiques, mécaniques ou neurologiques). Cette caractéristique est très importante considérant que le cerveau utilise 15% du  $\dot{Q}_c$  et 20% de l'oxygène et des nutriments fournis par le système cardiovasculaire. Ces demandes métaboliques élevées associées au manque de ressources énergétiques immédiates impliquent donc une régulation précise du débit sanguin cérébral. Cette observation est d'autant plus importante que ce débit sanguin cérébral au repos diminue de  $4 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{année}^{-1}$  à partir de la 3<sup>e</sup> décennie (219). Ces auteurs proposent donc que l'activité physique chronique induit une diminution de la pression sanguine et du stress oxydatif de même qu'une augmentation de l'activité antioxydante ce qui contribue à une meilleure santé cérébrovasculaire. Il est ainsi suggéré que ces adaptations favorisent l'expression hormonale et neurotrophique (IGF-1 et BDNF) qui engendre à son tour une neurogénèse et une synaptogenèse associées à un meilleur fonctionnement cognitif (219).

### *Entraînement de la force et cognition*

Indépendamment de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , il apparaît que les qualités neuromusculaires peuvent aussi être associées avec les fonctions cognitives. Comme dans le cas de l'hypothèse cardiovasculaire, différents protocoles de recherche suggèrent que les individus qui présentent les meilleures qualités neuromusculaires sont avantagés lorsque leurs performances cognitives sont examinées.

Dans cette perspective, 41 femmes de 64 à 96 ans ont été invitées à participer à un projet de recherche visant à déterminer si la force des membres inférieurs contribuait, indépendamment de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , à la variabilité observée pour les performances cognitives (220). Dans une analyse par régression, les résultats de cette étude suggèrent que la force isométrique des extenseurs de la jambe est associée à l'attention et la mémoire de travail alors que la filière aérobie, telle qu'appréciée à l'aide d'un test de marche de 6 minutes, est davantage associée à l'inhibition. Bien que la validité de ce test de marche pour apprécier la  $\dot{V}O_2\text{max}$  ait été remise en question (83), il n'en demeure pas moins que cet effort est associée à une intensité relative d'environ 80% de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  (221). Il est par ailleurs très intéressant de constater qu'une corrélation partielle modérée ( $r=0.26$ , âge en covariable) est rapportée entre la force des membres inférieurs et la performance au test de marche ce qui suggère que des mécanismes communs expliquent ces performances (niveau de pratique d'activités physiques). Cependant, la corrélation modérée suggère également que ces qualités sont distinctes ce qui est tout à fait attendu considérant les mécanismes physiologiques sous-jacents. Alors que cette étude ne permet pas d'établir de façon claire une relation de cause à effets entre les variables étudiées, il n'en demeure pas moins que ces résultats suggèrent que les qualités neuromusculaires peuvent être associées, indépendamment de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , aux fonctions cognitives chez les aînés.

Par ailleurs, dans une étude longitudinale, 970 participants américains âgés de 54 à 100 ans (241 hommes), ont été suivis pendant plus de 3 ans (222). Durant cette période, 138 participants ont développé la maladie d'Alzheimer. Dans un modèle de prédiction du risque de souffrir de cette maladie ajusté pour l'âge, le sexe et le niveau d'éducation, les participants les plus forts démontraient un risque moins important de développer la maladie. Cette relation était maintenue lorsque des covariables ont été ajoutées au modèle (indice de masse corporelle, niveau de pratique d'activités physiques, fonction pulmonaire, facteurs de risques cardiovasculaires et statut de l'apolipoprotéine E4). De plus, un niveau plus élevé de force musculaire était associé à un déclin plus lent des fonctions cognitives ainsi qu'à une diminution du risque de développer des troubles cognitifs légers. Bien que les mécanismes à la base de cette relation entre les qualités neuromusculaires et les fonctions



cognitives ne soient pas clairement établis, il est suggéré par ces auteurs que des atteintes aux structures cérébrales et au système nerveux central peuvent altérer la capacité de production de force musculaire (222). Cependant, la méthodologie proposée n'est pas suffisante pour conclure quant à la direction de cette relation.

À cet effet, des études d'intervention permettent de vérifier la validité d'une éventuelle relation de causalité entre les gains en force et des améliorations cognitives. Dans une récente publication, l'équipe de Liu-Ambrose (223) rapporte les résultats d'une étude impliquant 155 femmes de 65 à 75 ans réparties aléatoirement dans 3 groupes. Un premier groupe était invité à une séance hebdomadaire de développement de la force (1RT) alors que le 2<sup>e</sup> groupe expérimental participait à deux séances par semaine (2RT). Enfin, un groupe contrôle exécutait des exercices d'équilibre et de stabilisation de la ceinture lombo-pelvienne 2 fois par semaine (E). Le protocole d'entraînement s'échelonnait sur une période de 12 mois. Chaque séance durait 60 minutes et consistait en 10 minutes d'activation, 40 minutes d'exercices en musculation (ou d'équilibre) et 10 minutes de retour au calme. Les exercices (10) en résistance visaient les principaux groupes musculaires à raison de 2 séries de 6 à 8 répétitions. Des poids libres et des appareils guidés étaient utilisés pour les exercices. Avant et après l'entraînement, les participantes étaient conviées à des séances de tests visant à déterminer les performances cognitives (flexibilité attentionnelle, mémoire de travail et attention sélective) et les fonctions neuromusculaires (force maximale et puissance de membres inférieurs). Les résultats démontrent que les sujets des groupes 1RT et 2RT ont amélioré significativement leur attention sélective et ce davantage que le groupe E à la suite de l'intervention ( $p < 0.01$ ). La force maximale des membres inférieurs n'a pas été modifiée à la suite de l'intervention mais la puissance a été améliorée pour le groupe 2RT ( $p < 0.001$ ). Cette étude tend donc à démontrer qu'un protocole d'entraînement de la force musculaire de 12 mois à raison d'une ou deux séances par semaine qui induit une amélioration de la puissance des membres inférieurs est associé à de meilleures performances dans le domaine de l'attention sélective. Cet effet ne se manifeste pas pour la flexibilité attentionnelle et la mémoire de travail.

Dans la même perspective, un protocole d'entraînement de la force a été proposé à 62 hommes de 65 à 75 ans (224). L'entraînement était d'une durée de 24 semaines à raison de 3 séances hebdomadaires de 60 minutes. Alors que 23 participants se sont retrouvés dans un groupe contrôle (séances d'étirements), les autres sujets ont été divisés en deux groupes expérimentaux qui se

différençaient par l'intensité des entraînements en force (n = 19, 50% du 1RM; n = 20, 80% du 1 RM). En plus des gains en force exclusifs aux groupes expérimentaux (sans différence significative entre ces deux groupes), les auteurs rapportent des améliorations de la mémoire (court et long terme) ainsi que du raisonnement verbal seulement chez les participants entraînés en force. Les sujets des groupes expérimentaux démontraient par ailleurs des concentrations sanguines en IGF-1 significativement plus élevées par rapport au groupe contrôle à la suite de l'intervention ( $p < 0.001$ ). Il semble donc que la régulation à la hausse de l'IGF-1 à la suite de l'entraînement en musculation pourrait expliquer en partie les effets positifs induit par ce type d'entraînement sur les performances cognitives.

À cet égard, une étude sur le modèle animal est très révélatrice (225). Des rongeurs ont ainsi été soumis à un entraînement en force ou à un entraînement aérobie durant 8 semaines à raison de 5 séances hebdomadaires. Les animaux entraînés en force devaient grimper sur une échelle verticale de 110 cm de hauteur avec une résistance attachée à leur queue. Initialement, la charge correspondait à 50% du poids de l'animal et était progressivement augmentée jusqu'à 100%. Les animaux devaient effectuer 8 montées par séance avec un repos de 60 secondes entre chaque série. Ces séances duraient de 20 à 30 minutes au total. Pour l'entraînement aérobie, les animaux devaient courir sur tapis roulant. Après une période d'activation de 5 min à une vitesse de 10  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , l'intensité était augmentée à 15  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  durant 25 minutes pour la première semaine d'entraînement avant de passer à 20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  pendant 30 minutes lors de la dernière semaine du protocole. Les fonctions cognitives (mémoire spatiale) étaient évaluées lors d'une tâche dans laquelle les rongeurs devaient retrouver, après avoir été plongés dans une piscine (diamètre de 1m70, profondeur de 60 cm), une plate-forme leur permettant d'être au sec. Une période de familiarisation était offerte à chaque animal afin d'assurer l'apprentissage de la tâche. La performance des animaux entraînés lors de cette tâche était comparée à celle de rongeurs inclus dans un groupe contrôle. Les résultats démontrent que les animaux entraînés parvenaient, une fois dans la piscine, plus rapidement et par un chemin plus court à la plate-forme. De plus, le temps passé dans la zone de la plate-forme était plus élevé chez les rongeurs entraînés. Ces résultats sont interprétés comme étant un effet positif de l'entraînement, et ce peu importe la stimulation, sur la mémoire spatiale. Par contre, il ressort que les adaptations moléculaires induites par l'entraînement sont spécifiques à la stimulation présentée. Alors que les animaux ayant subi l'entraînement aérobie sont associés à une expression plus marquée des BDNF dans l'hippocampe à la suite de l'entraînement, il semble plutôt que l'entraînement en

force soit associé davantage à une augmentation de l'expression des IGF-1 et de leurs récepteurs dans l'hippocampe. Ces résultats suggèrent donc que des voies métaboliques spécifiques sont activées en fonction de l'activité physique pratiquée et permettent, chacune à leur façon, une amélioration des performances cognitives (225).

#### *Entraînement de la motricité globale et cognition*

En plus des entraînements en force et des entraînements de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , il a été récemment proposé que des séances visant le développement de la motricité globale permettent également d'améliorer les fonctions cognitives chez les aînés.

Dans une étude très intéressante, 44 participants âgés de 62 à 79 ans ont été invités à participer à une intervention de 12 mois dont l'objectif était de comparer les effets d'un entraînement aérobie à ceux induits par un entraînement de la coordination sur les fonctions cognitives (205). Les participants du groupe aérobie devaient marcher sur tapis roulant à une intensité correspondant au seuil ventilatoire. L'entraînement de la coordination consistait en une série d'exercices visant le développement de l'équilibre, de la coordination œil-main et bras-jambe ainsi que de l'orientation spatiale. Un groupe contrôle était formé de sujets impliqués dans un programme de relaxation et d'étirements. Les entraînements avaient lieu trois fois par semaine à raison d'environ 60 minutes par séance. Alors que seul le groupe aérobie a amélioré la  $\dot{V}O_2\text{max}$  de façon significative en comparaison aux groupes coordination et relaxation (+15.7% vs +6.4 et -9.2;  $p=0.01$ ), il est intéressant de constater que les fonctions exécutives ont été améliorées de façon similaire pour les groupes aérobie et coordination. Par contre, il apparaît que les mécanismes d'adaptation diffèrent selon le traitement. En effet, les résultats neurophysiologiques démontrent que l'intervention aérobie était associée à une plus grande activation du réseau sensorimoteur alors que c'est plutôt le réseau visuo-spatial qui a bénéficié de l'entraînement en coordination. De plus, les deux interventions ont mené à une réduction de l'activation du cortex préfrontal lors de l'exécution d'une tâche cognitive ce qui a été interprété comme étant une démonstration de la plus grande efficacité dans le traitement de l'information (205).

Ces résultats sont appuyés par une étude plus récente qui compare cette fois un entraînement en force à un entraînement de la motricité globale (226). Les effets de cette intervention ont été vérifiés sur 42 participants de 65 à 75 ans. Les sujets devaient compléter un programme de 3 mois à raison de deux séances de 60 minutes par semaine. L'entraînement en force

comprendait une douzaine d'exercices impliquant le haut et le bas du corps. Il était demandé aux sujets de réaliser 3 séries de 8 répétitions de chaque mouvement à une intensité variant de 60 à 80% du 1 RM. Les participants de l'autre groupe expérimental devaient plutôt réaliser des exercices visant le développement de l'équilibre, de la coordination et de l'agilité. Les résultats démontrent que tous les participants, peu importe l'intervention, ont amélioré les fonctions exécutives et plus précisément l'inhibition. Cependant, une analyse à posteriori révélait que les gains en force des fléchisseurs de la jambe représentaient un médiateur de la relation entre l'entraînement en force et les améliorations cognitives. Cette étude suggère donc également un effet bénéfique de l'entraînement de la motricité globale sur les fonctions cognitives (226).

Les résultats présentés dans cette section proposent que l'hypothèse cardiovasculaire, bien qu'elle demeure pertinente, ne permet pas d'expliquer en totalité la relation positive qui est mise de l'avant entre la pratique régulière d'activités physiques et la cognition chez les aînés. Par différents mécanismes qui passent par la contribution de voies métaboliques/moléculaires et l'activation de régions cérébrales spécifiques, l'entraînement des qualités neuromusculaires ou de la motricité globale semble représenter des stimulations appropriées pour améliorer les fonctions cognitives malgré l'avancée en âge. Cependant, quelques limites ressortent de ces protocoles et ce principalement en lien avec l'entraînement de la motricité globale. D'abord, il est évident que la quantification des exercices prescrits fait défaut en comparaison avec la prescription habituelle de l'activité physique. En ce sens, afin de mieux comprendre la relation entre le traitement et ses bénéfices, il semble important de mieux préciser la charge d'entraînement autant en ce qui concerne le volume que l'intensité. Pour l'instant, les rapports cités ne font qu'une mention générale des exercices de la motricité globale. Par ailleurs, si des effets bénéfiques sont rapportés sur les fonctions cognitives, il n'en demeure pas moins qu'une mesure objective des effets de l'entraînement de la motricité globale apparaît nécessaire. De la même façon que l'efficacité d'un entraînement aérobie est démontrée en soulignant les améliorations de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , les bénéfices de l'entraînement de la motricité globale doivent aussi être démontrés sur les qualités visées (équilibre, coordination, agilité, etc.).

### Études transversales et longitudinales

Auteurs	Participants (n)	Âge	Mesure AP	Fonctions cognitives
Scherder et al. (220)	41	64-96	Force	Attention Mémoire de travail
Boyle et al. (222)	970	54-100	Force	Incidence Alzheimer moindre Maintien cognition générale
<b>Interventions</b>				
Liu Ambrose et al. (223)	155	65-75	Force	Fonctions exécutives
Cassilhas et al. (224)	62	65-75	Force	Mémoire Raisonnement verbal
Voelcker-Rehage et al. (205)	44	63-79	MG	Fonctions exécutives
Forte et al. (226)	42	65-75	Force + MG	Inhibition

Tableau IV – Études répertoriées qui suggèrent un lien entre les qualités neuromusculaires, la motricité globale et les fonctions cognitives  
 AP : Activité physique  
 MG : Motricité globale

### 1.3.2. Relations entre la cognition et la mobilité

Les récents rapports qui suggèrent un effet bénéfique de l'entraînement de la motricité globale sur les fonctions cognitives des aînés sont très intéressants dans la mesure où ils viennent appuyer certaines observations qui démontraient un lien évident entre la mobilité et la cognition. Alors que la littérature propose que le contrôle postural nécessite une partie des ressources attentionnelles (183), il semble également que des tests de mobilité générale comme le *Timed Up and Go* (TUG) et la vitesse de marche spontanée sont étroitement associés avec les fonctions exécutives (227). Par ailleurs, notons particulièrement cet article dont le titre est fort révélateur : *stops walking when talking* (228). En effet, ces chercheurs ont remarqué qu'en clinique, certains aînés devaient arrêter de marcher lorsqu'une conversation était entamée. Cette observation suggère que la marche requiert de l'attention et que ces sujets doivent s'arrêter quand vient le temps de faire deux choses en même temps pour éviter une éventuelle chute. En effet, ces mêmes aînés qui ne pouvaient maintenir la marche tout en discutant étaient les plus à risques de chuter lors d'un suivi fait durant une période de 6 mois (228).

#### Paradigme de la double tâche

D'abord, d'un point de vue méthodologique, il est important de considérer le paradigme de double tâche qui est utilisé pour évaluer la relation entre la marche et l'attention. En considérant que les ressources attentionnelles sont limitées, la combinaison de deux tâches à effectuer simultanément devrait entraîner une diminution de la performance pour au moins une de ces deux tâches (théorie du partage des ressources attentionnelles – traduction libre : *capacity sharing*) si la

demande attentionnelle de ces deux tâches combinées excède les ressources disponibles (229). Il est proposé les ressources attentionnelles limitées induisent une augmentation du temps de traitement de l'information qui affectera la marche (stabilité, vitesse) et/ou la tâche cognitive (diminution du nombre de réponses, augmentation des fausses réponses). Cette théorie suggère également que le candidat a la possibilité d'accorder volontairement, à une des tâches, son attention de façon privilégiée en fonction du contexte immédiat. Cette stratégie pourrait entre autres contribuer à la prévention des chutes (229).

À cet égard, les résultats d'une étude présentée par Srygley et collègues (230) sont très intéressants. Dans cette recherche, 276 aînés (76,4 +/- 4,5 ans) et 52 adultes (24,1 +/- 2,7 ans) ont été invités à participer une performance en double tâche. Les fonctions cognitives ont été évaluées à partir des tâches de soustractions en série (3 et 7 chiffres) et de suivi de phonèmes. Pour la tâche mathématique, les sujets devaient réaliser le plus de soustractions en séries à partir d'un nombre à 3 chiffres. Par exemple dans le cas où on demande de soustraire 7 à partir de 241, le participant doit répondre à voix haute 234, 227, 220, 213, 206, 199 et ainsi de suite durant 2 minutes. Pour la tâche de suivi de phonèmes, les participants devaient écouter (via un casque d'écoute) une histoire et compter le nombre de fois que deux mots préalablement spécifiés avaient été présentés. De plus, les sujets étaient avertis que des questions de compréhension sur cette histoire allaient leur être posées à la fin. Dans tous les cas, ces tests ont d'abord été effectués en position assise. Les sujets devaient ensuite marcher à leur vitesse confortable préférée durant 2 minutes en faisant des allers et retours dans un corridor de 25 mètres de longueur. Une première séquence de marche était effectuée en simple tâche puis on répétait la marche en plus des tâches cognitives qui étaient présentées dans un ordre aléatoire. Aucune instruction n'était donnée aux participants quant à la tâche à prioriser. Les tâches mathématiques étaient évaluées en fonction du nombre total de soustractions et du nombre d'erreurs effectuées. Le suivi de phonème était évalué en fonction du compte de mots à suivre et du nombre de bonnes réponses aux questions de rappel. Enfin, les paramètres spatio-temporels de la démarche étaient évalués avec le système GAITrite (GAITrite Systems, PA, USA). Les résultats démontrent que les aînés ont obtenu des performances cognitives significativement inférieures lors de la double tâche en comparaison à la simple tâche pour tous les tests ( $p < 0,0001$ ). Les jeunes adultes ont quant à eux maintenu les performances cognitives en double tâche sauf pour la soustraction à 7 chiffres qui a été significativement altérée ( $p < 0,05$ ). De plus, les jeunes et les adultes ont démontré des diminutions significatives de la vitesse de marche lors de la double tâche

( $p < 0,0001$ ). Les auteurs concluent donc que les tâches cognitives sont altérées par la pratique simultanée de la marche. L'inverse est aussi vrai, les tâches cognitives nuisent à la pratique de la marche comme le démontre la vitesse moins élevée en double tâche. De plus, les personnes âgées semblent subir davantage que les jeunes ces effets négatifs de la marche sur les fonctions cognitives.

Ces résultats démontrent donc la pertinence du paradigme de double tâche dans un contexte d'évaluation intégrale de la mobilité. Cependant, des considérations méthodologiques quant au choix des tâches impliquées viendront influencer les résultats obtenus.

### Considérations méthodologiques

Dans cette perspective, une revue de la littérature scientifique sur ce sujet traite des aspects méthodologiques qui méritent une attention particulière (229). D'abord, il ne semble pas y avoir de consensus quant à la consigne qui doit être donnée en double tâche. Alors que certains auteurs demandent de prioriser une tâche, d'autres exigent plutôt qu'une attention égale soit apportée aux deux. Une meilleure uniformisation est également souhaitée dans les tâches cognitives proposées. Plusieurs tâches sont proposées sans qu'elles aient toutes les mêmes exigences en termes de ressources attentionnelles. Par exemple, le simple fait de maintenir une conversation est trop difficile pour des aînés fragiles qui marchent (228). Ils cessent donc de marcher pour se concentrer uniquement sur la tâche verbale et ainsi se protéger contre une éventuelle chute. La tâche doit donc être adaptée au niveau du participant. Elle doit être assez difficile sans pour autant créer une anxiété chez le participant. En ce sens, les tâches mathématiques peuvent être plus adaptées pour certains individus alors que les tâches phonologiques ou de fluidité verbale conviendraient davantage à d'autres types d'individus. Certains vont jusqu'à proposer une deuxième tâche motrice nécessitant de l'attention. Par exemple, on demande au participant de marcher en transportant un cabaret sur lequel reposent des verres remplis d'eau. Les variables étudiées sont la vitesse de marche, le nombre d'arrêts et la quantité d'eau renversée (231, 232). Dans tous les cas, une meilleure standardisation des protocoles permettrait une meilleure comparaison et analyse résultats présentés. Enfin, différentes conditions de test de marche peuvent être utilisées en autres en ce qui concerne la distance à parcourir (233). Alors que la vitesse de marche proposée est plus souvent qu'autrement celle qui correspond aux déplacements spontanés, il n'en demeure pas moins que la vitesse de marche maximale peut représenter un certain intérêt et ce particulièrement dans un contexte où une plus grande appréciation des qualités neuromusculaires des membres inférieurs est souhaitée (135).

La relation entre les ressources attentionnelles et la marche semble donc bien établie et indique que la performance dans ces deux tâches est altérée lorsqu'elles sont exécutées simultanément. Ce constat semble s'appliquer chez les aînés comme chez les jeunes adultes. Il apparaît que le vieillissement est marqué davantage par ce travail en double tâche. Une évaluation complète des différents paramètres de la marche doit donc inclure une composante cognitive afin d'assurer à l'individu un diagnostic précis de ses aptitudes. Le choix de la tâche cognitive doit être fait de façon éclairée en fonction des objectifs poursuivis puisque de nombreuses possibilités sont offertes aux chercheurs et cliniciens. Un souci d'adaptation au niveau du patient doit guider la décision prise.

#### **1.4. Résumé de la revue de la littérature et pertinence de la thèse**

Le maintien de la mobilité chez les aînés est d'une importance cruciale afin de permettre à chaque individu de profiter d'une qualité de vie optimale. La présente revue de la littérature a mis en évidence le rôle du CE en tant que déterminant de la mobilité chez les aînés. Ce rôle semble par ailleurs être d'autant plus important que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  est prise en considération. Il a été démontré que l'interaction de ces deux facteurs contribuait de façon importante au maintien de la vitesse spontanée de marche et ce spécialement dans un contexte où la  $\dot{V}O_2\text{max}$  atteint des valeurs particulièrement basses (un seuil a été fixé à  $18 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ). Afin de quantifier cette interaction CE/ $\dot{V}O_2\text{max}$ , le concept d'énergie potentielle a été proposé en étant défini comme une réserve d'énergie permettant à un individu de prendre part à un registre d'activités physiques dont les intensités dépassent l'effort associé à la marche spontanée. Par ailleurs, il a été démontré que les qualités neuromusculaires représentaient aussi un déterminant significatif de la mobilité et de la prévention des chutes chez les aînés. Considérant que ces trois composantes (CE,  $\dot{V}O_2\text{max}$  et qualités neuromusculaires) sont susceptibles d'être altérées avec l'avancée en âge, il apparaît évident qu'un suivi étroit de ces qualités doit être mis en place afin d'assurer les diagnostics et interventions appropriés. Parmi ces interventions, il est bien reconnu que l'entraînement aérobic et de la force musculaire induit des adaptations favorables au maintien de la mobilité. Particulièrement, l'entraînement par intervalles à haute intensité combiné à un entraînement en force semble représenter une stratégie fort prometteuse pour améliorer la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , réduire le CE et ainsi augmenter l'énergie potentielle. Curieusement, ces interventions visant plus traditionnellement la condition physique sont aussi associées à l'amélioration des fonctions cognitives. En plus des entraînements de type aérobic, il est maintenant assez bien reconnu que des entraînements en force



et des activités de développement de la motricité globale favorisent de meilleures performances cognitives et ce plus spécifiquement celles reliées aux fonctions exécutives. Justement, il est aussi bien admis que le maintien de la mobilité ne se limite pas qu'aux déterminants de la condition physique. En effet, les fonctions exécutives semblent être associées à la performance lors de différents tests de marche. Considérant que le vieillissement peut être marqué par de moins bonnes performances cognitives, il est suggéré qu'une évaluation complète de la mobilité d'un aîné doit impliquer un test mesurant simultanément les performances cognitives et fonctionnelles à la marche. Ce concept de double tâche représente une méthodologie relativement conviviale permettant, entre autres, de cibler les individus les plus à risque de chuter.

Devant ces constats, quelques questions demeurent. D'abord, notons les considérations méthodologiques entourant la mesure du CE. Typiquement effectuées en laboratoire sur tapis roulant, il peut être suggéré que ces mesures ne représentent pas un idéal et ce particulièrement en ce qui concerne la validité externe des résultats obtenus. À ce sujet, la littérature actuelle ne semble pas offrir de réponses claires quant aux comparaisons entre les tests sur tapis roulant ou directement sur le sol dans un environnement plus naturel. Par ailleurs, il semble que la relation entre la mobilité, les fonctions cognitives et la condition physique doit être précisée. Alors que la  $\dot{V}O_2\text{max}$  est typiquement associée à de meilleures performances cognitives, il est intéressant de vérifier si le CE ou d'autres variables neuromusculaires peuvent aussi contribuer directement au maintien des fonctions cognitives. De plus, les tests visant la mobilité des aînés sont nombreux. Il est suggéré de les comparer afin de vérifier si certains permettent de mieux distinguer les individus selon leurs caractéristiques physiques et cognitives. Comme différentes stratégies sont proposées pour améliorer les fonctions cognitives, il devient intéressant de comparer les effets de protocoles d'entraînement visant le développement combiné de la force et de l'aptitude aérobie ou des habiletés motrices globales. Plus spécifiquement, il semble justifié de vérifier comment la relation entre la vitesse de marche et les performances cognitives en double tâche évolue à la suite des différentes interventions. Il semble aussi intéressant de vérifier si des fonctions cognitives sont plus sensibles aux effets de ces entraînements. C'est donc sous cet angle que le cadre expérimental de cette thèse s'inscrit et trouve sa pertinence.

## 2. Cadre Expérimental

### 2.1. Description générale, objectifs et hypothèses

L'objectif général de cette thèse était donc de préciser les relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives dans une perspective de vieillissement sain.

Une première étude méthodologique (CÉMAST – Coût Énergétique de la Marche chez les Aînés : Sol vs. Tapis) a ainsi été mise en place dont le principal objectif était de comparer les mesures du CE obtenues lorsque la marche est pratiquée par des aînés sur tapis roulant ou directement au sol sur une piste intérieure. Un second objectif, dans une perspective de reproductibilité de la mesure, était de vérifier le niveau d'association entre les mesures du CE selon qu'elles aient été faites sur tapis roulant ou au sol. Les hypothèses de travail avançaient que le CE allait être plus élevé sur tapis roulant en comparaison avec les mesures au sol. Par ailleurs, il a été proposé que le niveau d'association allait être élevé entre les mesures. Cette étude s'est déroulée au centre ÉPIC (centre de médecine préventive et d'activité physique de l'Institut de Cardiologie de Montréal). Dans ce projet, 10 participants ont été randomisés dans une séquence d'évaluation tapis/sol alors que 10 autres participants ont fait la séquence inverse (sol/tapis). En conséquence, les participants devaient réaliser 2 séances expérimentales d'environ 60 minutes en plus d'une séance de familiarisation. Le protocole a été approuvé par les comités scientifiques et éthiques de l'Université de Montréal et de l'Institut de Cardiologie de Montréal. Tous les tests ont eu lieu au centre ÉPIC.

Dans une deuxième étude (IFACCE – Intervention : Force, Aérobic, Coût Énergétique et Cognition), mise en place au Centre de Recherche de l'Institut de Gériatrie de Montréal (CRIUGM), une intervention visant à améliorer la condition physique des participants a été proposée. D'abord, les variables d'intérêt ont été analysées avant l'intervention dans une approche transversale afin de déterminer les facteurs de la condition physique associés aux fonctions cognitives et à la mobilité (IFACCE-t). Les hypothèses de travail suggéraient d'abord que les individus les plus rapides lors des tests de mobilité allaient démontrer les meilleurs profils cognitifs et physiques. Par ailleurs, il a été proposé qu'en plus de  $\dot{V}O_2\text{max}$ , un faible CE et des paramètres de force plus élevés allaient être associés à un meilleur profil cognitif.

Par la suite, un deuxième objectif de ce projet était de comparer les effets d'un entraînement combiné des qualités neuromusculaires et de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  à un protocole visant le développement des

habiletés motrices globales (IFACCE). Il a donc été proposé que l'entraînement combiné de la force des membres inférieurs et de l'aptitude aérobie induirait une diminution du CE et une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Ainsi, l'augmentation de l'énergie potentielle observée permettrait à ces individus de libérer des ressources attentionnelles allouées à la marche pour améliorer les fonctions cognitives, de façon plus importante que les sujets impliqués dans le programme sur les habiletés motrices globales, lors d'une double tâche effectuée à différentes vitesses de marche.

Dans cette intervention, 51 participants ont été randomisés dans un des trois groupes d'entraînement. Alors qu'un groupe était invité à prendre part à des séances de développement de la motricité globale ainsi qu'à des exercices d'étirements et de relaxation, un autre groupe était soumis à un entraînement combiné de la force maximale des membres inférieurs et de l'aptitude aérobie (entraînement par intervalles à haute intensité). Un troisième groupe était soumis aussi à un entraînement combiné similaire à la seule différence que le protocole de développement de la force visait les membres supérieurs. Le programme, d'une durée de 10 semaines, impliquait 28 séances d'entraînement d'environ 60 minutes. Différents tests médicaux, neuropsychologiques et des paramètres de la condition physique étaient répartis en 3 séances réalisées avant et après l'intervention afin de mesurer les effets de celle-ci. Les candidats devaient donc participer à un grand total de 34 séances durant une période de 14 semaines. Le protocole a été approuvé par les comités scientifiques et éthiques du CRIUGM. Tous les tests et entraînements ont eu lieu au centre CRIUGM.

## 2.2. Rapports de recherche

### 2.2.1. Article #1 : CÉMAST

- **Berryman N**, Gayda M, Nigam A, Juneau M, Bherer L, Bosquet L. Comparison of the metabolic energy cost of overground and treadmill walking in older adults. Eur J Appl Physiol. 2012 May; 112 (5):1613-20.

## Abstract

We assessed whether the metabolic energy cost of walking was higher when measured overground or on a treadmill in a population of healthy older adults. We also assessed the association between the two testing modes. Participants (n=20, 14 men and 6 women aged between 65 and 83 years old) were randomly divided into two groups. Half of them went through the overground – treadmill sequence while the other half did the opposite order. A familiarization visit was held for each participant prior to the actual testing. For both modes of testing, 5 walking speeds were experimented (0.67, 0.89, 1.11, 1.33 and 1.67 m.sec<sup>-1</sup>). Oxygen uptake was monitored for all walking speeds. We found a significant difference between treadmill and track metabolic energy cost of walking, whatever the walking speed. The results show that walking on the treadmill requires more metabolic energy than walking overground for all experimental speeds (p<0.05). The association between both measures was low to moderate (0.17 < ICC < 0.65), and the standard error of measurement represented 6.9 to 15.7% of the average value. These data indicate that metabolic energy cost of walking results from a treadmill test does not necessarily apply in daily overground activities. Interventions aiming at reducing the metabolic energy cost of walking should be assessed with the same mode as it was proposed during the intervention. If the treadmill mode is necessary for any purposes, functional overground walking tests should be implemented to obtain a more complete and specific evaluation.

**Keywords:** walking, oxygen uptake, mobility, elderly.

## Introduction

The metabolic energy cost of locomotion is defined as the oxygen equivalent of the energy required to run/walk through a given distance at a submaximal speed (2, 6, 234). A U-shaped relationship between metabolic energy cost of walking (MECW) and speed of locomotion has been reported with optimal speed values ranging from 1.11 to 1.34 m.sec.<sup>-1</sup> (4-6, 13, 14, 235, 236).

However, some authors have questioned the nature of this U-shaped curve claiming that optimal walking should not be defined in terms of least metabolic cost per unit of distance traveled (5). Rather, it is suggested that data should be reported using the oxygen uptake/step frequency relationship which also gives a U-shaped curve when speed is kept constant (10, 11). This model is based on the hypothesis suggesting that there is a preferred rhythmical human behavior. When walking, it seems that humans tend to adopt a preferred step frequency determined by their resonant frequency in order to reduce muscle force requirements and minimize metabolic costs. In this model, lower limbs are presented as a pendulum (leg)/mass-spring (muscles and connective tissue) system. (9, 10).

In an interesting study (10), preferred walking speed was used to determine preferred step frequency. In the following experimental conditions, speed was kept constant but step frequency was modified (so stride length varied accordingly). It appeared that the combination of long stride/low frequency was associated with a higher MECW. Indeed, it led to a 46% increase in oxygen uptake in comparison with the preferred (optimal) step frequency. It seems that this strategy was less advantageous in comparison to a combination of short stride/high frequency. With the latest scenario, the difference in oxygen uptake with the preferred step frequency was 18%. The authors suggested that this difference could be explained by more instability related to the long stride/low frequency scenario and by a better utilization of elastic energy at higher step frequencies.

It was later suggested that the optimal step frequency was the result of the interaction between a self optimization strategy and a dynamical approach. While the dynamical approach refers to the stability humans are looking for in order to prevent a possible fall, the self optimization implies that humans are sensitive to the MECW and that it guides them in the adoption of a preferred walking cadence (11). In regard to that hypothesis, it was recently suggested that preferred step frequency selection relies upon two components. The authors proposed that the first adjustments in step frequency are made based on a pre-programmed mechanism which relies on the central nervous system to recall the appropriate gait pattern. Then, it is suggested that a self-optimization strategy helps with a fine tuning to adopt the most economical step frequency. Authors proposed that chemoreceptors and muscle groups IV afferents are involved in that fine tuning by giving some feedback integrated by the central nervous system in order to optimize walking (12).

In older adults, it appears that the whole speed-MECW curve is shifted upward showing that aging is associated with a less economical gait (6, 13, 14, 236). Mechanisms to explain this phenomenon could be related to neuromuscular factors (6, 236). Based on the dynamical approach (11), it could also be argued that older adults need to recruit more synergetic muscles to maintain a stable state and avoid a fall. Interestingly, from a functional perspective, it was recently reported in a group of older adults that, following a physical training intervention, a decrease in MECW was associated with improved gait speed and mobility performance (178). Accordingly, it appears that MECW represents a clinically significant physiological variable in the overall assessment of mobility in older adults.

For research purposes, MECW is usually assessed on a treadmill as this mode of testing allows for a better control on the environmental variables (temperature, humidity, etc.) and on the velocity of locomotion. Moreover, this mode of testing represents an accessible way to implement

multidisciplinary research (biomechanical, physiological, cognitive, etc.). However, it has been argued that, with specificity concerns, the assessment of MECW has to be done overground in order to reproduce the environment in which an individual has to live. Indeed, some authors reported that joint kinematic differences were observed between treadmill and overground walking (237). Moreover, an interesting study was published recently in which it was reported that an overground training program presents some advantages in comparison with a treadmill intervention in a population of older adults. Both protocols were executed on a flat surface (0% grade for the treadmill condition). Results from that study showed that participants who completed the 6 weeks overground training were able to walk 400 m faster and had a more favorable attitude toward training (as measured by a scale using 8 bipolar adjectives) in comparison with the control group who did a similar training on the treadmill (238). Regarding MECW differences between the two modes, no consensus exists to our knowledge in the scientific literature. While some authors report no difference between the two modes of testing (42), others suggest that MECW is higher overground (43). Recently, results were published for a small group of older adults showing that, contrary to previous observations, MECW was higher on the treadmill (44). However, it has to be mentioned that only one speed was assessed in both testing conditions.

Therefore, the aim of this study was to compare the metabolic energy cost of treadmill and overground walking at 5 speeds in a group of older adults. In addition, this study also assessed the association between the two modes of testing. We hypothesized that MECW would be significantly higher on the treadmill at all experimental velocities compared to overground walking. We also hypothesized that the association between the two modes of testing would be high.



## Methods

### Overview

This study was a crossover design in which 10 participants were randomized in the treadmill-overground sequence while another 10 participants followed the overground-treadmill order. Accordingly, each participant completed two testing sessions. Groups were matched for age and sex. Before the testing sessions, all subjects were invited to a familiarization session. The protocol was reviewed and approved by the Research Ethics Board in Health Sciences of the University of Montreal and by the Research Ethics Board of the Montreal Heart Institute. Testing and recruitment were made at the Cardiac Rehabilitation and Prevention Center of the Montreal Heart Institute.

### Participants

The eligibility criteria for participation were being 65 years and older and being available for all three sessions within a month. Participants were not included if they were taking medication with known major effects on gait and balance (benzodiazepines, neuroleptics, antidepressants) and if they were diagnosed with any clinically significant orthopaedic, neurological, cardiovascular or respiratory problems. Recruitment was made at the occasion of the participants' annual maximal graded walking test on a treadmill at the Cardiac Rehabilitation and Prevention Center of the Montreal Heart Institute. Fourteen men and 6 women (7 men and 3 women in each sequence) were included in this study. All participants were physically active and were involved 2 to 3 times per week in supervised activities (walking, jogging, badminton, swimming, volleyball, weight lifting) at the Cardiac Rehabilitation and Prevention Center of the Montreal Heart Institute. Their characteristics are presented in table V.

Eligibility criteria were verified during a phone call prior to the familiarization visit. Participants were then told to wear the same comfortable walking shoes for all three visits. To avoid

any residual fatigue induced by recent physical activity, participants were asked to refrain from strenuous exercise the day before the tests. They were also asked to arrive fully hydrated to the laboratory, at least three hours after their last meal.

#### Familiarization visit

All participants signed a written statement of informed consent. Then, participants had to experiment 5 walking speeds (0.67, 0.89, 1.11, 1.33 and 1.56 m.sec<sup>-1</sup>) on an indoor 140 meters track. During this visit, participants walked two minutes at every single speed. Pylons were placed every 10 meters on the track in order to give the participants an indication about their actual walking speed. A sound signal was produced (SoundForge, Sony Creative Software) every 14.9, 11.2, 9, 7.5 and 6.4 seconds respectively and the participants had to adjust their speed to reach a pylon every time they heard a sound. It was asked to the participants to maintain as much as possible a constant speed for each condition. A treadmill familiarization session was immediately following. Each participant had to walk on the treadmill for two minutes at each experimental speed. This familiarization visit lasted about 60 minutes.

#### Anthropometrical and physiological measures

Body composition was measured by electrical bioimpedance analysis to estimate lean body mass during the familiarization visit ((Tanita Bioimpedance Monitor Model BC-418MA, Tanita, Tokyo, Japan). During the treadmill and the overground walking tests, cardiopulmonary variables were measured using a valid and reliable (37) portable telemetric gas analyzer (Cosmed K4b2, Cosmed, Italy). Calibration was made before each testing session according to the manufacturer's instructions already described elsewhere (239). Gross metabolic energy cost (ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) was calculated by dividing the average oxygen uptake (ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>) of the last two minutes of each walking condition by the actual speed (m.min<sup>-1</sup>). For the net metabolic energy cost calculations, standing oxygen

demand was subtracted to the average oxygen uptake of the last two minutes of each walking condition. This net oxygen value was then divided by the actual speed. For both calculations, oxygen demand was averaged every 30 seconds. An oxygen steady state was reached by all participants during exercise. These procedures are in agreement with the scientific literature for moderate intensity exercise (30) and were used recently with a similar population (6).

#### Treadmill and overground walking tests

Prior to the treadmill and overground walking tests, standing metabolic requirements were assessed in order to calculate the net MECW. Participants had to keep a quiet standing position for 4 minutes. They were then asked to walk on the treadmill or on the 140 m indoor track for 6 minutes for every speed. Each 6 minute walking sequence was followed by a 3 minute standing rest period. Speed monitoring for the overground condition was as described in the familiarization visit section. All participants started with the slowest speed ( $0.67 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ). It was then increased continuously until the highest speed. This ascending order was necessary to facilitate the speed adjustments the participants had to do on the track. The same procedure was used in a similar study in which comparisons were made between young and old adults at different treadmill walking speeds(236).

#### Statistical analysis

Standard statistical methods were used for the calculation of means and standard deviations. Normal Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro-Wilk test, and homoscedasticity by a modified Levene Test. All variables met these underlying hypotheses. A 2-way ANOVA (Speed x Mode) with repeated measures was performed to test the null hypothesis that there was no difference between treadmill and overground MECW, as well as between the different walking speeds. Multiple comparisons were made with the Bonferroni post-hoc test. The significance level was set at  $p < 0.05$ . The association between treadmill and overground ECW was assessed with the

Intraclass Coefficient of Correlation (ICC, model 2,1). We considered an ICC over 0.90 as very high, between 0.70 and 0.89 as high and between 0.50 and 0.69 as moderate (240). It has been proposed that an ICC value >0.80 is acceptable for clinical work (241). The degree to which treadmill and overground ECW differs was assessed with the standard error of measurement (SEM). Both the ICC and the SEM were computed from the breakdown of a two-way ANOVA (mode x subjects) with repeated measures for each walking speed, using the following equations (242):

$$ICC = \frac{MS_S - MS_E}{MS_S + (k - 1)MS_E + \frac{k(MS_T - MS_E)}{n}} \quad \text{Eq. 1}$$

where  $MS_S$  = mean squared subjects,  $MS_E$  = mean squared error,  $MS_T$  = mean squared trials,  $k$  = number of trials and  $n$  = number of subjects.

$$SEM = \sqrt{MS_E} \quad \text{Eq. 2}$$

where  $MS_E$  = mean squared error.

## Results

Figure 3 illustrates the differences in gross MECW for every walking speed on the treadmill and on the track. At 0.67 and 0.89  $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ , the gross MECW was significantly different from all other speeds for both conditions ( $p < 0.001$ ). We found no interaction between modes (i.e. treadmill or track walking).

Standing  $\dot{V}O_2$  was not different and highly associated when measured on the treadmill or the track ( $4.3 \pm 1.1$  and  $4.6 \pm 1.4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$  respectively,  $p = 0.28$ ,  $ICC = 0.77$  and  $SEM = 13.5\%$ ). Figure 4 illustrates the differences in net MECW for every walking speed on the treadmill and on the track.

At 0.67 and 1.56 m.sec<sup>-1</sup>, the net MECW was significantly different from all other speeds for both conditions ( $p < 0.001$ ). We found no interaction between modes.

We found a significant difference ( $p < 0.05$ ) between treadmill and track MECW, whatever the walking speed (Table VI). The association between both measures was low to moderate ( $0.17 < ICC < 0.65$ ), and the standard error of measurement represented 6.9 to 15.7% of the average value (Table VI).

## Discussion

The aim of this study was to compare the metabolic energy cost of treadmill and overground walking in a group of older adults. Our results demonstrate a significant higher MECW for the treadmill vs. the overground condition for a wide range of walking speeds (0.67 – 1.56 m.sec<sup>-1</sup>) in a group of 20 men ( $n=14$ ) and women ( $n=6$ ) aged between 65 and 83 years old. Results from the present study also show a low to moderate association between these two modes of testing.

One recent study addressed this question in older subjects (44). Participants were asked to walk at their self-selected speed on a walkway before the same speed was applied on a treadmill. However, no other walking speed was tested. Participants in this study were 5 men and 5 women (Mean age: 60.6, SD: 7.4). The average self-selected speed for that group was 1.15 m.sec<sup>-1</sup>. Oxygen uptake was measured using the same metabolic system as in the present study (Cosmed K4b2, Cosmed, Italy). It was shown, in line with the results of the present study, that the gross metabolic energy cost of treadmill walking was higher when compared to the overground testing mode (0.203 +/- 0.04 vs. 0.165 +/- 0.04 ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>,  $p=0.005$ ). In the present study, gross MECW values at 1.11 m.sec<sup>-1</sup> appeared to be more elevated in both conditions (treadmill – 0.225 +/- 0.04 and overground – 0.208 +/- 0.03 ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>, ICC 0.60, SEM 8.6%) but these differences were expected as participants were also older (6, 13, 14).

The mechanisms to explain the higher metabolic energy cost observed on the treadmill in comparison to an overground walk are not well understood. Regarding temporal, kinematic and kinetic characteristics, slight differences were reported between the two modes as increased hip flexion and knee extension was observed on the treadmill (44). These authors suggest that a longer period of treadmill familiarization could be necessary to eliminate those metabolic requirements differences between the two modes of testing. Participants in their study walked on the treadmill 6 to 8 minutes without prior familiarization. It is slightly under current recommendations which suggest at least a 10 minute habituation protocol (41, 45). In the present study, participants had a 10 minutes walking session on the treadmill during the familiarization visit (2 minutes at every speed). Moreover, during the testing session, participants walked for a total of 30 minutes on the treadmill. While differences between the two modes are still obvious even for the last experimental speed tested during the protocol ( $1.56 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ), it is unlikely that these differences are related to some familiarization considerations.

In a recent study with young adults subjects ( $22.81 \pm 2.7$  years old), comparisons were made regarding self-selected speed as measured overground and on a treadmill (41). The authors found significant differences between the two modes with the treadmill speed value being lower ( $1.19 \pm 0.23$  vs.  $1.43 \pm 0.21 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ ). Gross MECW was measured using indirect calorimetry (Vmax Spectra 29c, USA) for both speeds on the treadmill. It is interesting to note that the overground self-selected speed led to a more economical MECW ( $0.158 \pm 0.02 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  vs.  $0.148 \pm 0.02 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ;  $p < 0.05$ ). Accordingly, it appears that the treadmill condition could lead participants to adopt a slower velocity resulting in a less advantageous position regarding the U-shaped metabolic energy cost – walking speed curve. The authors suggest that walking on a treadmill requires more balance and coordination which results in slower self-selected walking velocity and higher energy cost.

In line with this balance/coordination hypothesis, some authors suggest that the higher MECW observed in older adults compared with younger control subjects could be related to neuromuscular factors (6). They argue that increased antagonist activation during agonist work (co-activation) in order to maintain posture could account for the higher MECW observed on the treadmill in older adults. Even if the aim of their study was not to compare the metabolic energy cost of overground and treadmill walking, these observations are interesting as it relates to the dynamical approach (11). One can argue that more synergetic muscle work occurs on the treadmill compare to the overground condition in order to maintain posture and balance and ultimately avoid a possible fall. Taken all together, these adaptations possibly add to the metabolic requirements of the task. This hypothesis seems relevant since a significant part of the metabolic cost during level walking is the consequence of muscle work related to stabilization during the stance phase (243, 244).

The results of the present study differ with those from previous investigations. In 1960, data were published suggesting that there is no difference in the MECW when treadmill and overground conditions are compared (42). However, there was a small number of participants (n=6) in this study and subjects were younger (21 to 52 years old) making comparisons with our results difficult. Differences may occur between age groups, notably regarding neuromuscular adaptations to treadmill walking (6) as mentioned above.

In a study published in 1983, the authors found that oxygen uptake was lower during treadmill walking for three experimental velocity conditions (43). In a discussion about this study in which 22 older participants (61.6 +/- 3.7 years old) were involved, the authors were suggesting that the treadmill was favorable in terms of walking economy because the motorized system was actually performing a significant part of the mechanical work necessary to maintain the walking velocity. However, it is worth noting that a methodological bias could have slightly modified the results of that

study. Indeed, all participants were following the same sequence for the testing conditions (overground before the treadmill test). It can be argued here that a familiarization effect could explain the lower values observed on the treadmill. In the present study, participants were separated in two groups; one following the treadmill-overground sequence while the other was doing the opposite.

To our knowledge, the present study is the first to report ICC and SEM values to assess the association between the overground and treadmill testing conditions. When ICC and SEM are presented to assess test-retest MECW reliability for the same testing mode, reporting the gross metabolic energy cost could be equivalent or slightly advantageous (33, 34, 40) in comparison to the net value for a homogeneous population of healthy adults. However, reporting the net metabolic energy cost of walking could be interesting when age and anthropometrical differences are expected (34, 40). In the present study, ICC values demonstrate that gross (0.46 – 0.65) and net (0.17 – 0.35) MECW do not reach the questionable level (0.70 – 0.80) that would be the minimum accepted for physiological data (36, 245). As the ICC represents the degree to which an individual maintains his position in a sample with repeated measurements (246), it seems that MECW assessment made on the treadmill may not be applicable for daily life activities. Results for the SEM, which refers to the typical error (247), demonstrate that gross (6.9 – 10.2%) tends to be lower in comparison to the net values (10.4 – 15.7%) If the treadmill approach is necessary, it seems to be advantageous to report gross MECW data. Taken together, these results suggest that clinicians and researchers must be really careful when interpreting data as measured on a treadmill in a laboratory setting. Particularly, it seems important to notice that interventions aiming at decreasing the MECW should be assessed using the same exercise mode than the one used during the training intervention. If the treadmill mode is necessary, it could be interesting to add to the assessment a functional overground walking



test (233, 248, 249) in order to establish a possible relationship between a decrease in MECW as measured on the treadmill and improved overground walking performances.

As expected, results from the present study clearly illustrate the U-shaped energy cost – walking speed curve (4, 6, 14). Significant differences between speeds were observed for both gross and net MECW. It appears that walking at very slow (0.67 and 0.89 m.sec<sup>-1</sup>) or relatively high speeds (1.56 m.sec<sup>-1</sup>) significantly increase the gross and/or net MECW in older people for both testing conditions (treadmill and overground). Elevated MECW were associated with instability and a less efficient muscle stretch/shortening cycle which leads to less elastic energy utilization (10, 11). It is interesting to note that the optimal speed was the same for both treadmill and overground conditions (1.33 m.sec<sup>-1</sup> for gross MECW and 1.11 m.sec<sup>-1</sup> for net MECW). It could be argued here that these speeds were the best compromise with regards to the ability to use the elastic energy and maintain stability.

From a clinical perspective, these significant differences between velocities seem important since older adults tend to adopt a slower speed which is less advantageous regarding the MECW (6). This phenomenon added to the decrease in maximal oxygen uptake associated with aging (64) has the potential to increase the relative intensity of daily activities (14, 178, 250). Assessment of these qualities appears important in a context where health professionals want to implement exercise training programs in order to improve elderly walking performance, mobility and consequently, quality of life.

It is important to mention that this study has a few limitations. First, differences in step frequency between the two testing modes could potentially explain some of our results. However, in a recent study (44), this variable was not significantly different when measures were made on the treadmill and overground at 1.11 m.sec<sup>-1</sup>. It is also important to notice that walking speeds were not

randomized during testing sessions. This procedure (increasing speed from the slowest to the highest condition) was made necessary to facilitate the speed adjustments the participants had to do on the track. By proceeding that way, one could argue that resting oxygen uptake before walking at 1.56 m.sec<sup>-1</sup> was not equivalent to the rest value obtained in the standardized protocol. We were interested in calculating a new net MECW by considering a new resting value for each walking condition. Indeed, oxygen data of the last 30 seconds before each walking conditions were analyzed. With this new method, our results show that net MECW values are lower. However, regarding our study objective, these new calculations do not add something new to the results. The same pattern is observed as treadmill values are higher when we compare with the overground condition. Moreover, we observed that the resting value 30 seconds before the 0,67 m.sec<sup>-1</sup> condition (no physical activity was made at this point in time) is higher than the real resting value which suggest that participants, even if they were resting between walking conditions, were not in the same state as they were during the real rest period. It could be argued that some of them were sufficiently active (mainly upper body movements) to slightly increase their resting oxygen uptake. In papers measuring net MECW, resting oxygen uptake was measured in a very standardized protocol which is not the typical physical activity level observed just a few seconds before the walking condition. Also, it appears that resting values registered 30 seconds before the highest speed conditions (1,33 and 1,56 m.sec<sup>-1</sup>) are not higher than the values observed before the first walking trials for which speed was relatively slow (0,67 and 0,89 m.sec<sup>-1</sup>). This suggests that rest was sufficient between trials.

## Conclusion

The aim of that study was to compare the metabolic energy cost of treadmill and overground walking at 5 functional speeds in a group of older adults over 65 years old. The results demonstrate that, for all experimental velocities, the MECW is higher on the treadmill. As expected, the results

showed for both testing modes (treadmill and overground) the U-shaped metabolic energy cost – walking speed curve. It confirms that walking at a slow (0.67 and 0.89 m.sec<sup>-1</sup>) or at a fast speed (1.56 m.sec<sup>-1</sup>) is not as economical as walking at intermediate speeds (1.11 and 1.33 m.sec<sup>-1</sup>). In addition, this study also assessed the association between the two modes of testing. It appears that, based on ICC and SEM values, MECW results from a treadmill test do not necessarily apply in daily overground activities.

Tables

Table V – Participants characteristics

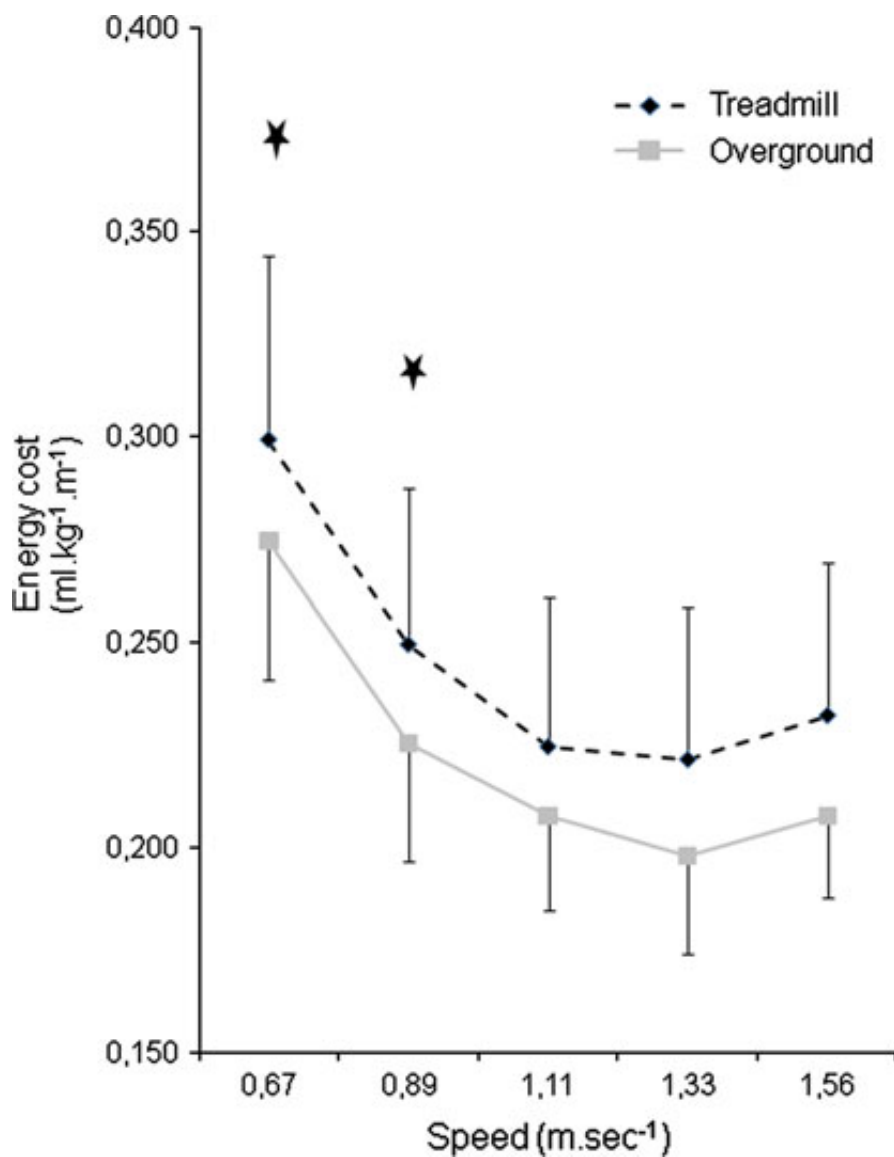
Anthropometrical data (Mean +/- SD)	
Age (years)	68.95 (4.61)
Body Mass (kg)	76.22 (14.2)
Stature (m)	1.66 (0.09)
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	27.34 (3.51)
Fat (%)	29.58 (5.25)
Medications (% of participants)	
Acetylsalicylic Acid	40%
Angiotensin-Converting Enzyme Inhibitors	5%
Statins	30%
Angiotensin Receptor Antagonist	10%
BetaBlockers	5%

Table VI – Comparison of the treadmill and overground MECW

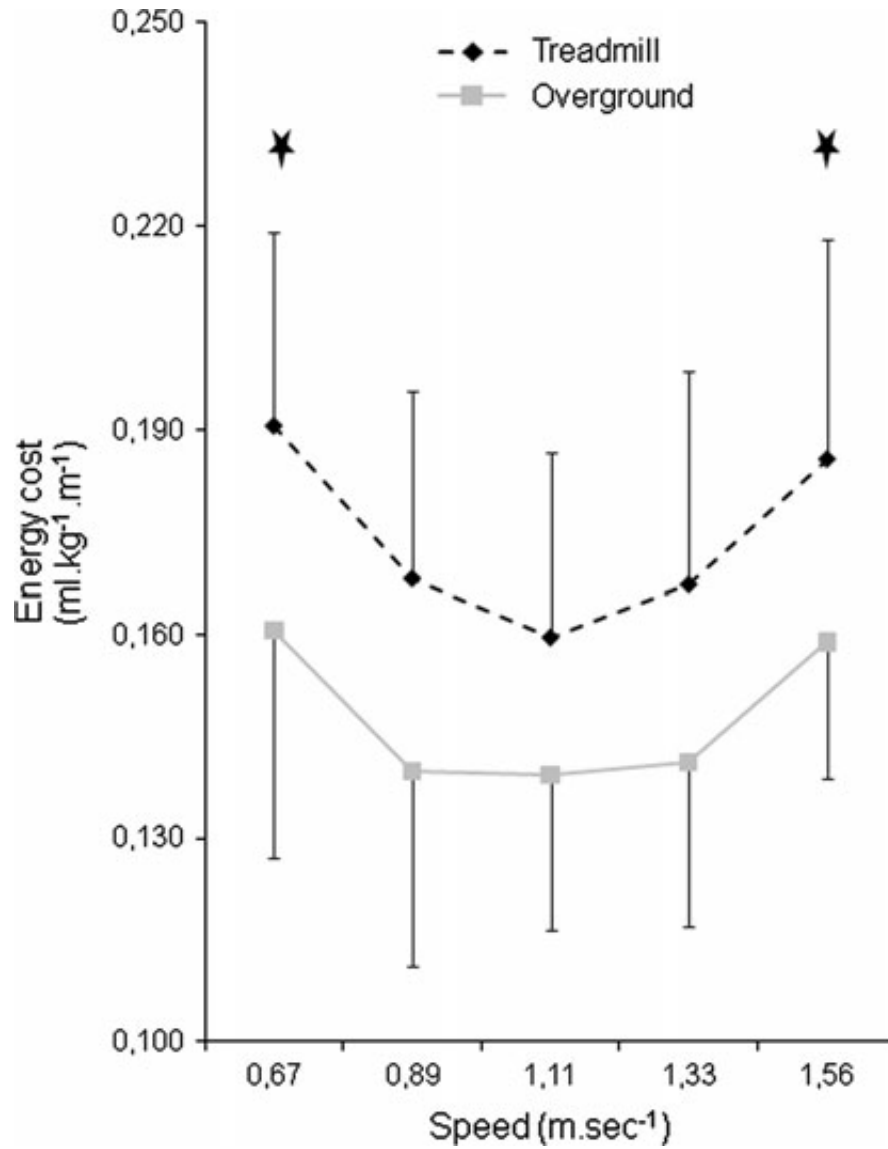
<b>Gross MECW</b>							
	<b>Treadmill</b>		<b>Overground</b>		<b>Association</b>		
<b>Speed</b> (m.sec <sup>-1</sup> )	<b>Mean</b>	<b>SD</b>	<b>Mean</b>	<b>SD</b>	<b>ICC</b>	<b>SEM (%)</b>	<b>P value</b>
0,67	0,299	0,045	0,275	0,049	0,65	8,2	0,003
0,89	0,250	0,038	0,225	0,039	0,51	10,0	0,004
1,11	0,225	0,036	0,208	0,030	0,60	8,6	0,009
1,33	0,221	0,037	0,198	0,029	0,46	10,2	0,002
1,56	0,232	0,037	0,208	0,027	0,58	6,9	0,00006
<b>Net MECW</b>							
0,67	0,191	0,029	0,161	0,034	0,24	14,1	0,001
0,89	0,168	0,028	0,140	0,029	0,17	15,7	0,001
1,11	0,159	0,027	0,139	0,023	0,19	14,5	0,008
1,33	0,167	0,031	0,141	0,024	0,19	15,4	0,002
1,56	0,186	0,032	0,159	0,020	0,35	10,4	0,0001

Energy cost values are in ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>

Figures



**Fig.3** Comparison of the gross energy cost of walking for both testing modes. Values are presented as means +/- SD. Gross Energy cost of walking at 0.67 and 0.89 m.sec<sup>-1</sup> is significantly different from all other speeds ( $p < 0.001$ ).



**Fig.4** Comparison of the net energy cost of walking for both testing modes. Values are presented as means +/- SD. Net Energy cost of walking at 0.67 and 1.56 m.sec<sup>-1</sup> is significantly different from all other speeds (p<0.001).

### 2.2.2. Article #2 : IFACCE-t

- **Berryman N**, Bherer L, Nadeau S, Lauzière S, Lehr L, Bobeuf F, Kergoat MJ, Vu TTM, Bosquet L. Executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. *Exp Gerontol.* 2013 Dec; 48 (12): 1402-9.



## Abstract

The objective of this study was to examine the relationships between executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. Forty-eight well functioning older adults (70.5 +/- 5.3 years old; 20 Men, 28 Women) were included in this study. Two median splits were conducted based on each individual's performance for the 10MWT and the TUG. Comparisons between groups of slower and faster individuals were made with regards to executive functions and physical fitness parameters. A correlational approach was used to assess the association between variables.

Between groups comparisons revealed that faster individuals in mobility tests demonstrate better performances in measures of cognitive flexibility ( $0.68 < g < 0.90$ ). After including covariates from the medical/social domain, significant correlations were established between faster mobility tests and better cognitive flexibility (TUG:  $r = 0.565$ ; 10MWT:  $r = 0.324$ ). Between groups comparisons also revealed that faster individuals in mobility tests presented higher physical fitness levels (aerobic:  $0.49 < g < 0.77$ , strength:  $0.34 < g < 1.31$ ). Significant correlations were found between better physical fitness and better cognitive flexibility (strength:  $r = -0.380$ ;  $\dot{V}O_{2peak}$  :  $r = -0.325$ ) even after including age, education, fat-free mass and gender as covariates. These results suggest that the TUG and the 10MWT could potentially help distinguish individuals with poor neuromuscular, aerobic and cognitive flexibility performances.

**Keywords:** cognition, aerobic, strength, aging, walking

## Introduction

The ability of an individual to move freely in his/her environment is of critical importance to the execution of independent activities of daily living. Mobility is often jeopardized in adult population. Data from the National Death Index (U.S.A.) recently revealed that usual gait speed was associated with survival in older adults. After 8 years of follow up, mortality rate was significantly lower in participants who improved gait speed compare to those who did not (21). Moreover, it is generally accepted that morbidity and mortality risks increase significantly in those who walk slower than 1.0 m/s (20, 251). In a recent study (135), it was suggested that maximal walking speed, which is determined by neuromuscular function, could be used in a clinical setting as an assessment of mobility. This test may offer an advantage over usual gait speed tests as it could help in identifying mobility losses that are related to impaired neuromuscular qualities.

Along with walking, the ability to rise from a chair is also an important component of mobility in daily living as it allows an individual to complete a smooth sit to stand transition. The inability to efficiently complete this task has been associated with increased risk of falling (252, 253). During the Timed-Up and Go test (TUG), an individual has to stand from a chair, walk 3 m, execute a quick turn-around and go back to the seated position (254). Good performance in this clinical test has been associated with the ability to succeed in different daily living tasks (stair climbing, bath/shower transition) and with a reduced risk of falling (254, 255).

Whereas gait speed and TUG performances are determined by physical fitness (aerobic and neuromuscular) parameters (22, 135, 256) a recent report showed that performances in both of these tests were associated with cognition in a group of older adults with mild cognitive impairments. For gait speed as well as the TUG test, faster individuals showed better performances in executive function tests (227). This relation between executive functions and both gait and TUG performances,

suggests a crucial role of these higher brain functions in gross motor behaviours that sustain mobility (257).

Cognition is not only associated with mobility but also with physical fitness. It is now well established that high levels of fitness are related to better executive functions and a lower risk of suffering from dementia and Alzheimer's disease in older adults (191, 196, 198, 201, 222, 258). However, the relationship between executive functions, fitness and mobility is not fully understood. While it appears that early research in this domain targeted the benefits of cardiovascular fitness on executive functions (192, 194, 201, 218), some evidence now suggest that neuromuscular qualities must be considered (224, 259, 260). Actually, the cardiovascular hypothesis has been questioned by different groups of researchers (188, 206). Also, some recent data suggest that coordination and balance training could lead to improvements in cognition without significant changes in physical fitness (226, 261). Moreover, a recent model has been proposed in which it is suggested that improvements in executive functions have the potential to prevent falls in older adults even in the absence of increased physical function (262).

Therefore, the objective of this study was to examine the relationships between executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. Our hypothesis was that faster individuals during TUG and gait tests would demonstrate higher physical fitness and executive functions. We also hypothesized that a direct positive relationship would be present between each fitness parameters (neuromuscular and aerobic) and executive functions.

## Methods

### Overview

Data presented in this paper represent baseline characteristics of participants included for a larger training intervention study. In the present study, 2 median splits were conducted based on

each individual's performance for the maximum 10 m Walk Test (10MWT) and for the TUG. Comparisons between groups of slower and faster participants within each mobility test (10MWT and TUG) were then made with regards to 6 domains: 1-Mobility, 2- Medical/social background, 3- Executive functions, 4- Aerobic performance, 5- Strength performance, 6- Rate of force development.

#### Participants

Individuals aged between 60 and 85 years old were considered for inclusion. Subjects were excluded if they were taking medication with known major effects on gait and balance (benzodiazepines, neuroleptics, antidepressants) and if they were diagnosed with any clinically significant orthopaedic, neurological, cardiovascular or respiratory problems. A diagnosis of a progressive somatic or psychiatric disease was also considered as an exclusion criterion. Being under general anaesthesia in the 6 months prior to the beginning of the study, a restricted mobility (use of walking aid), movement disorders, epilepsy, major visual or hearing impairments were among other reasons to exclude participants. Potential participants were also excluded if they were smoking or having an uncontrolled alcohol or drugs consumption. Finally, a minimal score of 24 (MMSE) was required to be included in the study. All these criteria were assessed during a first screening made during a telephone conversation. On the first appointment at the research center, a geriatrician and a neuropsychologist completed an evaluation to confirm that all candidates were eligible to participate to the study. Once included, the participants signed a written statement of informed consent. The protocol and procedures have been reviewed and approved by the Research Ethics Board of the Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (Canada), and have been conducted in accordance with recognized ethical standards and national/international laws.

## Tests and measures

All tests were implemented within two weeks at the Centre de Recherche de l'Institut Universitaire de Gériatrie de Montréal (Canada). Session 1 was dedicated to the medical and neuropsychological assessment, peak oxygen uptake test ( $\dot{V}O_{2peak}$ ) and treadmill familiarisation. During the second visit at the lab, participants completed the metabolic energy cost of walking (MECW) and mobility assessments. While the third visit consisted in strength and rate of force development (RFD) tests, body composition was assessed during the fourth visit.

## Medical assessment

Participants met a geriatrician who completed a medical evaluation. Briefly, 5 main components were assessed: 1- personal medical and family medical history, 2- functional capacities (questionnaire on the ability to execute activities of daily living), 3- drugs list, 4- general overview of all physiological systems, 5- physical examination.

## Neuropsychological assessment

After their visit with the geriatrician, participants had to complete a neuropsychological evaluation. A graduate student in neuropsychology administered standardized clinical tests. Global cognitive functioning (Mini Mental State Examination), processing speed (the naming/reading conditions of the modified Stroop Color-Word test), and executive functions (the inhibition/flexibility conditions of the modified Stroop Color-Word Test) were assessed. Scores for inhibition and flexibility were computed by subtracting the average of the naming/reading conditions to the inhibition or the flexibility components. It means that a smaller difference (score) is associated with better executive functions abilities. Two questionnaires were also used in this study to assess sleep quality (Pittsburgh Sleep Quality Index – PSQI (263)) and the Profile of Mood States (POMS (264)). Participants were asked to fill the paper forms alone in a quiet environment. For the PSQI, a global score was computed by

adding the score of the 7 items together. In this questionnaire, a high score (maximum 21) corresponds to a lower sleep quality. For the POMS, a global score was computed. The positive factor of vigour was subtracted to the sum of all five negative factors (anxiety, anger, fatigue, confusion and fatigue), which means that a lower score is associated with a better profile.

## Physiological assessment

### Peak oxygen uptake

$\dot{V}O_{2peak}$  was determined during a maximal continuous graded test performed on a bicycle ergometer (Corival Recumbent, Lode B.V., Groningen, The Netherlands). Initial mechanical power was set at 50 Watts for males and 35 Watts for females. Power was then increased by 15 watts every 60 seconds, with a fixed pedalling cadence of 60 to 80 revolutions per minute. Strong standardised verbal encouragements were given throughout the test. Termination criterion was the inability to maintain the required pedalling cadence. As recommended by the American College of Sports Medicine (ACSM), participants were under ECG monitoring before, throughout and 5 minutes after the end of the test. A geriatrician and a graduate student in kinesiology were supervising this assessment. Oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) was determined continuously on a 30-second basis using an automated cardiopulmonary exercise system (Moxus, AEI Technologies, Naperville, IL, USA). Gas analyzers (S3A and CD3A, AEI Technologies, Naperville, IL, USA) were calibrated before each test, using a gas mixture of known concentration (15%-21%  $O_2$  and 5%-0.3%  $CO_2$ ). Their accuracy was  $\pm 0.003\%$  for oxygen and  $\pm 0.02\%$  for carbon dioxide (data provided by the manufacturer). The turbine was calibrated manually before each test using a syringe (Hans Rudolph inc., Kansas City, Kansas, USA) with an accuracy of  $\pm 1\%$ . The tidal volume was set at 3 liters and the stroke rate at 40 cycles per minute. The highest  $\dot{V}O_2$  over a 30-s period during the test was considered as  $\dot{V}O_{2peak}$  (in  $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ).

## Metabolic Energy cost of Walking

Once the maximal continuous graded test was completed, participants executed the treadmill familiarisation protocol, as previously described (265). Briefly, participants were asked to walk for at least 12 minutes on a motorized treadmill (Valiant Rehab, Lode B.V., Groningen, The Netherlands). Three different velocities (2.4 – 4 – 5.6 km.h<sup>-1</sup>) were experimented, each for at least 4 minutes. If participants were not comfortable after 4 minutes of walking at a constant velocity, they had to continue until they felt completely habituated. A graduate student in kinesiology was in charge of this session. Familiarisation was considered to be complete when participants were able to walk with fluidity without hanging to the treadmill's support rails and to maintain a conversation while walking. All participants were comfortable with this walking task within 12-15 minutes. This duration was known to be sufficient for a complete treadmill familiarisation (41, 45). MECW was assessed during a specific experimental session using procedures described in a previous report of our lab (265). Briefly, standing metabolic demand was assessed prior to the walking task. Participants had to keep a quiet standing position for 6 minutes on the treadmill. Once this measure completed, participants had to perform three 6-min constant velocity tests at 2.4, 4 and 5.6 km.h<sup>-1</sup> in a random order (ABC, BCA, CAB), interspersed by a 3-min standing recovery period. Oxygen uptake was measured throughout the entire session using procedures described previously. Mean  $\dot{V}O_2$  of the 2 last minutes of each walking condition was considered as walking metabolic demand. Standing metabolic demand was subtracted from walking metabolic demand, and then divided by the walking speed to obtain the net metabolic energy cost of walking (in ml.kg<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>). Caloric unit cost (kcal.kg<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>) was calculated as described elsewhere (26). These procedures are in agreement with the scientific literature for moderate intensity exercise (30) and were used recently with a similar population (6, 265).

## Mobility assessment

### TUG

This test started in a seated position on a standard chair offering arm support. At the *GO!* signal, participants had to stand-up and walk as fast as possible to a pylon located 3 meters in front of the chair. Without stopping their gait, participants had to do a quick turn-around and then come back to the chair in order to regain the initial seated position. Participants were allowed to use the chair arm supports to stand-up as well as to sit back on the chair (266). Two trials were completed and the best time (hand held stop watch) was recorded for analysis.

### MWT

Participants had to walk 11 meters as fast as possible. Walking time of the last 10 meters was measured with timing gates (TC-System, Brower Timing Systems, Draper, Utah, USA). Two trials were allowed and the best time was recorded for analysis.

## Strength assessment

Concentric muscular strength was assessed bilaterally at 3 joints (knee, ankle, hip) using an isokinetic dynamometer (Biodex III, Biodex Medical Systems, New York, USA) (267). In the present report, only the results for the dominant leg, defined as the preferred kicking leg (155), will be presented. Gravity adjustment was made using the dynamometer software before each measurement.

### Knee

Participants were seated in a standardized position with a hip flexion of 60°. Pelvis, shoulders and thighs were firmly attached to the system's chair. Knee joint (lateral femoral epicondyle) was positioned in line with the dynamometer's rotation axis. Thigh of the working leg was maintained parallel to the ground using small cushions. Range of motion was from 90° (knee flexion) to 0° (knee extension). Working leg was attached to the dynamometer 3 cm above the lateral malleolus. After a



brief warm-up which consisted in 5-6 submaximal knee extensions at 30°/second, participants were asked to execute 3 maximal efforts at 60°/second each separated by a rest period of 60 seconds. The same procedure was then repeated for the assessment of the knee flexors.

#### Ankle

Participants were seated in a standardized position with a hip flexion of 60°. Pelvis, shoulders and thighs were firmly attached to the system's chair. Ankle joint (lateral malleolus) was positioned in line with the dynamometer's rotation axis and the foot was firmly attached to a support platform in order to avoid any heel movement during the plantar flexion. Knee was in an almost full extension position (20°). Ankle range of motion was from -15° (dorsiflexion) to 35° (plantarflexion). A reference angle of 0° corresponds to the ankle being in a neutral position which represents 90° between the leg's axis and the support platform. After a brief warm-up which consisted in 5-6 submaximal plantar flexions at 30°/second, participants were asked to execute 3 maximal efforts at 180°/second each separated by a rest period of 60 seconds. The same procedure was then repeated for the assessment of the dorsiflexors. However, speed was adjusted to 30°/second.

#### Hip

Participants were in a supine position with the lowest part of their buttocks at the edge of the system's chair. The pelvis was firmly attached to the system's chair and the non-working limb was supported with a 60° knee flexion. The thigh of the working limb was firmly stabilized 3 cm above the knee joint which was stabilised in a 25° flexion. The leg of the working limb was also supported by a small platform to help to maintain the 25° knee flexion. The hip joint (greater trochanter) was aligned with the dynamometer's rotation axis. Range of motion was fixed at -50° in flexion and at 15° in extension. A reference angle of 0° corresponds to the thigh and the trunk being aligned in a neutral position with the greater trochanter as a reference point. After a brief warm-up which consisted in 5-

6 submaximal hip flexions at 30°/second, participants were asked to execute 3 maximal efforts at 120°/second each separated by a rest period of 60 seconds. The same procedure was then repeated for the assessment of the hip extensors.

#### Rate of Force Development

RFD of the dominant leg's knee extensors was assessed using a standard procedure. Briefly, knee joint was immobilized with a 60° flexion (full flexion at 90°). These tests were completed immediately after the isokinetic assessment of the knee. Therefore, all position adjustments were exactly the same. Two signals occurred simultaneously to ask the participant to execute a maximal isometric voluntary contraction (MIVC). Whereas one traffic light was changing from red to yellow to green, a sound (*beep*) signal occurred as the traffic light became green. Instructions given to the participant were to contract their extensors muscles as hard and as fast as possible for a 3 seconds period. Three trials were allowed for each participant with the one showing the highest MIVC being recorded for RFD analysis. Contractile RFD was computed using previously described instructions (93, 139). Briefly, it corresponded to the average slope of the moment-time curve over intervals of 0-30, 0-50, 0-100 and 0-200 ms relative to the onset of contraction which was determined as being 3 standard deviations away from the signal's center.

#### Body Composition assessment

Body composition was assessed using a standard dual-energy x-ray absorptiometry (DXA – Lunar Prodigy; GE Healthcare, Madison WI, USA) protocol (268). Participants were asked to empty their bladder prior to the test, to wear light exercise clothes, and to remove all jewellery and metal objects. Considering that it was not possible to complete all assessments in the morning, participants were not asked to arrive in a fasted state. Calibration was completed each morning according to the

manufacturer's guidelines. The same trained operator made all scans. Data analyses were made with the GE Encore software (enCORE2011, GE Healthcare, version 13.60).

#### Statistical analysis

Standard statistical methods were used for the calculation of means and standard deviations. Normal Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro-Wilk test and homogeneity of the variance by the Levene test. For each domain (4), t-tests were performed for all variables showing a normal distribution and homogeneity of the variance. Otherwise, between group differences were assessed with a Mann-Whitney test. The magnitude of the difference was assessed by the Hedges  $g$  ( $g$ ), as presented elsewhere (269). The scale proposed by Cohen (270) was used for interpretation. The magnitude of the difference was considered small ( $0.2 < ES \leq 0.5$ ), moderate ( $0.5 < ES \leq 0.8$ ), or large ( $ES > 0.8$ ). Differences between groups for the categorical variables from the medical/social background domain were assessed with a  $\chi^2$  test. Correlations were conducted between mobility and cognition performances. When a significant difference was found between groups of faster and slower participants in any of the variable from the medical/social background domain, it was included as a covariate in the correlation analysis. A similar correlational approach was conducted in order to investigate the potential mechanisms that could explain the relationship between physical fitness (neuromuscular and aerobic) and cognition variables. Because of their known effect on cognition and physical fitness, age, education, fat-free mass and gender were included as covariates. We considered a correlation over 0.90 as very high, between 0.70 and 0.89 as high and between 0.50 and 0.69 as moderate (271). Significance level was set at  $p < 0.05$  for all analyses. Statistical tests were conducted with the IBM SPSS statistics software, version 20.

## Results

Forty-eight participants were included in this study. Therefore, each group (slower vs. faster) within each mobility test (TUG and 10MWT) was composed of 24 participants (Table VII). Median for the 10MWT was 4.775 seconds and the last participant included in the faster group (F10MWT) had a performance of 4.74 seconds while the first in the slower group (S10MWT) walked the distance in 4.81 seconds. Median for the TUG was 5.30 seconds and the last participant included in the faster group had a performance of 5.26 seconds (FTUG) while the first in the slower group completed this test in 5.34 seconds (STUG). These two median splits resulted in 4 participants going from the S10MWT to the FTUG and 4 participants coming from the F10MWT to the STUG. As expected, median splits resulted in significant performance differences for both TUG and 10MWT (TUG:  $p < 0.001$ ;  $g = 1.81$  and 10MWT:  $p < 0.0001$ ;  $g = 1.99$ ).

Table VIII presents the medical and social characteristics for all participants. When a median split was conducted with regards to the TUG performance, significant differences between STUG and FTUG were found for gender (more women in the STUG;  $p = 0.019$ ), years of education ( $p = 0.037$ ), history of fractures ( $p = 0.016$ ) and other musculoskeletal problems ( $p = 0.043$ ). When a split median was conducted considering the 10MWT performance, significant differences between S10MWT and F10MWT were found for the POMS global score ( $p = 0.006$ ), history of depression ( $p = 0.037$ ), arthritis ( $p = 0.029$ ) and other musculoskeletal problems ( $p = 0.043$ ).

As shown in Table IX, performance during the flexibility part of the Stroop test was significantly different when STUG and FTUG were compared as well as when comparisons were made for S10MWT and F10MWT (TUG:  $p = 0.009$ ;  $g = 0.78$  and 10MWT:  $p = 0.022$ ;  $g = 0.68$ ). When considering the flexibility score of the Stroop test, differences between groups were again significant (TUG:  $p = 0.006$ ;  $g = 0.90$  and 10MWT:  $p = 0.022$ ;  $g = 0.75$ ).

As illustrated in Figures 5 and 6, significant correlations were found between performances on both functional walking tests and the flexibility score of the Stroop task even after including covariates in the model (TUG:  $r = 0.565$ ;  $p < 0.001$  – 10MWT:  $r = 0.324$ ;  $p = 0.032$ ). These correlations indicate that faster individuals in a mobility task tend to respond faster in a cognitive task, which relies on flexibility. In this case, gender, years of education, history of fractures and other musculoskeletal problems were included as covariates for the TUG performance while POMS global score, history of depression, arthritis and other musculoskeletal problems were included for the 10MWT performance.

As presented in Table X, MECW was significantly different at all experimental conditions when F10MWT and S10MWT were compared ( $0.014 < p < 0.020$ ;  $0.49 < g < 0.75$ ). MECW was significantly different between FTUG and STUG only when assessed at  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $p = 0.011$ ;  $g = 0.75$ ).  $\dot{V}O_2$  peak was significantly higher in both groups of faster individuals (TUG:  $p = 0.009$ ;  $g = 0.77$ , 10MWT:  $p = 0.04$ ;  $g = 0.59$ ).

Table XI represents all neuromuscular parameters. Significant differences between FTUG and STUG were observed at the hip (extensors:  $p = 0.018$ ;  $g = 0.67$  and flexors:  $p < 0.001$ ;  $g = 1.31$ ) and knee joints (extensors:  $p = 0.003$ ;  $g = 0.86$ ) whereas F10MWT and S10MWT differed at the ankle (plantar flexors:  $p < 0.041$ ;  $g = 0.59$ ) and at the hip joints (flexors:  $p = 0.003$ ;  $g = 0.88$ ). Results also revealed that MIVC was higher in faster individuals (TUG:  $p < 0.001$ ;  $g = 1.05$  and 10MWT:  $p = 0.034$ ;  $g = 0.61$ ).

Differences in RFD between faster and slower groups were also found. Significant differences were evident for all time intervals when comparisons were made between FTUG and STUG ( $0.004 < p < 0.013$ ;  $0.74 < g < 0.80$ ). Significance level is reached only for the 0-50 ms time interval for

comparisons between F10MWT and S10MWT ( $p = 0.023$ ;  $g = 0.34$ ). However, all other parameters RFD showed a tendency towards statistical significance ( $p = 0.05 - 0.074$ )

After including age, education, fat-free mass and gender as covariates, significant partial correlations were established between  $\dot{V}O_{2peak}$  and the flexibility score of the Stroop test ( $n=48$ ,  $p = 0.031$ ,  $r = -0.325$ ). Significant partial correlations were also found between MIVC and the flexibility score of the Stroop test ( $n=48$ ,  $p = 0.011$ ,  $r = -0.380$ ). These correlations indicate that individuals with higher levels of fitness tend to respond faster in a cognitive task, which relies on flexibility.

## Discussion

The objective of this study was to examine the relationships between executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. Our results indicate that faster individuals in mobility tests (TUG and 10MWT) demonstrate higher neuromuscular performances as well as higher aerobic capacity and better cognitive flexibility. Also, results from the present study suggest that higher physical fitness levels ( $\dot{V}O_{2peak}$  and MIVC) are directly associated with cognitive flexibility.

Multiple reports support the idea that gait requires attention for both young and older populations (183, 228-230). Whereas the dual-task paradigm was used in these publications to demonstrate that walking and cognition processes were related, rather, the present study used a cross-sectional approach to show that faster individuals in mobility tests demonstrate better performances than their slower colleagues during the flexibility segment of the Stroop Task. Different mechanisms could explain this relationship between cognition and mobility performances in older adults.

Recently, the Central Benefit Model was proposed to describe the interactions between executive functions, mobility, physical functions and the risk of falling in a population of older adults (262). Even if walking can persist in presence of cognitive impairments, this model suggests that impairments in executive functions can have a detrimental effect, through multiple pathways and independently of physical function, on gait and fall prevention in the elderly. Support of this model can be found in a publication that showed improvements in executive functions and a reduction in fall prevalence without any significant strength/balance enhancement after a 6-month home-based training program that consisted of strength and balance exercises (272). Reduced motivation (volition), careless walking (self-awareness), deficits in decision-making (planning), inappropriate attention in complex environments (response inhibition) are cognitive parameters that have the potential to directly alter gait and fall prevalence in older adults (229, 262).

Along with cognition, aerobic capacity is an important determinant of mobility in an aging population. Evidently, MECW is substantially increased, as individuals get older (6, 13, 14). When compared to a group of young adults (24.6 +/- 2.6 years), older participants (81.6 +/- 3.3 years) matched for body composition (fat and fat-free mass) showed a MECW that was in average 22% higher than observed in younger matched adults (6). In a recent report, it was shown that decline in gait speed with age is the mirror image of the increase in MECW. This relationship was still evident even after including covariates (gender, height, diabetes history and balance difficulty) in the model (22). Considering that  $\dot{V}O_{2peak}$  is also altered with aging (64, 273), it appears that the interaction between the increase in MECW and the decrease in  $\dot{V}O_{2peak}$  has the potential to increase the relative intensity of gait thus leading an individual to slow down walking speed in order to maintain a comfortable intensity. To account for this phenomenon, the concept of potential energy was proposed. It has been defined as *the energy available above what is essential for independent living* (

$\dot{V}O_{2peak}$  – MECW at a comfortable pace) (1). According to this model, low potential energy reserve will be associated with a slower gait. In the present study, slower participants were generally characterized by lower  $\dot{V}O_{2peak}$  values and a higher MECW. Lower MECW was observed for all experimental speed (2.4 – 4 – 5.6 km.h<sup>-1</sup>) in the F10MWT group compare to only one (4 km.h<sup>-1</sup>) for the FTUG participants.

Neuromuscular qualities are also known to be associated with mobility in older adults. In a recent study, results showed that ankle plantar flexors RFD was 38% lower in a group of slower walkers compared to a group of faster walkers (135). In the present study, RFD at 4 different time intervals was higher in FTUG individuals, which is in line with the suggestion that this neuromuscular quality is important in a perspective of functional ability maintenance and fall prevention (139). This phenomenon was less obvious for participants of the F10MWT. The significance level was reached only for the 0-50 ms time interval but all other intervals were almost significant ( $p < 0.10$ ).

The relationship between neuromuscular qualities and mobility in older individuals is also highlighted by previous reports in which higher levels of strength and power were associated with increased gait speed (136), lower prevalence of falls (274, 275) and improved performance in activities of daily living (137, 138). In the present study, higher strength levels at the ankle, knee and hip joints were all related to faster mobility performances. FTUG participants differed from their STUG colleagues mainly at the hip (extensors and flexors) and knee joint (extensors). These results are not surprising as these muscle groups were found to significantly contribute to a chair rise task. Whereas hip and knee extensors are involved in the generation of a vertical momentum during the task, it appears that hip flexors are important in maintaining stability in older adults (256, 276). F10MWT participants also showed higher levels of lower limb strength (ankle plantar flexors and hip



flexors) than their S10MWT counterparts. During walking, these muscle groups are known to contribute to the acceleration of the forward and upward movement of the limb (277).

Neuromuscular parameters are also associated with mobility and gait through their effects on the energy cost of locomotion. The increased muscle co-activation observed in older adults has been related to the increased MECW. This phenomenon, although apparently negative, could represent a strategy to increase joint stability and safety during gait (15). While in athletes, strength and power improvements are known to reduce the energy cost of locomotion (2, 171, 278), it appears that intervention studies aiming at increasing strength levels in order to decrease MECW are more equivocal in older adults (14, 175). More research is needed in this promising avenue to determine the best training strategies in order to reduce MECW in older adults.

The relationship between physical fitness and cognition in older adults is now well established. Multiple reports are suggesting that higher physical fitness is associated with better cognitive performances (194, 195, 201, 204, 218, 224, 259, 279, 280). Among them, results from a meta-analysis suggest that participants involved in a physical training program demonstrated greater improvements on measures of cognitive functions compared to control participants (191). It also appeared that measures of executive functions are particularly sensitive to this treatment, which is in line with the results of the present study. Moreover, it is worth noting that physical training interventions including both an aerobic and a strength development program induced greater cognitive improvements than aerobic training alone (191). Recently, an interesting study using a rodent model gives insight on the mechanisms underlying the fitness/cognition relationship. Briefly, it appears from this experimentation that, following an aerobic or a strength training intervention, different molecular pathways are involved to induce cognitive adaptations. While Brain Derived Neurotrophic Factors (BDNF) seems associated with the aerobic stimulation, Insulin-like growth

factor-1 (IGF-1) might be the key molecular component after a strength program (225). Both molecules have been associated with survival, growth and differentiation of neurons as well as cognitive improvements (218).

In the present study, after including covariates in our model, we found that both  $\dot{V}O_{2peak}$  and MIVC were directly and positively associated with cognitive flexibility. It could be argued that participants who tended to remain active throughout their life are probably the ones who benefited the most from these molecular adaptations associated with better cognitive functions. However, it is possible to assume that other pathways are involved to explain how physical fitness, mobility and cognitive functions are related in older adults. The Central Benefit Model (262) suggests that maintaining or improving executive functions performances through participation in aerobic and neuromuscular exercises could be related to better mobility and a reduction in the prevalence of falls even in the absence of any changes in physical fitness. Conversely, it could be argued that maintaining mobility through volitional physical activities could lead an individual to engage in more socially and cognitively demanding situations that could help maintain cognition. Moreover, it appears that training with emphasis on coordination and balance training has the potential to improve cognition (205, 226). Therefore, an individual has the opportunity to engage somewhere in this virtuous circle where mobility, physical fitness and cognition interact together. Since large individual differences in the response to strength and/or aerobic training were reported in older adults (180) and the multiple pathways that could help occupy an advantageous position in this circle, it appears relevant to assess each individual in its entirety; from an executive functions, a physical fitness and a mobility perspective in order to better understand its weaknesses and how these variables are related for that particular elder. Such a personalized evaluation should help the clinician in orienting the most

appropriate intervention knowing that multiple pathways could lead to improved performances in physical fitness, mobility and executive functions.

One limitation of this article is related to the age differences found between participants. The youngest participant was 62 years old while the oldest was 85. Such a range could lead to significant differences in a number of variables in this study (MECW, strength,  $\dot{V}O_{2peak}$ , mobility, cognition). However, in the case of the correlational analysis between physical fitness and cognition variables, age was included as a covariate. Also, no age differences were found between groups of faster and slower participants.

## Conclusion

The objective of this study was to examine the relationships between executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. Our results indicate that faster individuals in mobility tests (TUG and 10MWT) demonstrate higher neuromuscular performances as well as higher aerobic capacity and better executive functions. Also, results from the present study suggest that higher fitness levels ( $\dot{V}O_{2peak}$  and MIVC) are directly and positively associated with executive functions. Taken together, these results suggest a multicomponent model in which physical fitness parameters, mobility and executive functions are closely related in a population of older adults. From a clinical standpoint, our results also suggest that the TUG and the 10MWT could potentially help distinguish individuals with poor neuromuscular, aerobic and executive functions performances. Future studies should emphasize on the effect of different physical training strategies to optimize positive adaptations with regards to the interactions between cognition, physical fitness and mobility. Such interventions should also help in determining an eventual causal relationship between variables.

Tables

**Table VII.** Mobility performance of each subgroup. Data are reported as mean (SD)

	<b>FTUG</b> n=24	<b>STUG</b> n=24	<b>F10MWT</b> n=24	<b>S10MWT</b> n=24
TUG (s)	4.72 (0.35)	6.18 (0.74) <sup>#</sup>	4.79 (0.43)	6.12 (0.83) <sup>#</sup>
10MWT (s)	4.28 (0.50)	5.32 (0.65) <sup>#</sup>	4.19 (0.40)	5.41 (0.56) <sup>#</sup>

#: different from the fastest group ( $p < 0.001$ )

**Table VIII:** Medical/Social characteristics of participants.  
Data are reported as mean (SD) or number of participants

	<b>FTUG</b>	<b>STUG</b>	<b>F10MWT</b>	<b>S10MWT</b>
<b>General</b>				
Gender (Number of Females)	10	18 <sup>#</sup>	11	17
Age – years	69.5 (3.7)	71.6 (6.5)	68.9 (3.8)	72.1 (6.2)
Body Mass Index – kg/m <sup>2</sup>	24.9 (3.1)	26.4 (4.4)	24.8 (2.9)	26.6 (4.4)
Fat-Free Mass – kg	44.1 (7.9)	39.7 (5.6)	43.3 (7.9)	40.5 (6.2)
MMSE – score /30	28.8 (1.1)	28.6 (1.1)	28.9 (0.9)	28.5 (1.1)
Education – years	15.5 (2.9)	13.8 (2.8) <sup>#</sup>	15.4 (2.8)	13.9 (2.9)
POMSGlobal – score	11.2 (25.7)	23.1 (33.2)	8.0 (25.3)	26.3 (32.1) <sup>#</sup>
PSQIGlobal – score /21	4.7 (3.6)	6.3 (3.6)	4.6 (3.6)	6.4 (3.6)
Number of Daily Medications	3.9 (3.2)	3.2 (2.)	3.8 (3.2)	3.4 (2.4)
<b>Cardiovascular diseases</b>				
Hypertension	7	8	8	7
Diabetes	3	1	2	2
Dyslipidemia	9	7	8	8
Angina	0	1	0	1
Infarctus	1	0	1	0
Arrhythmia	2	1	2	1
Valvular disease	1	1	1	1
<b>Pulmonary diseases</b>				
COPD <sup>a</sup>	0	1	0	1
Asthma	1	2	2	1
<b>Musculoskeletal disorders</b>				
Arthritis	14	19	13	20 <sup>#</sup>
Osteoporosis	5	6	5	6
History of Fractures	2	9 <sup>#</sup>	3	8
Other Musculoskeletal Problems	9	16 <sup>#</sup>	9	16 <sup>#</sup>
History of Falls	1	4	2	3
<b>History of depression</b>	1	3	0	4 <sup>#</sup>
<b>Sedentary lifestyle</b>	1	3	1	3

<sup>#</sup>: different from the fastest group (p < 0.05); <sup>a</sup>: Chronic Obstructive Pulmonary Disease;

**Table IX:** Stroop performance. Data are reported as mean (SD).

	<b>FTUG</b>	<b>STUG</b>	<b>F10MWT</b>	<b>S10MWT</b>
Naming (sec.)	32.0 (5.6)	32.0 (7.1)	31.6 (6.0)	32.4 (6.7)
Reading (sec.)	21.7 (3.4)	21.9 (3.8)	21.8 (4.1)	21.8 (3.0)
Inhibition (sec.)	62.1 (12.4)	64.7 (13.8)	61.1 (11.9)	65.7 (14.0)
Flexibility (sec.)	60.8 (10.9)	71.9 (15.8) <sup>#</sup>	61.5 (12.2)	71.2 (15.3) <sup>#</sup>
Inhibition Score (sec.)	35.3 (10.1)	37.7 (11.9)	34.4 (8.3)	38.6 (13.0)
Flexibility Score (sec.)	34.0 (8.5)	44.9 (14.3) <sup>#</sup>	34.8 (9.5)	44.2 (14.3) <sup>#</sup>

<sup>#</sup>: different from the fastest group ( $p < 0.05$ )

**Table X** – Aerobic Performance. Data are reported as mean (SD).

	<b>FTUG</b>	<b>STUG</b>	<b>F10MWT</b>	<b>S10MWT</b>
<b>MECW</b> (kcal.kg <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> )				
2.4 km.h <sup>-1</sup>	0.763 (0.158)	0.873 (0.224)	0.746 (0.145)	0.891 (0.222) <sup>#</sup>
4 km.h <sup>-1</sup>	0.605 (0.118)	0.699 (0.129) <sup>#</sup>	0.606 (0.120)	0.698 (0.126) <sup>#</sup>
5.6 km.h <sup>-1</sup>	0.708 (0.128)	0.755 (0.125)	0.699 (0.131)	0.764 (0.116) <sup>#</sup>
<b><math>\dot{V}O_2</math> peak</b> (ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	26.2 (4.4)	22.3 (5.2) <sup>#</sup>	25.8 (4.5)	22.7 (5.4) <sup>#</sup>

<sup>#</sup>: different from the fastest group (p < 0.05)

**Table XI** – Neuromuscular Performance. Data are reported as mean (SD).

	FTUG	STUG	F10MWT	S10MWT
<b>Strength</b> (Nm.FatFreeMass <sup>-1</sup> )				
APF <sup>a</sup> 180°/sec	3.18 (0.47)	2.78 (0.93)	3.20 (0.68)	2.76 (0.78) <sup>#</sup>
ADF <sup>b</sup> 30°/sec	0.52 (0.09)	0.53 (0.11)	0.55 (0.10)	0.50 (0.09)
KEXT <sup>c</sup> 60°/sec	2.78 (0.55)	2.24 (0.66) <sup>#</sup>	2.68 (0.59)	2.34 (0.70)
KFLEX <sup>d</sup> 60°/sec	1.33 (0.35)	1.18 (0.37)	1.35 (0.37)	1.17 (0.35)
HEXT <sup>e</sup> 120°/sec	2.70 (0.54)	2.27 (0.68) <sup>#</sup>	2.64 (0.55)	2.33 (0.70)
HFLEX <sup>f</sup> 120°/sec	2.22 (0.57)	1.42 (0.61) <sup>##</sup>	2.12 (0.55)	1.52 (0.74) <sup>#</sup>
MIVC <sup>g</sup>	3.39 (0.55)	2.78 (0.57) <sup>##</sup>	3.28 (0.56)	2.89 (0.66) <sup>#</sup>
<b>Rate of Force Development</b> (Nm.sec <sup>-1</sup> .FatFreeMass <sup>-1</sup> )				
0-30 ms	5.15 (3.80)	2.86 (1.82) <sup>#</sup>	4.51 (3.22)	3.50 (3.10)
0-50 ms	6.64 (4.47)	3.77 (2.51) <sup>#</sup>	5.88 (3.57)	4.53 (4.12) <sup>#</sup>
0-100 ms	9.05 (5.53)	5.38 (3.11) <sup>#</sup>	7.91 (4.09)	6.52 (5.43)
0-200 ms	8.65 (3.55)	6.19 (2.85) <sup>#</sup>	8.07 (2.49)	6.77 (4.10)

<sup>#</sup>: different from the fastest group (p < 0.05); <sup>##</sup>: different from the fastest group (p < 0.001);

<sup>a</sup>: Ankle plantar flexors; <sup>b</sup>: Ankle dorsi flexors; <sup>c</sup>: Knee extensors; <sup>d</sup>: Knee flexors; <sup>e</sup>: Hip extensors;

<sup>f</sup>: Hip flexors; <sup>g</sup>: Maximal Isometric Voluntary Contraction;



Figures

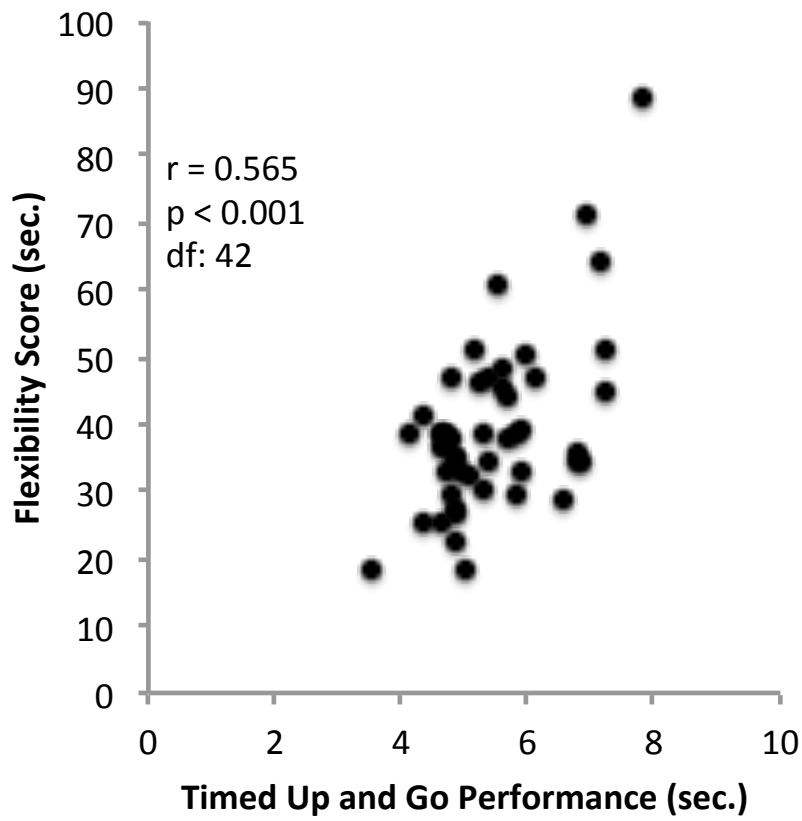


Figure 5 – Relationship between the flexibility score of the Stroop task (flexibility condition – average of the naming/reading condition) and TUG performance. Gender, years of education, history of fractures and other musculoskeletal problems were included as covariates in the model.

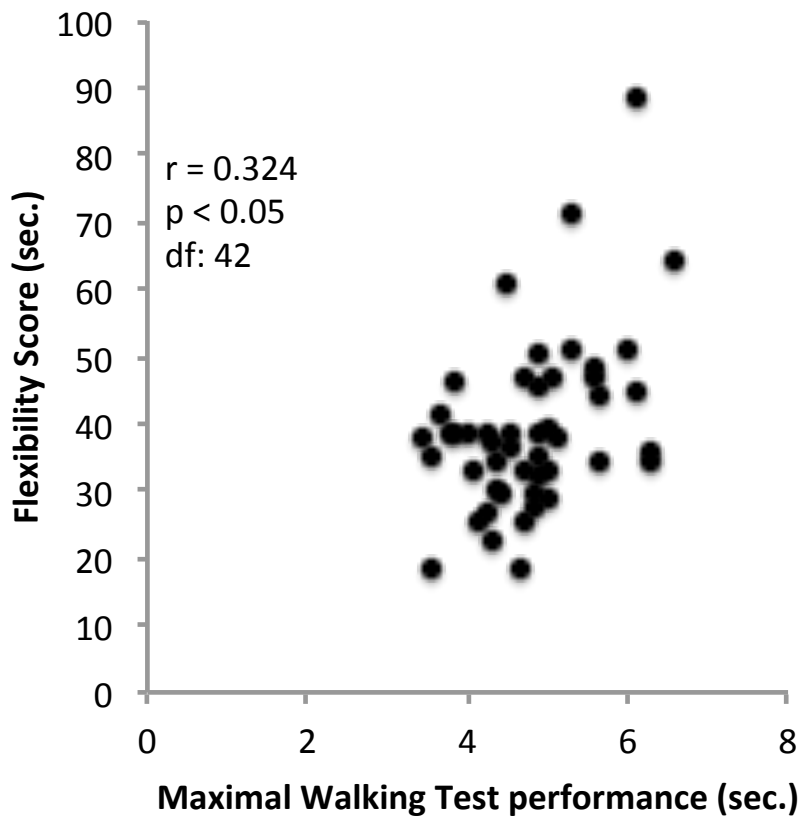


Figure 6 – Relationship between the flexibility score of the Stroop task (flexibility condition – average of the naming/reading condition) and 10MWT performance. Profile of Mood States global score, history of depression, arthritis and other musculoskeletal problems were included as covariates in the model.

### 2.2.3. Article #3 : IFACCE

- **Berryman N**, Bherer L, Nadeau S, Lauzière S, Lehr L, Bobeuf F, Lussier M, Kergoat MJ, Vu TTM, 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. Accepté, le 24 août 2014, pour publication dans le journal *Age – American Aging Association*.

## Abstract

The effects of physical activity on cognition in older adults have been extensively investigated in the last decade. Different interventions such as aerobic, strength and gross motor training programs have resulted in improvements in cognitive functions. However, the mechanisms underlying the relationship between physical activity and cognition are still poorly understood. Recently, it was shown that acute bouts of exercise resulted in reduced executive control at higher relative exercise intensities. Considering that aging is characterized by a reduction in potential energy ( $\dot{V}O_2$  max - energy cost of walking), which leads to higher relative walking intensity for the same absolute speed, it could be argued that any intervention aimed at reducing the relative intensity of the locomotive task would improve executive control while walking. The objective of the present study was to determine the effects of a short-term (8 weeks) high-intensity strength and aerobic training program on executive functions (single and dual-task) in a cohort of healthy older adults. Fifty-one participants were included and 47 (age: 70.7 +/- 5.6) completed the study which compared the effects of 3 interventions: lower body strength + aerobic training (LBS-A), upper body strength + aerobic training (UBS-A) and gross motor activities (GMA). Training sessions were held 3 times every week. Both physical fitness (aerobic, neuromuscular and body composition) and cognitive functions (RNG) during a dual task were assessed before and after the intervention. Even though the LBS-A and UBS-A interventions increased potential energy to a higher level (Effect size: LBS-A – moderate, UBS-A – small, GMA – trivial), all groups showed equivalent improvement in cognitive function, with inhibition being more sensitive to the intervention. Conclusion: These findings suggest that different exercise programs targeting physical fitness and/or gross motor skills may lead to equivalent improvement in cognition in healthy older adults. Such results call for further investigation of the multiple physiological pathways by which physical exercise can impact cognition in older adults.

**Keywords :** Energy cost of walking, peak oxygen uptake, potential energy, dual-task, cognition, mobility

## Introduction

The effects of physical activity on cognition in older adults have been extensively investigated in the last decade (see (281) for a review). Intervention (201, 280, 282) as well as cross sectional (187, 194, 283) and longitudinal (197, 198, 200) studies suggest that higher physical fitness levels are associated with better cognitive functions. Different review articles and meta-analyses of intervention studies also support these results, which tend to confirm the beneficial effects of physical activity on cognitive functions and mental health in older adults (191-193, 218, 279, 284). Moreover, it seems that physical fitness has a selective enhancing effect on executive functions (191, 201, 206). However, the mechanisms underlying this relationship are still poorly understood. The cardiovascular hypothesis suggests that aerobic fitness, measured by maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ), is the main physiological mediator, which determines cognitive functions. However, this hypothesis has been questioned (188). Indeed, improvements in cognition were reported independently of aerobic fitness after a physical training intervention (206). Among the other effective physical training interventions, it seems that strength training represents a privileged stimulation that could have an additive effect on cognition when compared to aerobic training (191). It was suggested that aerobic and strength training improved cognition through different molecular pathways (BDNF and IGF-1, respectively) known for their effect on neuronal growth, survival and differentiation (218, 225). Moreover, it was recently suggested that gross motor training involving coordination, balance and agility activities led to improvements in cognition independently of aerobic fitness (205, 226). However, to our knowledge, no studies compared the effects of these three interventions (aerobic, strength and gross motor activities) on cognitive functions.

The link between motor function and cognition in older adults has gained increasing interest over the last few years. The combination of a locomotive and a cognitive task, known as the dual-task

paradigm, is commonly used in mobility assessment and fall prevention (232). It implies that two tasks executed simultaneously will result in an altered performance in one or both tasks in comparison to performance in one task alone (229). In an interesting study, increased risk of falling was reported in older adults who had to stop walking when talking (228). Different explanations have been proposed to explain this phenomenon. Among them, the capacity-sharing theory suggests that attentional resources are limited which could explain why performance in one or two attention-demanding tasks executed in parallel could potentially deteriorate (229). Interestingly, aging is related to a reduced  $\dot{V}O_2\text{max}$  (64, 273) and a greater metabolic energy cost of walking (MECW) (6). These phenomena were described as a reduction in potential energy, defined as the energy available above what is essential for independent living (1), and could lead to an increase in the relative effort associated with usual gait speed. Recently, a report from our research group suggested that executive control during acute bouts of exercises declined at higher relative physical effort intensities (285). Therefore, one could argue that increasing the potential energy available could represent one mechanism by which physical training interventions lead to better cognitive functions in a dual-task situation. Indeed, the efficiency of high-intensity interval training to increase  $\dot{V}O_2\text{max}$  has been demonstrated in older adults (161, 163) and it appears that lower body strength training could represent an effective method to decrease MECW (78, 175). It was suggested that changes in fibre type distribution, reduced contribution of type 2 fibres, higher rate of force development, improved stretch-shortening cycle and better intermuscular coordination could at least partially explain the beneficial effects of a strength training program on the metabolic energy cost of locomotion (3, 15, 170). Along with these neuromuscular adaptations, changes in mitochondrial function and efficiency could also explain the relationship between strength training and MECW (3).

The objective of the present study was to assess the effects of a short-term high-intensity strength and aerobic training program on executive functions in a cohort of healthy older adults. Our hypothesis was that combined high-intensity training with emphasis on lower body strength would increase peak oxygen uptake and reduce the MECW more than a similar intervention focusing on upper body resistance training or gross motor activities. By increasing the potential energy available, the lower-body training program would reduce the relative intensity of the locomotive task, thereby reducing the attentional load related to walking. Ultimately, these fitness adaptations would allow an individual to allocate more attention to a cognitive task involving executive functions, which should result in better cognitive performance in a dual-task situation.

## Methods

### Overview

Participants included in this study were asked to complete an 8-week training protocol for a total of 24 training sessions of approximately 60 minutes each. Participants had to complete a cognitive, physical fitness and functional capacity assessment both prior to and after the training protocol in order to monitor training adaptations.

Participants available for the entire duration of the study aging between 60 and 85 years old were considered for inclusion. Participants were excluded if they were taking medication known to have an effect on gait and balance (benzodiazepines, neuroleptics, antidepressants), as well as being diagnosed with any significant orthopaedic, neurological, cardiovascular or respiratory problem. A diagnosis of a progressive somatic or psychiatric disease was also considered as an exclusion criterion. In addition, being under general anaesthesia in the 6 months prior to the beginning of the study, restricted mobility (use of walking aid), movement disorders, epilepsy and major visual or hearing impairments were among other reasons to exclude participants. Potential participants were also

excluded if they smoked or had uncontrolled alcohol or drug abuse. Finally, a minimal score of 24 on the Mini Mental State Examination (MMSE) (286) was required to be included in the study. All criteria were assessed during a telephone screening and the first scheduled meeting at the research center. A geriatrician and a neuropsychologist completed, as described elsewhere (282), an evaluation to confirm that all participants met the study's requirements. Briefly, 5 main components were investigated by the geriatrician: 1- medical and family medical history, 2- functional capacity (questionnaire on the ability to perform activities of daily living – ADL and instrumental activities of daily living - IADL), 3- medication list, 4- general overview of all physiological systems, 5- physical examination. The neuropsychological battery assessed global cognitive functioning (MMSE), abstract verbal reasoning (Similarities of the Weschler Adult Intelligence Scale – WAIS III), processing speed (Digit Symbol Coding subtest of the WAIS III), working memory (Digit Span backward/forward subtests of the WAIS III) and executive functions (inhibition/flexibility conditions of the modified Stroop Color-Word Test). Scores for inhibition and flexibility were computed by subtracting the average of the naming/reading conditions from the inhibition or the flexibility components (282). Using this ratio, smaller difference scores are associated with better executive function abilities. In this study, to obtain a general executive function score, results for inhibition and flexibility were added together. As for the other remaining cognitive tests, higher scores represented better performances. Two questionnaires were also used to assess: 1- sleep quality (Pittsburgh Sleep Quality Index – PSQI) (263) and, 2- the Profile of Mood States (POMS) (264). Scores were computed as previously reported (283).

Once included, the participants signed a written statement of informed consent. The protocol and procedures had been reviewed and approved by the Research Ethics Board of the Geriatric Hospital where the research took place. In addition, the study was conducted in accordance with



recognized ethical standards and national/international laws. Furthermore, upon inclusion participants were told to avoid any changes in their daily routines and eating habits.

After the first appointment at the research center, participants were randomized into three different interventions: 1) aerobic training combined with strength training of the lower body (LBS-A), 2) aerobic training combined with strength training of the upper body (UBS-A) and 3) gross motor activities (GMA). While LBS-A was considered as the main treatment with regards to the hypothesis for this study, UBS-A served as a control for energy expenditure during the protocol. Briefly, participants in the third group (GMA) were involved in stretching, locomotion, manipulation and relaxation activities and this group served as a control for social interactions.

#### Tests and Measures

All tests were completed at the research center of the geriatric institution where the study took place. A detailed schedule of the tests and measures is presented in Table XII.

#### Physiological Assessment

##### Peak Oxygen Uptake

$\dot{V}O_{2peak}$  was determined during a maximal continuous graded test performed on an ergocycle (Corival Recumbent, Lode B.V., Groningen, The Netherlands) as previously described (283). Initial mechanical power was set at 50 Watts for males and 35 Watts for females. Power was then increased by 15 watts every 60 seconds, with a fixed pedalling cadence of 60 to 80 revolutions per minute. Strong standardised verbal encouragements were given throughout the test. Termination criterion was the inability to maintain the required pedalling cadence. The highest  $\dot{V}O_2$  (Moxus, AEI Technologies, Naperville, IL, USA) over a 30-s period during the test was considered as  $\dot{V}O_{2peak}$  (in  $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ).

## Metabolic Energy Cost of Walking (MECW)

MECW was assessed during a specific experimental session using procedures described in a previous lab report (265). After a familiarisation protocol, participants had to perform three 6-min constant speed tests at 2.4, 4 and 5.6 km.h<sup>-1</sup> in a random order (ABC, BCA, CAB), interspersed by a 3-min standing recovery period. Mean  $\dot{V}O_2$  (Moxus, AEI Technologies, Naperville, IL, USA) of the 2 last minutes of each walking condition was considered as walking metabolic demand and then divided by walking speed to obtain the gross metabolic energy cost of walking (in ml.kg<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>). Caloric unit cost (kcal.kg<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>) was calculated as described elsewhere (26). Potential energy was defined as the difference between peak oxygen uptake and gross oxygen uptake at a submaximal walking speed (1).

## Cognition

### Executive Functions in a Dual-Task

Executive functions were assessed with the Random Number Generation task (RNG) (287). Participants had to randomly produce sequences of digits (using numbers from 1 to 9), at a precise rhythm of one answer per second. This task was considered complete after 100 answers were given. Following the MECW assessment, participants were first familiarized with this task. Afterwards, participants had to complete the task 5 times: a first time at rest while standing still on the treadmill (Single task 1), three times while walking at all 3 experimental speeds (Dual-Task 1, 2 and 3) and a last time at rest while standing on the treadmill (Single task 2). During the dual-task conditions, walking speed sequence and testing conditions were the same as they were during the MECW assessment (three 6-min constant speed tests interspersed by a 3-min standing recovery period). However, no oxygen measurements were recorded. The dual-task condition actually occurred at the fourth minute of every constant speed walking test. Since 100 correct answers were expected at a rhythm of one answer per second, participants walked at least 5 minutes and 40 seconds at every speed. Data was

analysed with the RgCalc software (288). A value for 6 different scores was computed. While the Turning Point Index (TPI - changes between ascending and descending phases), Adjacency score (numbers presented in pairs; 3-4) and Runs score (consecutive numbers mentioned in an ascending phase) are related to inhibition, the redundancy index (R - redundancy in answers), Coupon score (number of answers before giving all possibilities) and the mean repetition gap (MRG - mean of given answers before a repetition occurs) are considered as measures of updating/working memory (287). Single task performance was obtained by averaging scores of both single task conditions. A higher score characterizes improvements in TPI and MRG, while for all other indices (Adjacency, Runs, R Coupon), better performances are related to lower scores.

#### Functional Capacity

After the MECW and executive functions assessment, participants were asked to complete a short battery of 5 functional capacity tests. The tests consisted of handgrip strength (maximal isometric voluntary contraction) (289), lower body muscular endurance (30 sec. chair stand) (290) and mobility (timed up and go (254), 10m maximal walking speed (283) and 6 minute walk test (221)).

#### Isokinetic Strength Assessment

Concentric muscular strength was assessed bilaterally at 3 joints (knee, ankle, hip) using an isokinetic dynamometer (Biodex III, Biodex Medical Systems, New York, USA) (267). In the present report, only the results for the dominant leg, defined as the preferred kicking leg (155), will be presented. Gravity adjustment was accounted for by using the dynamometer software before each measurement. Maximal strength was assessed for lower limb joints (knee, ankle and hip – flexors and extensors) while the rate of force development was assessed only for the knee extensors (for details, see (283)).

## Body Composition Assessment

Body composition was assessed using a standard dual-energy x-ray absorptiometry (DXA – Lunar Prodigy; GE Healthcare, Madison WI, USA) protocol (268). Participants were asked to empty their bladder prior to the test, to wear light exercise clothes, and to remove all jewellery and metal objects. Considering that it was not possible to complete all assessments in the morning, participants were not asked to arrive in a fasted state. Calibration was completed each morning according to the manufacturer's guidelines. The same trained operator completed each scan. Data analyses were done with GE Encore software (enCORE2011, GE Healthcare, version 13.60).

## Inertial Strength Assessment (1RM)

Functional maximal strength was assessed using the one repetition maximal (1 RM) inertial method as described previously (144). For participants in the UBS-A group, 1 RM was assessed with the seated press exercise whereas participants in the LBS-A were assessed with the leg press exercise. GMA group was randomly divided into two subgroups; one being assessed on the seated press (GMA-U; n=8) while the other was tested on the leg press (GMA-L; n=8). Before the pre intervention testing session, all participants had to complete 3 familiarization sessions. All exercises were completed on guided devices (Atlantic inc, Laval, Quebec, Canada). During the first session, loads were rather light and emphasis was on positioning, postural control and exercise execution. In sessions 2 and 3, loads were gradually increased in order to reach 10-12 RM on the main exercise (leg press or seated press) by the end of session 3. All three sessions occurred within two weeks, typically three rest days apart (Monday-Friday). 1 RM post intervention tests were held during the last training session. Since high-intensity was maintained during this session, it was also considered as a training session.

## Training Intervention

The 2-month intervention involved 3 training sessions of approximately 60 minutes weekly for a total of 24 sessions. All sessions were held at the gym facility of the geriatric institution. Typically, training sessions were held on Mondays (day 1), Wednesdays (day 2) and Fridays (day 3). A graduate student in kinesiology supervised all training sessions in a 1 to 4 coach/participants ratio. Each session started with a general-to-specific warm-up period followed by main activities. For UBS-A and LBS-A, strength exercises were always completed before aerobic training.

## Warm-Up

The first 10 minutes were the same for all groups and consisted of a general warm-up using 1 of the 3 available ergometers (recumbent bike, elliptical or treadmill). Clear instructions were given to participants to select different ergometers from session to session. After the general warm-up, participants in the GMA group were directed to their main activities whereas participants from the UBS-A and LBS-A group executed a more specific warm-up, which consisted of light strength exercises (UBS-A: pushes and pulls using elastic bands, LBS-A: chair stands).

## Aerobic Training

On day 1 and 3, aerobic training consisted of a high-intensity interval protocol. Briefly, participants had to perform 15second bouts of cycling on a recumbent ergometer (LifeFitness, Kinequip, St-Hubert, Quebec, Canada) at an intensity corresponding to the maximal aerobic power (MAP) measured during the incremental test. After each high-intensity bout, an active 15second recovery was prescribed at an intensity corresponding to 60% of the MAP. Each session involved 2 sets with each set lasting between 4 and 7 minutes. Therefore, during each set, participants had to perform between 2 and 3.5 minutes of cycling at their MAP. Exact procedures regarding volume periodization are presented in Table XIII. A recovery period of 5 minutes was allowed between sets.

On day 2, a continuous 20minute cycling protocol was established. Intensity was set at 60% for the first 4 weeks and at 65% for the remainder of the program.

### Strength Training

Strength training was similar in terms of volume and intensity for both UBS-A and LBS-A groups. During each training session, participants had to complete 4 rounds of a 2-3 station circuit that started with exercises for strength development (4-8 RM) followed by exercises planned for strength endurance development (12-20 RM). In a circuit round, rest periods corresponded to the time it took to go from one station to the other (approximately 30 seconds). Before starting another circuit round, a rest period of 2 minutes was allowed. For the LBS-A group, the leg press and body weight plantar flexion exercises were prescribed on day 1 and 3 (i.e. each performed for a total of 16 days). The leg extension and leg flexion exercises were executed on alternate days (i.e. each performed for a total of 12 days) whereas the floor hip extension exercise was on day 2 only (i.e. performed for a total of 8 days). For the UBS-A group, two different training sessions were prescribed on alternate days: Day 1 (12 sessions) consisted of seated chest presses, and shoulder lateral/frontal abductions; Day 2 (12 sessions) consisted of wrist flexions, seated horizontal rowing and shoulder external rotations. Training prescription for all exercises was made in accordance to the ACSM guidelines for strength development in older adults (291). Details regarding training volume and intensity are presented in Table XIV.

### GMA Training

During the first 2 weeks, stretching activities were prescribed in order to improve overall body flexibility. After joint mobilization exercises, different static stretching exercises were maintained for a duration of 20-30 seconds. These exercises were done in a variety of positions: standing or seated on a chair or on a yoga mat. To complete these first 6 sessions, time was spent

doing relaxation exercises focusing on different patterns to slow down breathing. At this point, participants were in a supine position on a yoga mat. For the next 3 weeks, training sessions started with some locomotion exercises in which participants had to walk through obstacles and carry different objects (balls) to a given goal. The remainder of the sessions was dedicated to stretching and relaxation exercises as executed in the first 6 sessions. During the last 3 weeks, all training sessions started with 15 minutes of ball manipulation. Aside from classic juggling lessons, other games such as throwing a ball to a fixed target (basket) were presented to participants. These final 9 sessions ended with a recall on previous exercises: locomotion, stretching and relaxation exercises.

### Statistical Analysis

Standard statistical methods were used for the calculation of means and standard deviations. Normal Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro-Wilk test and homogeneity of the variance by the Levene test. Baseline differences were assessed with one-way ANOVAs for all variables showing a normal distribution and homogeneity of the variance. Otherwise, between group differences were assessed with the Kruskal-Wallis test. Differences between groups for the categorical variables from the medical/cognitive domain were assessed with a Chi2 test. Training related effects were analyzed using two-way ANOVAs (time X group) with repeated measures on the time factor. The magnitude of the observed differences on the time factor was assessed for each group by Hedges  $g$  ( $g$ ) (269). As proposed by Cohen (270), the magnitude of the effect was considered small ( $0.2 < ES \leq 0.5$ ), moderate ( $0.5 < ES \leq 0.8$ ), or large ( $ES > 0.8$ ). When an interaction was found, relative differences ( $((\text{post-training} - \text{pre-training})/\text{pre-training} * 100)$ ) were compared between groups using one-way ANOVAs. If the one-way ANOVA was significant, post hoc analyses using the Bonferroni test were completed. Pearson's correlations coefficients were computed to verify the association between changes in fitness (potential energy) and dual-task performance. We considered

a correlation over 0.90 as very high, between 0.70 and 0.89 as high and between 0.50 and 0.69 as moderate (271). Significance level was set at  $p < 0.05$  for all analyses. Statistical tests were conducted with the IBM SPSS statistics software, version 20.

## Results

### Participation

As described in figure 7, 51 participants were randomized into one of the three experimental groups. After inclusion in the study, one participant from the LBS-A group and three participants from the UBS-A group decided to stop, thus 47 participants completed the intervention. In three cases, previous injuries (2 lower back – shoulder) came back after involvement in strength straining. The other dropout was related to a lack of interest. All participants assigned to the GMA group completed the whole protocol. Participants' medical and cognitive characteristics at enrolment are presented in Table XV. Differences between groups were significant ( $p < 0.05$ ) for sleep quality, executive functions and arthritis. As shown in Table XVI - XIX, participants in the GMA group tended to be less physically fit in all assessed domains (body composition, aerobic capacity, strength and functional capacity).

Compliance to the training program was very high. Participants who completed the protocol in its entirety attended on average 96.9% (+/- 4%) of all training sessions. No significant differences were found between groups.

Because of personal beliefs, one participant from the UBS-A group refused to complete the body composition assessment. Measurement errors resulted in some data being removed from the analysis. For the MECW, data from 3 participants (2 LBS-A, 1 GMA) was not considered because of air leakage in the facemask that was not detected during the evaluation period. Data for one participant from the GMA-L group was removed from the 1 RM analysis because of a significant difference in positioning while performing pre and post strength assessment, which resulted in an outlier value



after the intervention. Finally, because some participants experienced specific joint pain while performing the isokinetic strength assessment, some data was removed from the analysis (knee extension: 1 LBS-A; knee flexion: 1 LBS-A and 1 GMA; ankle dorsiflexors: 2 GMA, ankle plantar flexors: 1 GMA; hip extensors and flexors: 2 GMA and 1 UBS-A).

### Body Composition

A two-way ANOVA with repeated measures revealed an effect of time ( $p < 0.05$ ) and a time by group interaction ( $p < 0.05$ ) between groups for both fat and fat-free mass (Table XVI). A one-way ANOVA with Bonferroni post hoc tests showed that the observed pre-post relative changes (see figure 8A and B) were significantly different between groups for fat-free mass (LBS-A and UBS-A vs GMA;  $p < 0.05$ ) and for fat mass (LBS-A vs. GMA;  $p < 0.05$ ). The magnitude of the pre-post difference for fat and fat-free mass was considered small for LBS-A ( $g = -0.20$  and  $0.20$ , respectively), and trivial for both UBS-A ( $g = -0.07$  and  $0.11$  respectively) and GMA ( $g = 0.00$  and  $-0.05$  respectively).

### Aerobic Capacity

Aerobic capacity data is presented in Table XVII and Figure 8. For  $\dot{V}O_{2peak}$ , an effect of time ( $p < 0.001$ ) and a time by group interaction ( $p < 0.001$ ) between groups was found. The observed pre-post relative changes (see figure 2C) were significantly different between groups (LBS-A and UBS-A vs GMA;  $p < 0.001$ ). The magnitude of the pre-post difference was considered moderate ( $g = 0.51$ ) for the LBS-A group whereas it was small ( $g = 0.47$ ) and trivial ( $g = -0.04$ ) for the UBS-A and GMA groups.

A time effect ( $p < 0.05$ ) was found for the MECW at all walking speeds while a time by group interaction ( $p < 0.05$ ) between groups was found only at  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . The observed pre-post relative changes at  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (see figure 2D) were significantly different between groups (GMA vs. UBS-A;  $p < 0.05$ ). The magnitude of the pre-post difference was considered moderate to trivial for the LBS-A

group ( $g = -0.44, -0.24$  and  $-0.16$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively) whereas it was rather trivial to small for the UBS-A group ( $g = -0.10, 0.02$  and  $-0.21$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively). For the GMA group, differences were considered moderate ( $g = -0.68, -0.76$  and  $-0.54$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively).

For potential energy, an effect of time ( $p < 0.001$ ) and a time by group interaction ( $p < 0.05$ ) were observed for all walking conditions. The observed pre-post changes were significantly different between groups (LBS-A and UBS-A vs GMA;  $p < 0.05$ ) at  $2.4$  and  $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . At  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , a significant difference ( $p < 0.05$ ) was observed only between UBS-A and GMA, while there was a tendency towards significance for LBS-A vs GMA ( $p = 0.085$ ). The magnitude of the pre-post difference (see figure 9) was considered moderate for the LBS-A group ( $g = 0.64, 0.63$  and  $0.59$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively) whereas it was rather small for the UBS-A group ( $g = 0.48, 0.42$  and  $0.50$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively). For the GMA group, differences were considered trivial ( $g = 0.18, 0.17$  and  $0.16$  at  $2.4, 4$  and  $5.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectively).

#### Neuromuscular parameters

An effect of time ( $p < 0.001$ ) and a time by group interaction ( $p < 0.05$ ) between experimental and control groups for both  $1 \text{ RM}$  leg press and seated press were found. For leg press, the magnitude of the pre-post difference was considered small for the LBS-A group ( $g = 0.40$ ) while it was trivial for the GMA-L group ( $g = 0.11$ ). For seated press, effect sizes were small for the UBS-A group ( $g = 0.21$ ) and trivial for the GMA-U group ( $g = 0.00$ ). Relative pre-post changes are presented in figure 10 for all groups.

Results (means  $\pm$  SD) for the isokinetic strength assessment are presented in Table XVIII. An effect of time for the ankle plantar flexors ( $p < 0.05$ ) and dorsiflexors ( $p < 0.001$ ) was found. Effect sizes were considered trivial to small for the ankle plantar flexors ( $g = -0.25, -0.33, -0.16$  for LBS-A,

UBS-A and GMA respectively) while they were small to moderate for the ankle dorsiflexors ( $g = -0.54, -0.30, -0.35$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

A time by group interaction for the hip flexors ( $p < 0.001$ ) and MIVC ( $p < 0.05$ ) was observed. The observed pre-post relative changes were significantly different between groups for the hip flexors (LBS-A and GMA vs. UBS-A;  $p < 0.05$ ) but not for the MIVC ( $p = 0.169$ ). The magnitude of the pre-post difference was considered trivial to moderate for the hip flexors ( $g = 0.19, -0.58, 0.18$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) while effect size were trivial to small for MIVC ( $g = 0.46, -0.04, -0.11$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

#### Functional Capacity

Results for all functional capacity tests are presented in Table XIX. The statistical analysis revealed a time effect for grip strength, chair stands, 10MWT and the 6MWT ( $p < 0.05$ ), but no time by group interaction in any of the parameters. Effect sizes were trivial to small for grip strength ( $g = 0.08, 0.23, 0.05$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively), chair stands ( $g = 0.07, 0.20, 0.41$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) and the 6MWT ( $g = 0.26, 0.37, 0.12$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively). Small effect sizes were reported for the 10MWT ( $g = -0.27, -0.30, -0.28$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

#### Executive Functions

Table XX presents performance in the RNG task at rest (single task). An effect of time ( $p < 0.05$ ) for two indices of inhibition (TPI and Adjacency) was found. The magnitude of the pre-post difference was considered small for TPI ( $g = 0.39, 0.23, 0.34$  for LBS-A, UBS-A and GMA, respectively) and for Adjacency ( $g = -0.43, -0.31, -0.44$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

Table XXI presents performance in the RNG task while walking at different speeds (dual-task). At 2.4 km.h<sup>-1</sup>, an effect of time ( $p < 0.05$ ) was found for two indices of inhibition (TPI and Adjacency) and for two indices of working memory (R and MRG) without time by group interaction. Effect sizes were small for TPI ( $g = 0.29, 0.20, 0.32$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively), small to moderate for Adjacency ( $g = -0.29, -0.28, -0.69$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively), trivial to moderate for R ( $g = 0.18, 0.43, 0.50$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) and for MRG ( $g = -0.62, -0.07, -0.42$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

At 4 km.h<sup>-1</sup>, an effect of time ( $p < 0.05$ ) for Adjacency and a time by group interaction for R ( $p < 0.05$ ) were observed. The observed pre-post changes on R were almost significantly different between groups (LBS-A vs. GMA;  $p = 0.054$ ). Effect sizes were trivial to small for Adjacency ( $g = -0.18, -0.21, -0.35$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) and moderate for R ( $g = -0.42, 0.30, 0.48$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

At 5.6 km.h<sup>-1</sup>, an effect of time ( $p < 0.05$ ) was found for two indices of inhibition (TPI and Adjacency) and for two indices of working memory (R and MRG). Moreover, a time by group interaction for MRG was observed. A one-way ANOVA with Bonferroni post hoc tests showed that the observed pre-post relative changes on MRG were almost significantly different between groups (LBS-A vs. GMA;  $p = 0.053$ ). Effect sizes were trivial to small for TPI ( $g = 0.16, 0.21, 0.33$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) and for Adjacency ( $g = -0.38, -0.40, -0.17$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively), small for R ( $g = 0.33, 0.48, 0.23$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively) and trivial to large for MRG ( $g = -0.09, -0.57, -1.12$  for LBS-A, UBS-A and GMA respectively).

## Correlational analysis

In order to verify the association between changes in fitness (potential energy) and dual-task performance, a correlational analysis was conducted. No correlations were found between pre-post changes in potential energy and pre-post changes in any of the RNG indices during the dual-task.

## Discussion

The objective of the present study was to determine the effects of a short-term high-intensity strength and aerobic training program on executive functions in a cohort of healthy older adults. Our hypothesis was that combined high-intensity training with emphasis on lower body strength would increase peak oxygen uptake and reduce the MECW more than a similar intervention focusing on upper body resistance training. By increasing the potential energy available, the lower-body training program would reduce the relative intensity of the locomotive task, thereby reducing the attentional load associated with walking. Ultimately, these fitness adaptations would allow an individual to allocate more attention to a cognitive task involving executive functions, which should result in better cognitive performance in a dual-task context.

Results suggest that the intervention produced gains in aerobic and inertial strength as well as body composition and functional capacity improvements. From a cognition perspective, inhibition scores were improved after the intervention both in a single and a dual-task context. During the dual-task condition, results also suggest that these inhibition improvements were observed while walking at 2.4 and 5.6 km.h<sup>-1</sup> altered working memory. Contrary to our hypothesis, these cognitive changes were not specific to the lower-body strength and aerobic training program. Indeed, increasing the potential energy (higher  $\dot{V}O_{2peak}$  and reduced MECW) does not represent a preferential method to improve cognitive functions either in a single or a dual-task condition. Rather, it appears that RNG performance was improved similarly in all three groups, particularly on inhibition indices (TPI and/or

Adjacency) during both experimental conditions (single and dual-task). This specific effect of physical training on inhibition has been previously reported. Recently, in a cross-sectional study, higher physical activity levels were associated with better inhibition performance while this effect was not significant for working memory (187).

These results find some support in recent reports. In a group of healthy older adults (69.8 +/- 3.4 years old), the RNG (single) task was used to assess the effects of two training modalities on executive functions. After three months of training twice a week, the authors reported that both progressive resistance training and multicomponent training (coordination, balance, agility, stretching and relaxation) were similarly efficient to improve performance on inhibition indices (226). Interestingly, no references were made to any indices of working memory. However, it was suggested that mechanisms to explain these cognitive gains differed between the two modes of exercise. Whereas strength gains tended to mediate cognitive improvements, it was speculated that motor tasks involving coordination and perceptual adaptations were sufficient to increase cognitive performance. Similarly, a 12-month training intervention revealed that both cardiovascular and coordination training were effective in increasing cognitive performance in a group of older adults aged between 62 and 79 years old (205). Both interventions resulted in a decrease of the activation of the prefrontal cortex, which was interpreted as better information processing. However, it appears that mechanisms underlying these performances were specific to the intervention. Whereas cardiovascular training was associated with increased activation of the sensorimotor network, the coordination training resulted in elevated activation of the visual-spatial network.

Intriguingly, working memory scores were altered in dual-task conditions (at 2.4 and 5.6 km.h<sup>-1</sup>). Although purely speculative, it could be argued that improvements in inhibition led participants to produce digit sequences more randomly, which could increase stress on working memory. It is also

suggested that this effect was only observed at 2.4 and 5.6 km.h<sup>-1</sup> because of the particular demands of walking at these speeds (maintain balance and higher relative intensity, respectively). At 4.km.h<sup>-1</sup>, a time by group interaction was found in favour of the LBS-A group (R – working memory). It could be argued that this group took advantage of the higher improvements in potential energy at this comfortable walking speed. Clearly, more research is needed to confirm these hypotheses.

Taken together, these results suggest that the cardiovascular hypothesis alone is insufficient to explain the mechanisms supporting the physical fitness/cognition relationship. Some previous reports demonstrate that improvements in cardiovascular fitness are not systematically related to better cognitive performance (188, 206). Moreover, different interventions such as strength training (through the IGF-1 molecular pathway) and coordination/balance programs were also effective to improve cognition in older adults (205, 224, 226). Likewise, a recent cross-sectional analysis from our lab suggests that participants with better cognitive flexibility performances were characterized not only by greater cardiovascular health as measured by  $\dot{V}O_{2peak}$  but also by better performances in neuromuscular and general mobility tests (283). Nonetheless, results from both cross-sectional and intervention studies demonstrated that higher cardiovascular fitness was related to better cognitive performance in older adults (194, 201, 280). Aerobic training, related to the BDNF molecular pathway (225), has shown associations to increases in hippocampal volume and greater serum levels of BDNF (292). Considering all these mechanisms, one could argue that multiple pathways could lead older adults to better cognitive functions; the appropriate intervention being prescribed based upon the individual's strengths and weaknesses as well as considering his adaptability to the training program chosen.

It has to be acknowledged that this study had some limitations. The dual-task paradigm implies simultaneously performing two tasks which should result in performance decrements in one

or both tasks if attentional resources were exceeded (229). In the dual-task model presented in this study, cognitive performance was assessed with the RNG task while MECW represented the main variable regarding the locomotive task. Since participants had to wear a facemask during the MECW assessment, it was suggested that completion of the RNG task be done afterwards to facilitate the evaluator comprehension of the number sequences. This methodological issue could have led to biased data interpretation. Indeed, gait speed and variability are two common variables known to be altered in a dual-task condition (293). Since speed was kept constant on the treadmill during the dual-task, it is still possible that gait variability, or any other kinematic variable, was modified during the dual-task, which could have an effect on the MECW (11). Moreover, since participants were not instructed to prioritize one task over another, each individual's focus and performance on each task probably differed based on personal postural control and self-awareness ability (294). However, considering the main objective of this study, which was to assess the effect of an increase in potential energy on cognitive performance in single and dual-task, this bias does not represent a major limitation.

Since no time\*group interactions were found in the single task condition, one could argue that a learning effect could explain the observed results. This phenomenon is probably not involved in this study since it was reported that the RNG task is not influenced by the practice effect (287, 295, 296). However, it has to be mentioned that this was recently challenged. Indeed, a practice effect was reported for Adjacency but not for other inhibition scores (TPI and Runs) (226). Taken together, these observations don't cast doubt on the results of the present study. The absence of a time\*group interaction in RNG performances could also be explained by differences at baseline for the executive function scores as measured with the Stroop task, which could have led the LBS-A group to a ceiling effect. However, this phenomenon is rather unlikely since no differences between groups were found



at baseline for both single and dual task RNG performances, which was the main outcome with regards to cognitive performance. Finally, one could argue that the small sample size of this study could explain why no differences were found between groups with regards to the main hypothesis. However, it has to be mentioned that studies with similar sample size revealed significant cognitive improvements after a physical training intervention (204, 297). Therefore, it is rather unlikely that the results presented in this article are related to a lack of statistical power.

## Conclusion

The objective of the present study was to determine the effects of a short-term high-intensity strength and aerobic training program on executive functions in a cohort of healthy older adults. Results revealed that this intervention produced the expected gains on aerobic fitness, inertial strength and body composition. From a cognitive perspective, inhibition was improved after the intervention both in a single and a dual-task context. However, contrarily to our hypothesis, these cognitive changes were not specific to the lower-body strength and aerobic training program. Indeed, greater potential energy available was not preferentially associated with better cognition, suggesting that interventions targeting flexibility, locomotion, manipulation and relaxation lead to improvement in cognitive functions in healthy older adults and this improvement is equivalent to the one observed after an aerobic and strength physical fitness program. However, it appears, based on previous reports, that mechanisms underlying these adaptations are specific to the intervention. These findings tend to suggest that multiple pathways could lead older adults to improve cognition through different exercise programs targeting physical fitness and/or general motor abilities. Such observations could help clinicians to plan appropriate interventions based on each individual's strengths and weaknesses.

## Acknowledgements

This work was supported by a grant from the Canadian Institutes of Health Research (CIHR #209441). LB is supported by the Canadian Research Chair Program. NB received a doctoral scholarship from the Quebec Network for Research on Aging (QNRA).

Tables

<b>Table XII – Study Overview</b>		
Weeks	Sessions	Tests, Measures and Training
1	1	1- Medical and neuropsychological assessment, $\dot{V}O_{2peak}$ , treadmill familiarisation
2	2-3	2- Metabolic energy cost of walking and executive functions in a dual-task, functional capacity 3- Isokinetic strength assessment
3-4	4-7	4- Body Composition, Strength training familiarisation 5-6- Strength training familiarisation 7- Inertial strength assessment
5-12	8-31	8 to 30- Training 31- Body Composition, Inertial strength assessment
13	32	32- $\dot{V}O_{2peak}$
14	33-34	33- Metabolic energy cost of walking and executive functions in a dual-task, Functional capacity 34- Isokinetic strength assessment

---

**Table XIII – Aerobic training prescription**

---

Week	Volume Sets*reps*time
5 and 9	2*10*15 seconds
6 and 10	2*12*15 seconds
7 and 11	2*14*15 seconds
8 and 12	2*8*15 seconds

---

High-intensity bouts at Maximal Aerobic Power (MAP)

Active recovery between bouts (15 sec. at 60% MAP)

Passive recovery between sets (5 minutes)

**Table XIV - Strength training prescription****Lower Body**

Day 1 and 3		
1- Leg press 4 sets of 4-6 RM (Guided device)	2- Leg extension or flexion (Alternate days) 4 sets of 6-8 RM (Guided device)	3- Standing Plantar flexion Weeks 1-4: bilateral Weeks 5-8: unilateral 4 sets of 20 repetitions (Body weight)
Day 2		
1- Leg extension or flexion (Alternate days) 4 sets of 6-8 RM (Guided device)	2- Unilateral hip extension 4 sets of 12 repetitions (Body weight)	

**Upper Body**

Day 1		
1- Seated Chest Press 4 sets of 4-6 RM (Guided device)	2- Shoulder frontal/lateral abductions 4 sets of 20 RM (Free weights)	3- Wrist flexion 4 sets of 12 RM (Free weights)
Day 2		
1- Horizontal rowing 4 sets of 4-6 RM (Guided device)	2- Shoulder external rotations 4 sets of 12 repetitions (Elastic bands)	

Rest between stations: 30 seconds approximately

Rest between circuit rounds: 2 minutes

RM: repetitions maximum

**Table XV:** Medical/Cognitive characteristics of participants.  
Data are reported as mean (SD) or number of participants.

<b>General</b>	<b>LBS-A</b>	<b>UBS-A</b>	<b>GMA</b>
Gender (Number of Females - Males)	9-7	8-7	12-4
Age – years	69.8 (3.9)	69.5 (6.1)	72.7 (6.3)
Education – years	15.3 (3.4)	14.9 (2.4)	14.1 (3.0)
POMSGlobal – score	8.1 (21.1)	10.3 (17.9)	33.7 (39.9)
PSQIGlobal – score /21	4.9 (3.8) * <sup>0.028</sup>	4.1 (2.5) * <sup>0.002</sup>	7.7 (3.3)
Number of Daily Medications	3.8 (3.4)	2.9 (2.9)	4.8 (2.3)
<b>Cognition</b>			
MMSE – score /30	29.0 (1.1)	28.6 (0.9)	28.9 (1.2)
Verbal Reasoning – score /32	22.8 (6.2)	20.2 (4.2)	20.4 (5.5)
Processing Speed – score /132	62.6 (14.9)	52.6 (9.6)	59.1 (14.9)
Working Memory – score /30	17.9 (4.3)	16.3 (4.4)	15.1 (3.3)
Executive Functions – sec.	66.8 (10.6) * <sup>0.004</sup>	73.2 (14.7)	90.9 (26.5)
<b>Cardiovascular diseases</b>			
Hypertension	3	5	8
Diabetes	0	3	1
Dyslipidemia	3	5	5
Angina	1	0	0
Infarctus	0	1	0
Arrhythmia	1	1	1
Valvular disease	0	1	2
<b>Pulmonary diseases</b>			
COPD	0	0	1
Asthma	1	1	1
<b>Musculoskeletal disorders</b>			
Arthritis	6	12 <sup>#0.029</sup>	14 <sup>#0.003</sup>
Osteoporosis	4	3	5
History of Fractures	2	5	5
Other Musculoskeletal Problems	8	9	8
History of Falls	2	2	1
<b>History of depression</b>	1	2	1
<b>Sedentary lifestyle</b>	1	2	2
Different from GMA at baseline * <sup>pvalue</sup>			
Different from LBS-A at baseline # <sup>pvalue</sup>			

**Table XVI – Anthropometric characteristics**

Data are reported as mean (SD).

	LBS-A (n = 16)		UBS-A (n = 14)		GMA (n= 16)	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
BMI <sup>a</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	24.4 (2.4)	24.1 (2.3)	26.1 (4.0)	26.0 (3.8)	26.7 (4.6)	26.5 (4.5)
Waist (cm)	86.8 (7.9)	87.9 (8.2)	92.8 (12.3)	93.2 (12.4)	91.1 (9.7)	92.4 (8.9)
FM <sup>b</sup> †<0.001§ (%)	31.6 (4.8) * <sup>0.014</sup>	30.6 (4.6)	32.6 (7.6) * <sup>0.048</sup>	32.0 (7.8)	39.0 (8.4)	39.0 (8.8)
FFM <sup>c</sup> †0.01§§ (%)	65.8 (4.9) * <sup>0.029</sup>	66.8 (4.7)	64.4 (7.1)	65.2 (7.4)	59.1 (8.5)	58.7 (8.2)
BMD <sup>d</sup> (g/cm <sup>2</sup> )	1.07 (0.11)	1.08 (0.11)	1.15 (0.16)	1.14 (0.15)	1.12 (0.13)	1.11 (0.11)

Different from GMA at baseline \*<sup>pvalue</sup>Time effect †<sup>pvalue</sup>Interaction: §<sup>p</sup> = 0.009, §§<sup>p</sup> = 0.003<sup>a</sup>: Body Mass Index, <sup>b</sup>: Fat Mass, <sup>c</sup>: Fat Free Mass, <sup>d</sup>: Bone Mineral Density

**Table XVII – Aerobic performance**

Data are reported as mean (SD).

	<b>LBS-A (n = 16)</b>		<b>UBS-A (n = 15)</b>		<b>GMA (n = 16)</b>	
	Except MECW (n = 14)				Except MECW (n = 15)	
	<b>Pré</b>	<b>Post</b>	<b>Pré</b>	<b>Post</b>	<b>Pré</b>	<b>Post</b>
$\dot{V}O_{2peak}$ <sup>a†&lt;0.001§</sup> (ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	26.6 (4.1)* <sup>0.001</sup>	29.0 (4.3)	25.4 (6.0)* <sup>0.012</sup>	28.3 (5.8)	20.1 (4.3)	19.9 (4.5)
MECW <sup>b</sup> (kcal.kg <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> )						
2.4 km.h <sup>-1</sup> †<0.001	1.37 (0.17)	1.30 (0.13)	1.36 (0.22)	1.33 (0.21)	1.41 (0.19)	1.27 (0.18)
4 km.h <sup>-1</sup> †0.005§§	0.98 (0.13)	0.95 (0.12)	0.98 (0.14)	0.98 (0.16)	1.00 (0.10)	0.93 (0.06)
5.6 km.h <sup>-1</sup> †0.012	0.95 (0.11)	0.93 (0.11)	0.98 (0.14)	0.95 (0.13)	0.95 (0.09)	0.90 (0.08)

Different from GMA at baseline\*<sup>pvalue</sup>Time effect<sup>†pvalue</sup>

Interaction: §p &lt; 0.001, §§p = 0.031

<sup>a</sup>: Peak Oxygen Uptake, <sup>b</sup>: Metabolic Energy Cost of Walking



**Table XVIII – Neuromuscular performance**

Data are reported as mean (SD).

	<b>LBS-A (n = 16)</b> Except KEXT and KFLEX (n = 15)		<b>UBS-A (n = 15)</b> Except HEXT and HFLEX (n = 14)		<b>GMA (n = 16)</b> Except ADF, HEXT and HFLEX (n = 14) Except APF (n = 15)	
	<b>Pré</b>	<b>Post</b>	<b>Pré</b>	<b>Post</b>	<b>Pré</b>	<b>Post</b>
<b>Isokinetic Strength (Nm.kg<sup>-1</sup>)</b>						
APF <sup>a</sup> 180°/sec <sup>‡0.004</sup>	2.16 (0.42) * <sup>0.001</sup>	2.05 (0.38)	2.00 (0.51)* <sup>0.013</sup>	1.82 (0.54)	1.49 (0.59)	1.39 (0.47)
ADF <sup>b</sup> 30°/sec <sup>‡&lt;0.001</sup>	0.37 (0.06)* <sup>0.008</sup>	0.33 (0.08)	0.33 (0.08)	0.31 (0.07)	0.30 (0.07)	0.27 (0.08)
KEXT <sup>c</sup> 60°/sec	1.77 (0.38)* <sup>0.012</sup>	1.81 (0.36)	1.74 (0.59)* <sup>0.019</sup>	1.78 (0.60)	1.22 (0.51)	1.28 (0.49)
KFLEX <sup>d</sup> 60°/sec	0.86 (0.21)	0.94 (0.25)	0.91 (0.28)* <sup>0.021</sup>	0.86 (0.24)	0.65 (0.27)	0.71 (0.30)
HEXT <sup>e</sup> 120°/sec	1.70 (0.30)	1.73 (0.49)	1.64 (0.50)	1.52 (0.55)	1.48 (0.53)	1.41 (0.59)
HFLEX <sup>f</sup> 120°/sec <sup>§</sup>	1.33 (0.37)* <sup>0.029</sup>	1.40 (0.33)	1.38 (0.55)* <sup>0.039</sup>	1.04 (0.35)	0.87 (0.37)	0.95 (0.38)
MIVC <sup>g</sup> <sup>§§</sup>	2.09 (0.33)	2.30 (0.47)	2.05 (0.61)	2.02 (0.64)	1.64 (0.61)	1.58 (0.48)
<b>Rate of Force Development (Nm.sec<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>						
Maximum	8.23 (3.36)	10.07 (5.78)	7.75 (4.11)	7.87 (3.28)	7.33 (5.90)	7.22 (4.98)

Different from GMA at baseline <sup>\*pvalue</sup>Time effect <sup>‡pvalue</sup>Interaction: <sup>§</sup>p < 0.001, <sup>§§</sup>p = 0.027<sup>a</sup>: Ankle Plantar Flexors, <sup>b</sup>: Ankle Dorsi Flexors, <sup>c</sup>: Knee Extensors, <sup>d</sup>: Knee Flexors, <sup>e</sup>: Hip Extensors,<sup>f</sup>: Hip Flexors, <sup>g</sup>: Maximal Isometric Voluntary Contraction

**Table XIX – Functional Capacity**

Data are reported as mean (SD).

	LBS-A (n = 16)		UBS-A (n = 15)		GMA (n = 16)	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
Grip <sup>†0.001</sup> (kg)	43.0 (18.7)	44.7 (20.6)	44.9 (18.1)	49.4 (18.6)	37.7 (13.5)	38.6 (15.4)
TUG <sup>a</sup> (sec.)	5.1 (0.6)* <sup>0.003</sup>	4.9 (0.6)	5.4 (0.9)* <sup>0.046</sup>	5.3 (0.7)	6.2 (1.0)	6.1 (1.1)
CHST <sup>b†0.009</sup> (Repetitions)	19.7 (5.3)* <sup>0.001</sup>	20.1 (6.2)	16.3 (5.0)	17.3 (4.1)	13.3 (3.0)	15.0 (4.0)
10MWT <sup>c †&lt;0.001</sup> (sec.)	4.5 (0.6)* <sup>0.002</sup>	4.3 (0.7)	4.7 (0.8)* <sup>0.02</sup>	4.4 (0.8)	5.5 (0.8)	5.2 (0.9)
6MWT <sup>d †0.001</sup> (meters)	636 (48)* <sup>0.002</sup>	650 (51)	586 (79)	616 (72)	548 (75)	559 (83)

Different from GMA at baseline\*<sup>pvalue</sup>Time effect<sup>†pvalue</sup><sup>a</sup>: Timed Up and Go, <sup>b</sup>: Chair Stands, <sup>c</sup>: 10 meters Maximal Walking Test, <sup>d</sup>: 6 Minute Walk Test

**Table XX – Random Number Generation Performance (single task)**

Data are reported as mean (SD).

REST	LBS-A (n = 16)		UBS-A (n = 15)		GMA (n = 16)	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
<b>Inhibition</b>						
TPI <sup>†0.003</sup>	81.7 (12.2)	86.7 (12.1)	74.2 (17.3)	78.3 (13.2)	80.2 (17.9)	86.3 (11.5)
Runs	1.04 (0.42)	1.07 (0.29)	1.40 (0.67)	1.31 (0.55)	1.06 (0.56)	0.99 (0.41)
Adjacency <sup>†&lt;0.001</sup>	35.6 (9.0)	31.1 (10.2)	43.3 (13.8)	39.0 (12.9)	37.8 (13.7)	32.0 (9.8)
<b>Working Memory</b>						
R	1.72 (1.35)	1.52 (0.78)	1.55 (0.73)	1.91 (0.91)	1.48 (0.95)	1.71 (0.80)
Coupon	17.7 (4.0)	17.2 (2.5)	17.8 (3.4)	18.7 (4.9)	16.6 (3.1)	17.0 (3.5)
MRG	7.6 (0.6)	7.7 (0.4)	7.9 (0.5)	7.7 (0.5)	7.8 (0.5)	7.6 (0.4)

Time effect<sup>†pvalue</sup>

For Runs, Adjacency, R and Coupon scores, lower scores represent better performances

**Table XXI – Random Number Generation Performance (dual-task)**

Data are reported as mean (SD).

2.4 km.h <sup>-1</sup>	LBS-A (n = 16)		UBS-A (n = 15)		GMA (n = 16)	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
<b>Inhibition</b>						
TPI <sup>†0.03</sup>	81.3 (9.9)	85.1 (13.6)	71.3 (18.3)	75.6 (21.6)	80.2 (20.4)	86.3 (11.8)
Runs	1.15 (0.46)	1.11 (0.46)	1.78 (1.08)	1.54 (1.33)	1.22 (0.81)	1.05 (0.40)
Adjacency <sup>†&lt;0.001</sup>	36.9 (10.9)	33.6 (10.6)	45.5 (14.1)	40.9 (16.0)	37.5 (14.4)	28.3 (9.2)
<b>Working Memory</b>						
R <sup>†0.004</sup>	1.30 (0.93)	1.47 (0.79)	1.52 (0.93)	2.23 (1.80)	1.62 (1.11)	2.32 (1.46)
Coupon	19.9 (19.7)	16.6 (3.0)	17.9 (3.5)	19.5 (8.3)	16.9 (4.4)	20.4 (8.6)
MRG <sup>†0.016</sup>	8.2 (0.6)	7.7 (0.8)	7.8 (0.8)	7.7 (1.0)	7.8 (0.8)	7.5 (0.6)
<b>4 km.h<sup>-1</sup></b>						
<b>Inhibition</b>						
TPI	82.8 (13.4)	84.2 (15.9)	73.4 (18.5)	71.1 (19.4)	80.1 (17.4)	86.7 (13.5)
Runs	1.06 (0.49)	1.13 (0.49)	1.67 (0.72)	1.46 (0.80)	1.15 (0.77)	0.81 (0.42)
Adjacency <sup>†0.028</sup>	35.9 (11.8)	33.8 (11.0)	45.6 (14.2)	42.3 (15.3)	37.6 (15.8)	32.4 (9.6)
<b>Working Memory</b>						
R <sup>§</sup>	1.77 (0.93)	1.40 (0.75)	1.65 (1.06)	2.01 (1.23)	1.62 (0.75)	2.23 (1.43)
Coupon	17.4 (4.3)	16.2 (2.5)	19.5 (7.5)	19.5 (7.7)	17.5 (3.3)	20.1 (5.1)
MRG	7.6 (0.7)	7.8 (0.6)	7.7 (0.6)	7.6 (0.6)	7.6 (0.7)	7.4 (0.6)
<b>5.6 km.h<sup>-1</sup></b>						
<b>Inhibition</b>						
TPI <sup>†0.047</sup>	80.6 (11.6)	82.8 (14.7)	71.5 (20.5)	76.1 (20.9)	79.4 (21.0)	85.8 (13.2)
Runs	1.23 (0.47)	1.14 (0.39)	1.52 (0.77)	1.41 (0.91)	1.55 (1.71)	0.82 (0.36)
Adjacency <sup>†0.007</sup>	37.2 (9.4)	33.0 (11.0)	45.9 (14.3)	39.8 (14.8)	35.1 (15.9)	32.6 (11.4)
<b>Working Memory</b>						
R <sup>†0.007</sup>	1.48 (0.88)	1.81 (0.99)	1.64 (1.08)	2.47 (1.78)	1.58 (1.02)	1.81 (0.81)
Coupon	19.0 (4.5)	17.5 (4.9)	17.7 (6.6)	22.6 (18.2)	17.0 (4.8)	19.2 (5.2)
MRG <sup>†&lt;0.001§§</sup>	7.8 (0.6)	7.7 (0.7)	7.8 (0.6)	7.3 (0.8)	7.9 (0.6)	7.3 (0.5)
Time effect <sup>†pvalue</sup>						
Interaction: <sup>§</sup> p = 0.049, <sup>§§</sup> p = 0.05						
For Runs, Adjacency, R and Coupon scores, lower scores represent better performances						

Figures

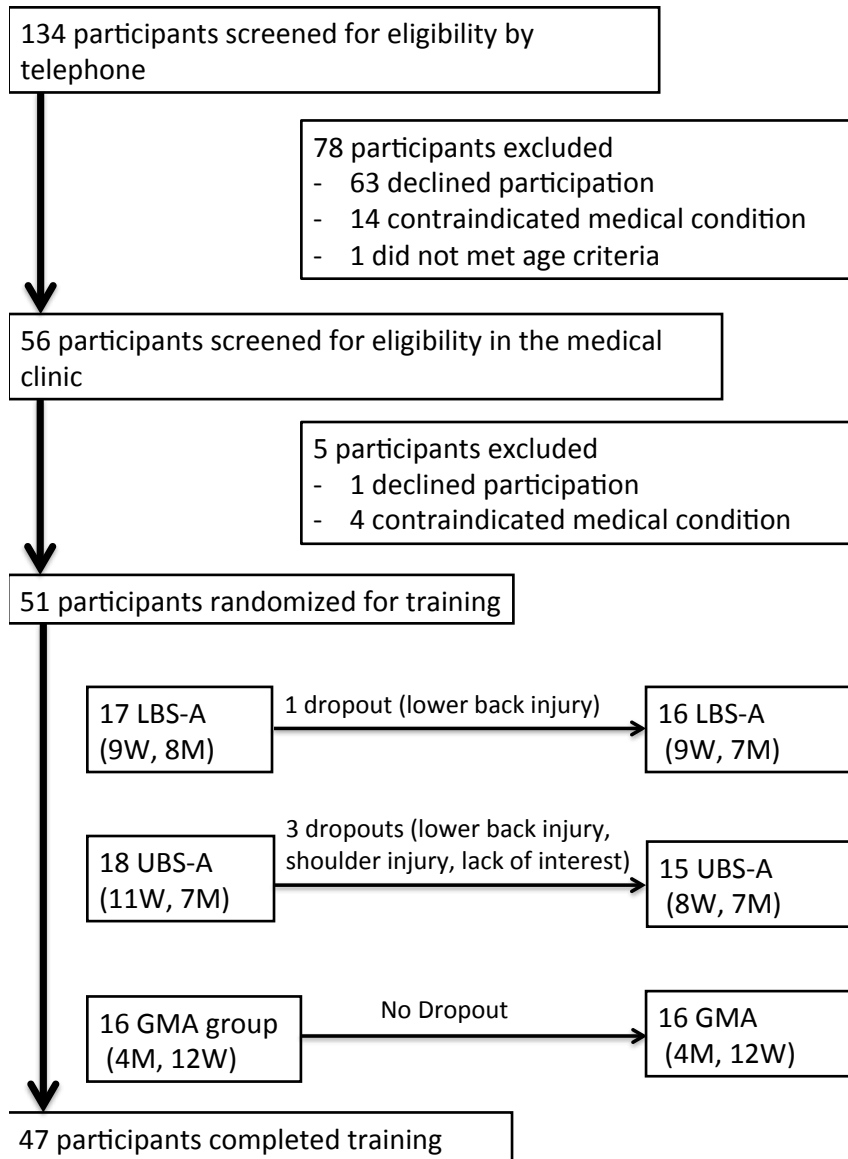


Figure 7 – Flow Chart

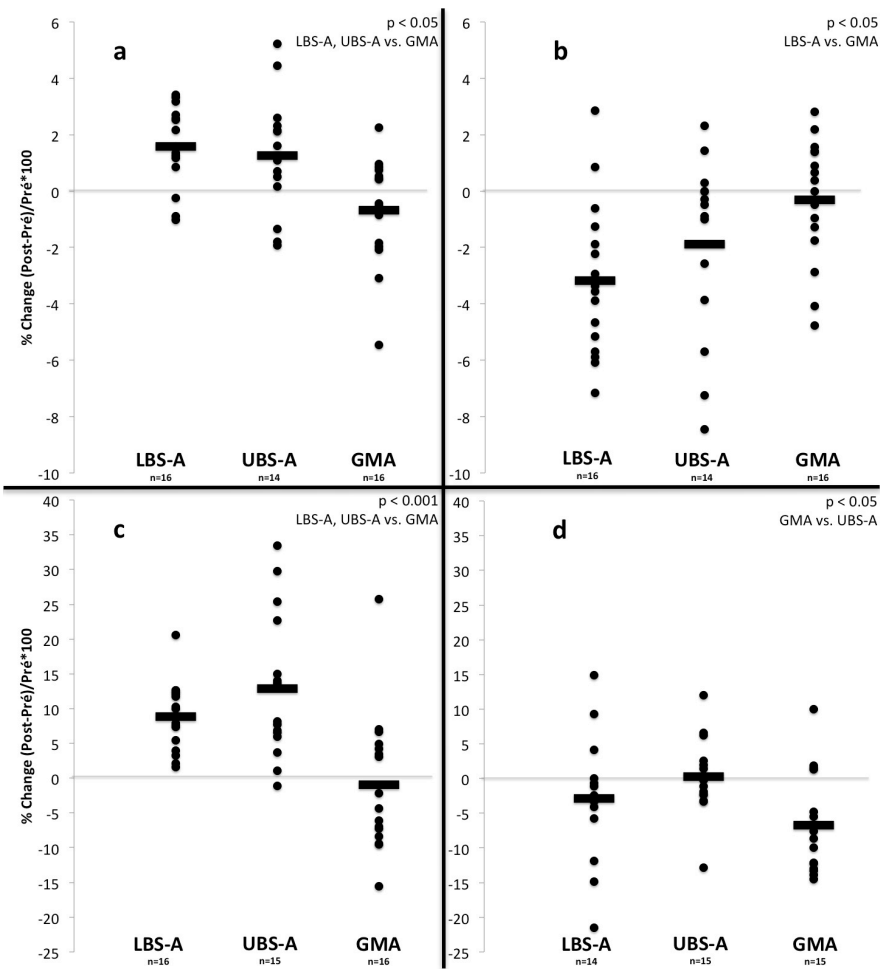


Figure 8 – Relative changes for :

a- FatFree mass

b- Fat mass

c-  $\dot{V}O_2$  peak

d- MECW at 4km.h<sup>-1</sup>

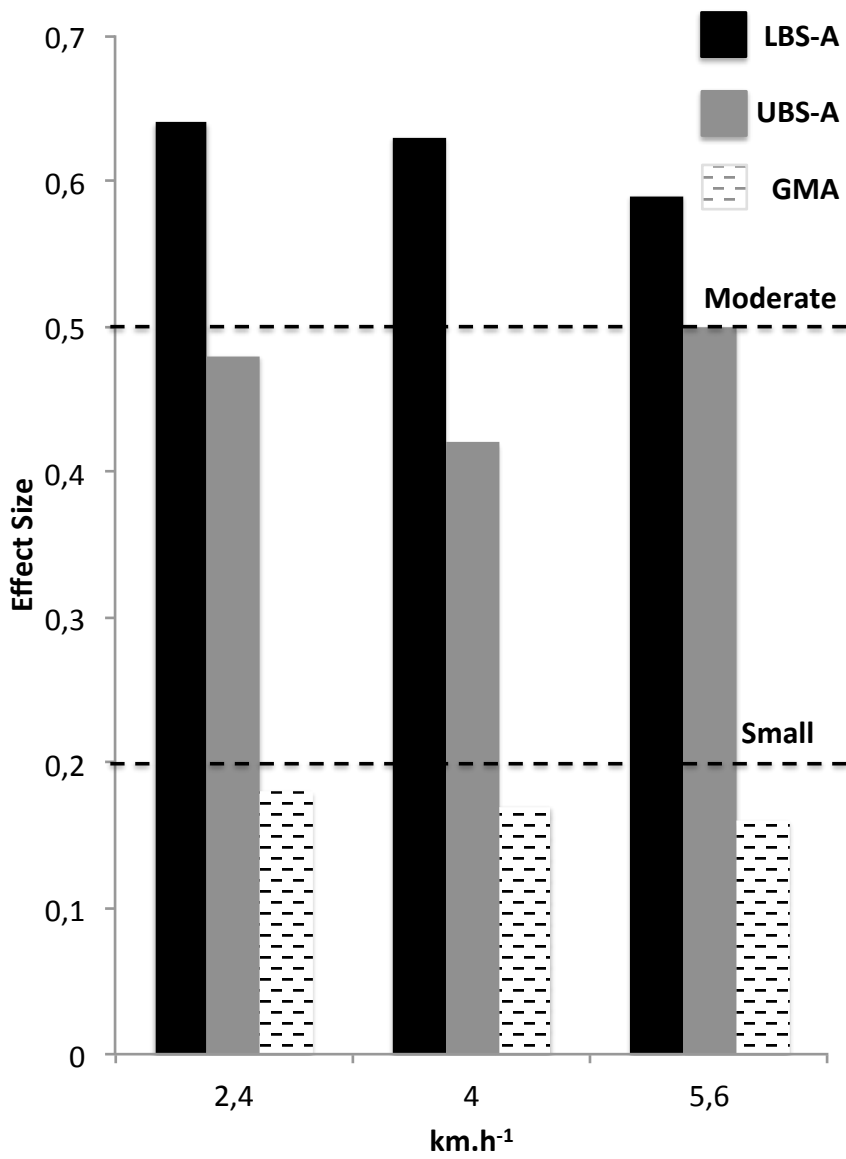


Figure 9 – Effect sizes for potential energy at different walking speed

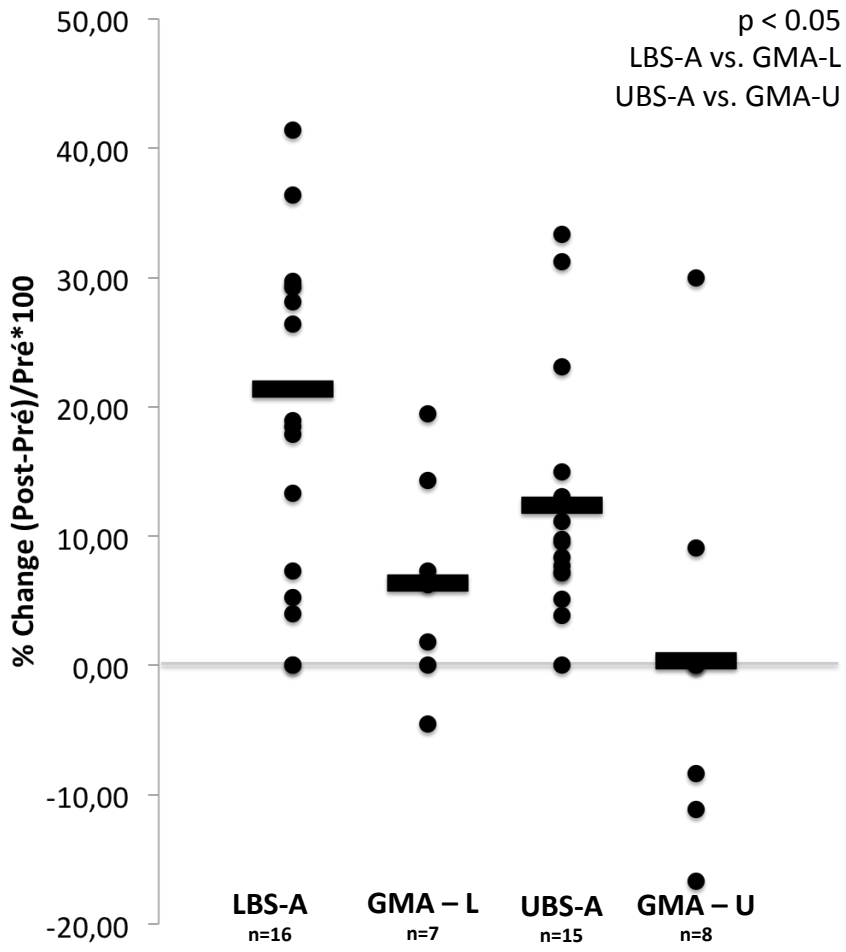


Figure 10 – Relative changes for the inertial maximal strength test (1RM)



### 2.3. Discussion

L'objectif général de cette thèse était de préciser les relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives dans une perspective de vieillissement sain. Dans cette optique, le cadre expérimental comportait trois études (CÉMAST, IFACCE-t et IFACCE) dont les résultats feront l'objet d'une discussion générale.

#### *CÉMAST*

Le principal objectif de l'étude méthodologique CÉMAST était de comparer les mesures du CE obtenues lorsque la marche est pratiquée par des aînés sur tapis roulant ou directement au sol sur une piste intérieure. Un second objectif, dans une perspective de reproductibilité de la mesure, était de vérifier le niveau d'association entre les mesures du CE selon qu'elles aient été faites sur tapis roulant ou au sol. Les hypothèses de travail avançaient que le CE allait être plus élevé sur tapis roulant en comparaison avec les mesures au sol. Par ailleurs, il a été proposé que le niveau d'association allait être élevé entre les mesures.

Alors que le CE tend à régresser avec l'avancée en âge (6), il a été proposé que l'altération de cette qualité représente le reflet de la diminution de la vitesse de marche spontanée observée chez les aînés (22). De plus, il apparaît que l'interaction de cette qualité avec la diminution de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  représente un facteur important de la vitesse de marche et ce spécialement lorsque la  $\dot{V}O_2\text{max}$  est faible (158). Considérant le lien étroit en le maintien de la vitesse de marche et la morbidité (19, 20), il semble évident que le suivi à long terme du CE s'impose dans une population vieillissante. Dans cette perspective, il a été démontré que la calorimétrie indirecte respiratoire approximative représente la méthode la plus pertinente pour mesurer cette qualité (51, 52). Malgré que des appareils portatifs permettent maintenant de procéder à la mesure du CE dans l'environnement quotidien d'un individu, il n'en demeure pas moins que la mesure sur tapis roulant en laboratoire représente une modalité d'évaluation permettant de contrôler minutieusement les conditions de tests tout en permettant la mesure de variables secondaires (EMG, oxygénation cérébrale, etc.). Alors que certains auteurs rapportent que la marche au sol est associée à un CE plus élevé (43), d'autres ont proposé plutôt l'inverse (44). Devant ces résultats équivoques, l'étude CÉMAST proposait de nouvelles pistes. Parmi celles-ci, il faut noter la comparaison entre les deux modalités d'un ensemble de 5 vitesses de marche sous-maximales. Cette étude a également proposé une approche d'analyse se basant sur les indices de reproductibilité de la mesure (ICC et SEM).

En accord avec l'hypothèse de départ, les résultats de l'étude CÉMAST suggèrent que le CE est plus élevé dans la condition où la mesure est faite sur tapis roulant et ce peu importe si les valeurs rapportés sont nettes ou brutes. Il a été suggéré que ces résultats pouvaient être expliqués en lien avec l'hypothèse de l'approche dynamique qui stipule que le choix de la vitesse de marche et de la fréquence de pas est déterminé en partie par la recherche d'équilibre afin d'éviter une éventuelle chute (11). Considérant que la démarche des aînés est associée à une plus grande co-activation des muscles agonistes et antagonistes (15), il est suggéré que ce phénomène est amplifié lors de la marche sur tapis roulant afin de maintenir un équilibre qui semble plus précaire sur cette surface instable. Il est d'ailleurs intéressant de constater qu'une séance de familiarisation ne suffit pas à enrayer ce phénomène. De plus, le protocole croisé de cette étude (séquence de tests tapis-sol ou sol-tapis) tend à suggérer que ce phénomène est bien réel et non pas associé à des effets de familiarité ou manque de pratique, alors que ces paramètres n'ont pas été contrôlés dans une étude rapportant que le CE était plus élevé lorsque mesuré au sol (43).

Contrairement à la seconde hypothèse de cette étude, le projet CÉMAST a permis de constater un niveau d'association entre les mesures qui semble insatisfaisant en regard des standards rapportés dans un contexte de recherche en sciences de l'activité physique. En effet, les résultats démontrent des ICC (indice du maintien de la position relative d'un individu par rapport à ses pairs lors de mesures répétées (247)) variant entre 0.46 et 0.65 pour les données brutes alors que ces données chutent entre 0.17 et 0.35 pour les valeurs nettes. Considérant que le niveau minimal suggéré est de 0.70 à 0.80 (36, 245), les valeurs obtenues dans le projet CÉMAST sont nettement inférieures. Par ailleurs, l'erreur standard de la mesure (ou erreur type de la mesure (247)) variait de 7 à 10% pour les mesures brutes alors que cet écart passait de 10 à 15% pour les valeurs nettes. Considérés ensemble, ces résultats suggèrent que l'interprétation des résultats lors de la mesure du CE doivent être faites avec prudence. D'abord, il ne semble pas acquis que la mesure sur tapis roulant reflète nécessairement le CE lors de la marche au sol. Ce constat suggère que, lorsqu'une mesure en laboratoire sur tapis roulant est nécessaire, il est important de compléter l'analyse par une mesure de marche au sol. Ainsi, une diminution du CE observée sur tapis roulant pourrait être associée à une amélioration de la vitesse de marche au sol. Par ailleurs, il semble important, toujours dans une perspective d'une intervention visant à réduire le CE, de mesurer cette variable avec la même modalité que celle utilisée à l'entraînement.

Enfin, l'étude CÉMAST a permis de reproduire un phénomène observé par plusieurs groupes : la relation entre la vitesse de marche et le CE est marquée par une forme de U qui décrit une élévation du CE à vitesse réduite avant d'observer une valeur minimale lorsque la vitesse est aux environs de 4 km.h<sup>-1</sup> puis une nouvelle augmentation aux vitesses plus élevées (4, 6, 14). Bien que cette observation dépasse les objectifs de l'étude, il n'en demeure pas moins que ce phénomène est intéressant dans la perspective de l'évaluation d'une population d'aînés. En effet, le ralentissement de la vitesse spontanée de marche et l'élévation parallèle du CE observée (22) décrit probablement un décalage vers la gauche par rapport à cette relation en U. Cette observation démontre l'importance de maintenir une vitesse de marche optimale qui correspond à une plus grande stabilité ainsi qu'à une meilleure utilisation de l'énergie élastique emmagasinée dans le système musculotendineux lors de chaque impact au sol (10, 11).

#### *IFACCE-t*

Dans une deuxième étude, une intervention visant à améliorer la condition physique des participants a été proposée. D'abord, les variables d'intérêt ont été analysées avant l'intervention dans une approche transversale afin de déterminer les facteurs de la condition physique associés aux fonctions cognitives et à la mobilité (IFACCE-t). Les hypothèses de travail suggéraient d'abord que les individus les plus rapides lors des tests de mobilité allaient démontrer les meilleurs profils cognitifs et physiques. Par ailleurs, il a été proposé qu'en plus de  $\dot{V}O_2\text{max}$ , un faible CE et des paramètres de force plus élevés allaient être associés à un meilleur profil cognitif.

En accord avec les hypothèses proposées, l'étude IFACCE-t a permis d'établir que des tests de mobilité générale comme le test de marche à vitesse maximale sur 10m (10MWT) ainsi que le TUG permettaient de distinguer les aînés démontrant les meilleures performances en flexibilité cognitive de même que les meilleurs niveaux de condition physique. De plus, cette étude a confirmé que les qualités neuromusculaires sont associées, indépendamment de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , à de meilleures performances cognitives (flexibilité).

Alors que la condition physique et plus particulièrement la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et les qualités neuromusculaires déterminent à la fois cognition et mobilité chez les aînés, il apparaît qu'un lien étroit, indépendamment de la condition physique, est rapporté entre les fonctions cognitives et la mobilité. En effet, des composantes comme la motivation, la conscience de soi, la planification, la prise de décision et l'inhibition ont le potentiel d'influencer directement la mobilité et la prévalence

des chutes chez des aînés (229, 262). Par ailleurs, il peut être suggéré que le maintien de la mobilité favorise à son tour la participation à des activités stimulantes cognitivement.

De plus, tel que discuté dans le contexte de l'étude CÉMAST, il est bien démontré que le CE et la  $\dot{V}O_2\text{max}$  interagissent ensemble pour déterminer la vitesse de marche spontanée. C'est ainsi que le concept d'énergie potentielle a été présenté de façon à décrire la réserve énergétique comprise entre l'effort associé au maintien de la marche spontanée (CEB) et l'effort maximal ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ) (1). L'individu aurait donc avantage à maintenir cette réserve à un niveau plutôt élevé de manière à ce que les activités de la vie quotidienne représentent un faible pourcentage de la réserve, ou exprimé autrement, une intensité relative faible lorsque rapportée en fonction de la capacité maximale ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ). La filière aérobie n'est pas la seule composante de la condition physique à influencer la mobilité. Il a été démontré que le maintien des qualités neuromusculaires favorisait une vitesse de marche plus élevée (135). Il est d'ailleurs intéressant de constater que l'entraînement de la force peut être associé à une diminution du CE (170, 175) ce qui suggère donc un effet supplémentaire des qualités neuromusculaires sur la mobilité. Enfin, le lien entre la condition physique et les fonctions exécutives est bien établi. Alors que le rôle de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  a été longtemps identifié comme étant un médiateur essentiel entre le maintien d'une vie active et un profil cognitif favorable (201), il est maintenant bien reconnu que différentes approches peuvent être suggérées pour favoriser le maintien ou l'amélioration des fonctions cognitives. Parmi celles-ci, il est rapporté que l'entraînement en force représente une stimulation de choix (191, 224). D'ailleurs, il semble que des voies de signalisations moléculaires différentes sont activées à la suite de ces entraînements visant l'amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  ou de la force. En effet, alors que les BDNF sont associés à l'entraînement aérobie, les IGF-1 semblent représenter l'intermédiaire déterminant de la relation force/cognition (225). Dans les deux cas, ces molécules sont reconnues pour leur rôle dans la survie, la croissance et la différenciation neuronale (218). Par ailleurs, il a été récemment démontré que l'entraînement des habiletés motrices globales permettait également l'amélioration des fonctions exécutives (205, 226) probablement à la suite d'une activation plus prononcée du réseau cérébral visuo-spatial (205).

Pris dans leur ensemble, les résultats observés dans l'étude IFACCE-t suggèrent que plusieurs stimulations peuvent être associées à de meilleures fonctions cognitives ainsi qu'au maintien de la mobilité chez les aînés. L'évaluation et le suivi à long terme de cette population doivent donc viser

l'intégralité des ces déterminants de façon à identifier les forces et faiblesses de chacun. Ainsi, une prescription des programmes appropriés sera facilitée. Considérant la grande variabilité des réponses attendues à la suite de l'entraînement physique (180), il peut être rassurant pour le clinicien et pour le patient de constater que plusieurs traitements semblent favorables et que ceux-ci peuvent être ajustés en fonction des intérêts et possibilités de chaque individu. Il s'agit donc de déterminer pour chacun de quelle façon intégrer ce cercle vertueux.

### *IFACCE*

Par la suite, un deuxième objectif de ce projet était de comparer les effets d'un entraînement combiné des qualités neuromusculaires et de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  à un protocole visant le développement des habiletés motrices globales (IFACCE). Il a donc été proposé que l'entraînement combiné de la force des membres inférieurs et de l'aptitude aérobie induirait une diminution du CE et une amélioration de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Ainsi, l'augmentation de l'énergie potentielle observée permettrait à ces individus de libérer des ressources attentionnelles allouées à la marche pour améliorer les fonctions cognitives, de façon plus importante que les sujets impliqués dans le programme sur les habiletés motrices globales, lors d'une double tâche effectuée à différentes vitesses de marche.

Contrairement à l'hypothèse centrale de ce projet, il apparaît que l'augmentation de l'énergie potentielle à la suite d'un entraînement de la force et de l'aptitude aérobie n'est pas accompagnée, de façon privilégiée, par une amélioration des performances cognitives en situation de double tâche. En effet, il a été démontré que les interventions visant des améliorations de la condition physique sont aussi efficaces que l'entraînement de la motricité globale pour améliorer l'inhibition et ce autant en simple qu'en double tâche.

Il est très intéressant de constater que le programme d'entraînement aérobie proposé dans ce projet était particulier dans la mesure où le volume était passablement réduit par rapport aux recommandations (36 à 48 vs. 75 à 150 minutes par semaine (291)) afin de mettre l'emphase sur l'intensité. Cette approche s'est avérée efficace comme le démontrent les gains obtenus ( $g = 0.51 - \text{LBS-A}$ ,  $0.47 - \text{UBS-A}$ ). Par ailleurs, les résultats des tests de force maximale inertielle démontrent également des améliorations conformes aux attentes ( $g = 0.40 - \text{LBS-A}$ ,  $0.20 - \text{UBS-A}$ ). Il est à noter que les résultats aux tests de force maximale isocinétique sont moins concluant mais peuvent être expliqués partiellement par une disparité entre les modalités d'entraînement et d'évaluation (151). La longueur du protocole d'entraînement était peut-être légèrement trop courte pour favoriser des

transferts plus prononcés entre deux modalités différentes (298). Alors qu'il était attendu que les participants ayant subi l'entraînement en force des membres inférieurs démontrent des améliorations de plus grande amplitude en regard du CE, il apparaît que les autres interventions, en particulier les activités motrices globales, ont aussi permis de réduire le CE. Bien que des facteurs neuromusculaires déterminent le CE d'un individu, il semble que l'entraînement des activités motrices globales puisse aussi améliorer cette qualité en favorisant le développement de l'équilibre ainsi que l'exécution d'un mouvement plus efficace (3). En regard des hypothèses de départ, l'efficacité de ce programme d'entraînement peut être démontrée comme en témoignent les améliorations spécifiques de l'énergie potentielle ( $g = 0.62 \pm 0.03$  – LBS-A,  $0.47 \pm 0.04$  – UBS-A,  $0.17 \pm 0.01$  – GMA).

En regard des fonctions exécutives, il semble que l'inhibition représente une qualité particulièrement sensible à l'activité physique (187). Les résultats du projet IFACCE tendent à confirmer cette observation alors que toutes les interventions ont mené à des améliorations en simple tâche. En double tâche, il semble que les améliorations de l'inhibition sont maintenues à chaque vitesse expérimentale étudiée et ce peu importe l'intervention. Cependant, il s'avère que des diminutions de performance ont été observées en ce qui concerne la mémoire de travail mais seulement à 2.4 et à 5.6 km.h<sup>-1</sup>. Pour expliquer ce phénomène, il est suggéré que l'amélioration de l'inhibition observée à la suite de l'entraînement puisse avoir augmenté la sollicitation de la mémoire de travail. En effet, en offrant des réponses plus aléatoires, il est probable que la tâche de mémoire de travail est plus complexe compte tenu du fait que les chiffres se présentent dans un ordre moins habituel. Alors que l'instabilité et la recherche d'équilibre peuvent être avancés pour expliquer le CE plus élevé à 2.4 km.h<sup>-1</sup>, il est évident que la marche à 5.6 km.h<sup>-1</sup> représente une intensité relative nettement plus élevée et plus proche du maximum (6). Ainsi, davantage de ressources attentionnelles sont probablement allouées à la tâche motrice pour prévenir les déséquilibres et les chutes (2.4 km.h<sup>-1</sup>) ainsi que pour soutenir l'effort relatif plus élevé (5.6 km.h<sup>-1</sup>). Par ailleurs, il semble que le groupe LBS-A soit le seul à avoir démontré une amélioration de la mémoire de travail à 4.km.h<sup>-1</sup>. Malgré que cette vitesse représente une intensité normalement très proche de la démarche spontanée, il n'en demeure pas moins que le CE sur tapis roulant a tendance à être plus élevé que lors de la marche au sol (CÉMAST). Il est donc possible qu'à cette vitesse, le groupe LBS-A ait bénéficié d'une énergie potentielle légèrement plus élevée pour démontrer de meilleures performances cognitives tant en inhibition qu'en mémoire de travail.

Pris dans leur ensemble, ces résultats tendent à suggérer qu'un entraînement des habiletés motrices globales est aussi efficace pour améliorer les fonctions exécutives, et plus particulièrement l'inhibition, qu'un entraînement combiné qui induit des gains significatifs de la force, de la  $\dot{V}O_2\text{max}$  et de l'énergie potentielle.

### 3. Conclusion et perspectives

L'objectif général de cette thèse était de préciser les relations entre la mobilité, la condition physique et les fonctions cognitives dans une perspective de vieillissement sain.

Le projet CEMAST a permis de souligner les différences entre les mesures du CE effectuées sur tapis roulant ou directement au sol. En plus de constater des mesures systématiquement plus élevées sur tapis roulant, il a été rapporté que le niveau de reproductibilité entre les modalités d'évaluation était insuffisant. Cette affirmation s'applique autant aux indices absolus (SEM) que relatifs (ICC). En pratique, ces constats suggèrent que l'évaluation du CE sur tapis roulant doit être complétée autant que possible par des tests de marche au sol afin d'obtenir un portrait plus global des qualités de marche de l'individu. Il est également suggéré que dans un contexte de suivi à la suite d'une intervention, les modalités d'entraînement doivent être spécifiques aux modalités d'évaluation afin de favoriser une meilleure appréciation des éventuelles adaptations. Enfin, malgré que l'objectif de cette expérimentation n'était pas de conclure quant aux causes de ces différences, il est suggéré que le tapis roulant induit une instabilité qui se traduit par une augmentation du CE chez les aînés. De prochaines investigations doivent donc tenter de préciser les mécanismes sous jacents en mettant une emphase sur les facteurs neuromusculaires (co-contractions, efficacité du système musculotendineux, etc.) susceptibles d'être perturbés lors de la marche sur tapis roulant en comparaison avec la marche pratiquée directement au sol.

Par ailleurs, le projet IFACCE-t a démontré que des tests cliniques fonctionnels comme le test de marche à vitesse maximale sur 10m ainsi que le TUG permettent de distinguer, non seulement les individus avec une bonne condition physique mais aussi ceux qui démontrent un profil cognitif favorable. Plus particulièrement, il semble que la flexibilité cognitive soit associée à une meilleure mobilité. Concernant les déterminants de la condition physique, il semble qu'en plus de la  $\dot{V}O_2\text{max}$ , les qualités neuromusculaires sont associées à de meilleures performances cognitives (flexibilité). Ces résultats suggèrent que l'évaluation de la personne âgée doit intégrer plusieurs facteurs physiques et cognitifs afin d'obtenir un portrait global qui permettra de mieux apprécier les forces et faiblesses de chaque individu. Ainsi, la prescription de l'intervention appropriée pour combler les lacunes sera facilitée.



Enfin, le projet IFACCE a permis de confirmer l'efficacité de l'entraînement à haute intensité pour améliorer l'aptitude aérobie et les qualités neuromusculaires. À ce sujet, il semble que le volume puisse être réduit de façon significative par rapport aux recommandations traditionnelles au profit de l'intensité. De plus, il en ressort que les interventions proposées ont favorisé une amélioration significative de l'inhibition autant en simple qu'en double tâche alors que la mémoire de travail ne semble pas avoir bénéficié de ces entraînements. Contrairement aux hypothèses avancées, il a été démontré qu'un entraînement qui induisait une augmentation de l'énergie potentielle ne permettait pas, de façon privilégiée, d'améliorer les performances cognitives lors d'une double tâche. Une intervention visant le développement des habiletés motrices globales semble tout aussi efficace à cet effet. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que plusieurs interventions peuvent être mises en place pour induire des gains cognitifs. À cet égard, une progression est proposée afin de prendre en compte le niveau initial de l'individu. Bien qu'il a été démontré par d'autres travaux que mêmes les aînés fragiles peuvent profiter d'un entraînement de la force et de l'aptitude aérobie (73, 168, 282), il est probablement plus convivial de débiter, pour des sédentaires ou des populations symptomatiques, par des activités moins exigeantes physiquement. Dans cette optique, une intervention visant à améliorer les habiletés motrices globales (manipulation, locomotion, équilibre, etc.) pourrait d'abord être mise en place avant de mettre davantage l'accent sur des entraînements plus prononcés sur les qualités de force et l'aptitude aérobie. Une nouvelle avenue de recherche pourrait s'orienter vers une planification optimale de ces cycles d'entraînement qui tient compte de l'état initial de l'individu. Cependant, considérant les effets bénéfiques de l'entraînement combiné de l'aptitude aérobie et de la force sur la santé globale des individus (santé cardiovasculaire, mobilité générale, prévention des chutes, cognition, etc.), il semble que ces stimulations doivent être apparaître, idéalement plus tôt que tard, dans une perspective de vieillissement sain.

## Références

1. Schrack JA, Simonsick EM, Ferrucci L. The energetic pathway to mobility loss: an emerging new framework for longitudinal studies on aging. *J Am Geriatr Soc.* 2010 Oct;58 Suppl 2:S329-36. PubMed PMID: 21029063. Pubmed Central PMCID: 3057770.
2. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med.* 2004;34(7):465-85. PubMed PMID: 15233599.
3. Perrault H. Efficiency of movement in health and chronic disease. *Clinical and investigative medicine Medecine clinique et experimentale.* 2006 Apr;29(2):117-21. PubMed PMID: 16737088.
4. Bunc V, Dlouha R. Energy cost of treadmill walking. *J Sports Med Phys Fitness.* 1997 Jun;37(2):103-9. PubMed PMID: 9239987. Epub 1997/06/01. eng.
5. Workman JM, Armstrong BW. Metabolic cost of walking: equation and model. *J Appl Physiol.* 1986 Oct;61(4):1369-74. PubMed PMID: 3781952. Epub 1986/10/01. eng.
6. Malatesta D, Simar D, Dauvilliers Y, Candau R, Borrani F, Prefaut C, et al. Energy cost of walking and gait instability in healthy 65- and 80-yr-olds. *J Appl Physiol.* 2003 Dec;95(6):2248-56. PubMed PMID: 12882986. Epub 2003/07/29. eng.
7. Rose J, Gamble JG, Inman VT. *Human walking.* 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins; 2006. xiii, 234 p.
8. Massaad F, Lejeune TM, Detrembleur C. The up and down bobbing of human walking: a compromise between muscle work and efficiency. *J Physiol.* 2007 Jul 15;582(Pt 2):789-99. PubMed PMID: 17463048. Pubmed Central PMCID: 2075334. Epub 2007/04/28. eng.
9. Holt KG, Hamill J, Andres RO. THE FORCE-DRIVEN HARMONIC-OSCILLATOR AS A MODEL FOR HUMAN LOCOMOTION. *Hum Mov Sci.* 1990 Feb;9(1):55-68. PubMed PMID: ISI:A1990CV69600004. English.
10. Holt KG, Hamill J, Andres RO. Predicting the minimal energy costs of human walking. *Med Sci Sports Exerc.* 1991 Apr;23(4):491-8. PubMed PMID: 1905381. Epub 1991/04/01. eng.
11. Holt KJ, Jeng SF, Rr RR, Hamill J. Energetic Cost and Stability During Human Walking at the Preferred Stride Velocity. *J Mot Behav.* 1995 Jun;27(2):164-78. PubMed PMID: 12736125. Epub 1995/06/01. Eng.
12. Snaterse M, Ton R, Kuo AD, Donelan JM. Distinct fast and slow processes contribute to the selection of preferred step frequency during human walking. *J Appl Physiol.* 2011 Jun;110(6):1682-90. PubMed PMID: 21393467. Epub 2011/03/12. eng.
13. Mian OS, Thom JM, Ardigo LP, Narici MV, Minetti AE. Metabolic cost, mechanical work, and efficiency during walking in young and older men. *Acta Physiol (Oxf).* 2006 Feb;186(2):127-39. PubMed PMID: 16497190. Epub 2006/02/25. eng.
14. Mian OS, Thom JM, Ardigo LP, Morse CI, Narici MV, Minetti AE. Effect of a 12-month physical conditioning programme on the metabolic cost of walking in healthy older adults. *Eur J Appl Physiol.* 2007 Jul;100(5):499-505. PubMed PMID: 16463043. Epub 2006/02/08. eng.
15. Hortobagyi T, Finch A, Solnik S, Rider P, DeVita P. Association between muscle activation and metabolic cost of walking in young and old adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2011 May;66(5):541-7. PubMed PMID: 21345892. Pubmed Central PMCID: 3074960.
16. Conley KE, Jubrias SA, Cress ME, Esselman P. Exercise efficiency is reduced by mitochondrial uncoupling in the elderly. *Experimental physiology.* 2013 Mar;98(3):768-77. PubMed PMID: 23085769.

17. Manini TM, Clark BC. Dynapenia and aging: an update. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2012 Jan;67(1):28-40. PubMed PMID: 21444359. Pubmed Central PMCID: 3260480. Epub 2011/03/30. eng.
18. Wert DM, Brach J, Perera S, VanSwearingen JM. Gait biomechanics, spatial and temporal characteristics, and the energy cost of walking in older adults with impaired mobility. *Phys Ther*. 2010 Jul;90(7):977-85. PubMed PMID: 20488977. Pubmed Central PMCID: 2897132.
19. Elbaz A, Sabia S, Brunner E, Shipley M, Marmot M, Kivimaki M, et al. Association of walking speed in late midlife with mortality: results from the Whitehall II cohort study. *Age*. 2013 Jun;35(3):943-52. PubMed PMID: 22361996. Pubmed Central PMCID: 3636402.
20. Cesari M, Kritchevsky SB, Penninx BW, Nicklas BJ, Simonsick EM, Newman AB, et al. Prognostic value of usual gait speed in well-functioning older people--results from the Health, Aging and Body Composition Study. *J Am Geriatr Soc*. 2005 Oct;53(10):1675-80. PubMed PMID: 16181165.
21. Hardy SE, Perera S, Roumani YF, Chandler JM, Studenski SA. Improvement in usual gait speed predicts better survival in older adults. *J Am Geriatr Soc*. 2007 Nov;55(11):1727-34. PubMed PMID: 17916121.
22. Schrack JA, Simonsick EM, Chaves PH, Ferrucci L. The role of energetic cost in the age-related slowing of gait speed. *J Am Geriatr Soc*. 2012 Oct;60(10):1811-6. PubMed PMID: 23035640. Pubmed Central PMCID: 3470763.
23. Brooks GA, Fahey TD, Baldwin KM. *Exercise physiology : human bioenergetics and its applications*. 4th ed. Boston: McGraw-Hill; 2005. xxi, 876, 7, 22 p.
24. Cerretelli P. *Traité de physiologie de l'exercice et du sport*. Paris: Masson; 2002. viii, 481 p.
25. Peronnet F, Massicotte D. Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Canadian journal of sport sciences = Journal canadien des sciences du sport*. 1991 Mar;16(1):23-9. PubMed PMID: 1645211.
26. Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol*. 2009 Dec;107(6):1918-22. PubMed PMID: 19833811.
27. Vandewalle H. [Oxygen uptake and maximal oxygen uptake: interests and limits of their measurements]. *Ann Readapt Med Phys*. 2004 Aug;47(6):243-57. PubMed PMID: 15297114. Consommation d'oxygene et consommation maximale d'oxygene: interets et limites de leur mesure.
28. Whipp BJ, Ward SA, Lamarra N, Davis JA, Wasserman K. Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *J Appl Physiol*. 1982 Jun;52(6):1506-13. PubMed PMID: 6809716. Epub 1982/06/01. eng.
29. Cerretelli P, Whipp BJ. *Exercise bioenergetics and gas exchange : proceedings of the International Symposium on Exercise Bioenergetics and Gas Exchange, held in Milan, Italy, July 7-9, 1980, a satellite of the XXVIII International Congress of Physiological Sciences*. Amsterdam ; New York New York, N.Y.: Elsevier/North-Holland Biomedical Press ; sole distributors for the USA and Canada Elsevier North Holland; 1980. ix, 362 p.
30. Xu F, Rhodes EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med*. 1999 May;27(5):313-27. PubMed PMID: 10368878. Epub 1999/06/16. eng.
31. McCann DJ, Adams WC. A dimensional paradigm for identifying the size-independent cost of walking. *Med Sci Sports Exerc*. 2002 Jun;34(6):1009-17. PubMed PMID: 12048330. Epub 2002/06/06. eng.
32. Henry CJ. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr*. 2005 Oct;8(7A):1133-52. PubMed PMID: 16277825. Epub 2005/11/10. eng.

33. Vilhena de Mendonca G, Pereira FD. Between-day variability of net and gross oxygen uptake during graded treadmill walking: effects of different walking intensities on the reliability of locomotion economy. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2008 Dec;33(6):1199-206. PubMed PMID: 19088778. Epub 2008/12/18. eng.
34. Brehm MA, Knol DL, Harlaar J. Methodological considerations for improving the reproducibility of walking efficiency outcomes in clinical gait studies. *Gait Posture*. 2008 Feb;27(2):196-201. PubMed PMID: 17467276. Epub 2007/05/01. eng.
35. Weyand PG, Smith BR, Sandell RF. Assessing the metabolic cost of walking: the influence of baseline subtractions. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2009;2009:6878-81. PubMed PMID: 19964188. Epub 2009/12/08. eng.
36. Currell K, Jeukendrup AE. Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports Med*. 2008;38(4):297-316. PubMed PMID: 18348590. Epub 2008/03/20. eng.
37. Macfarlane DJ. Automated metabolic gas analysis systems: a review. *Sports Med*. 2001;31(12):841-61. PubMed PMID: 11665912. Epub 2001/10/23. eng.
38. Darter BJ, Rodriguez KM, Wilken JM. Test-retest reliability and minimum detectable change using the K4b2: oxygen consumption, gait efficiency, and heart rate for healthy adults during submaximal walking. *Res Q Exerc Sport*. 2013 Jun;84(2):223-31. PubMed PMID: 23930548.
39. Schwartz MH, Koop SE, Bourke JL, Baker R. A nondimensional normalization scheme for oxygen utilization data. *Gait Posture*. 2006 Aug;24(1):14-22. PubMed PMID: 16112865. Epub 2005/08/23. eng.
40. Thomas SS, Buckon CE, Schwartz MH, Sussman MD, Aiona MD. Walking energy expenditure in able-bodied individuals: a comparison of common measures of energy efficiency. *Gait Posture*. 2009 Jun;29(4):592-6. PubMed PMID: 19188067. Epub 2009/02/04. eng.
41. Dal U, Erdogan T, Resitoglu B, Beydagi H. Determination of preferred walking speed on treadmill may lead to high oxygen cost on treadmill walking. *Gait Posture*. 2010 Mar;31(3):366-9. PubMed PMID: 20129785. Epub 2010/02/05. eng.
42. Ralston HJ. Comparison of energy expenditure during treadmill walking and floor walking. *J Appl Physiol*. 1960 Nov;15:1156. PubMed PMID: 13739280. Epub 1960/11/01. eng.
43. Pearce ME, Cunningham DA, Donner AP, Rechnitzer PA, Fullerton GM, Howard JH. Energy cost of treadmill and floor walking at self-selected paces. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1983;52(1):115-9. PubMed PMID: 6686120. Epub 1983/01/01. eng.
44. Parvataneni K, Ploeg L, Olney SJ, Brouwer B. Kinematic, kinetic and metabolic parameters of treadmill versus overground walking in healthy older adults. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2009 Jan;24(1):95-100. PubMed PMID: 18976839. Epub 2008/11/04. eng.
45. Van de Putte M, Hagemester N, St-Onge N, Parent G, de Guise JA. Habituation to treadmill walking. *Biomed Mater Eng*. 2006;16(1):43-52. PubMed PMID: 16410643. Epub 2006/01/18. eng.
46. Westerterp KR. Assessment of physical activity: a critical appraisal. *Eur J Appl Physiol*. 2009 Apr;105(6):823-8. PubMed PMID: 19205725. Epub 2009/02/12. eng.
47. Skinner JS, Gaskill SE, Rankinen T, Leon AS, Rao DC, Wilmore JH, et al. Heart rate versus %VO<sub>2</sub>max: age, sex, race, initial fitness, and training response--HERITAGE. *Med Sci Sports Exerc*. 2003 Nov;35(11):1908-13. PubMed PMID: 14600558. Epub 2003/11/06. eng.
48. Achten J, Jeukendrup AE. Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Med*. 2003;33(7):517-38. PubMed PMID: 12762827.
49. Spurr GB, Prentice AM, Murgatroyd PR, Goldberg GR, Reina JC, Christman NT. Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect

- calorimetry. *The American journal of clinical nutrition*. 1988 Sep;48(3):552-9. PubMed PMID: 3414570.
50. Rose J, Gamble JG, Lee J, Lee R, Haskell WL. The energy expenditure index: a method to quantitate and compare walking energy expenditure for children and adolescents. *J Pediatr Orthop*. 1991 Sep-Oct;11(5):571-8. PubMed PMID: 1918341. Epub 1991/09/01. eng.
  51. Graham RC, Smith NM, White CM. The reliability and validity of the physiological cost index in healthy subjects while walking on 2 different tracks. *Arch Phys Med Rehabil*. 2005 Oct;86(10):2041-6. PubMed PMID: 16213251. Epub 2005/10/11. eng.
  52. Fruin ML, Rankin JW. Validity of a multi-sensor armband in estimating rest and exercise energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc*. 2004 Jun;36(6):1063-9. PubMed PMID: 15179178.
  53. King GA, Torres N, Potter C, Brooks TJ, Coleman KJ. Comparison of activity monitors to estimate energy cost of treadmill exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2004 Jul;36(7):1244-51. PubMed PMID: 15235333.
  54. Bertoli S, Posata A, Battezzati A, Spadafranca A, Testolin G, Bedogni G. Poor agreement between a portable armband and indirect calorimetry in the assessment of resting energy expenditure. *Clinical nutrition*. 2008 Apr;27(2):307-10. PubMed PMID: 18276043.
  55. Brazeau AS, Karelis AD, Mignault D, Lacroix MJ, Prud'homme D, Rabasa-Lhoret R. Accuracy of the SenseWear Armband during ergocycling. *Int J Sports Med*. 2011 Oct;32(10):761-4. PubMed PMID: 21913157.
  56. Hill AV, Lupton H. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. *Quartely Journal of Medicine*. 1923;16:135-71.
  57. Bassett DR, Jr., Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2000 Jan;32(1):70-84. PubMed PMID: 10647532. Epub 2000/01/27. eng.
  58. Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS. Exercise-induced arterial hypoxaemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol*. 1984 Oct;355:161-75. PubMed PMID: 6436475. Pubmed Central PMCID: 1193484.
  59. Powers SK, Lawler J, Dempsey JA, Dodd S, Landry G. Effects of incomplete pulmonary gas exchange on VO<sub>2</sub> max. *Journal of applied physiology*. 1989 Jun;66(6):2491-5. PubMed PMID: 2745310.
  60. Tesch PA. Exercise performance and beta-blockade. *Sports Med*. 1985 Nov-Dec;2(6):389-412. PubMed PMID: 2866577.
  61. Gledhill N. Blood doping and related issues: a brief review. *Med Sci Sports Exerc*. 1982;14(3):183-9. PubMed PMID: 7109883.
  62. Saltin B. Hemodynamic adaptations to exercise. *The American journal of cardiology*. 1985 Apr 26;55(10):42D-7D. PubMed PMID: 3993550.
  63. Holloszy JO, Coyle EF. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*. 1984 Apr;56(4):831-8. PubMed PMID: 6373687.
  64. Hawkins S, Wiswell R. Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: implications for exercise training. *Sports Med*. 2003;33(12):877-88. PubMed PMID: 12974656. Epub 2003/09/17. eng.
  65. Ogawa T, Spina RJ, Martin WH, 3rd, Kohrt WM, Schechtman KB, Holloszy JO, et al. Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation*. 1992 Aug;86(2):494-503. PubMed PMID: 1638717.
  66. Sjodin B, Svedenhag J. Applied physiology of marathon running. *Sports Med*. 1985 Mar-Apr;2(2):83-99. PubMed PMID: 3890068.

67. di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1986;55(3):259-66. PubMed PMID: 3732253. Epub 1986/01/01. eng.
68. Burtcher M, Nachbauer W, Wilber R. The upper limit of aerobic power in humans. *Eur J Appl Physiol*. 2011 Oct;111(10):2625-8. PubMed PMID: 21373867.
69. Louis J, Nosaka K, Brisswalter J. The endurance master athlete, a model of successful ageing. *Science & Sports*. 2012 Apr;27(2):63-76. PubMed PMID: WOS:000303964200001.
70. Binder EF, Yarasheski KE, Steger-May K, Sinacore DR, Brown M, Schechtman KB, et al. Effects of progressive resistance training on body composition in frail older adults: results of a randomized, controlled trial. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2005 Nov;60(11):1425-31. PubMed PMID: 16339329. Epub 2005/12/13. eng.
71. American Thoracic S, American College of Chest P. ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003 Jan 15;167(2):211-77. PubMed PMID: 12524257.
72. Midgley AW, McNaughton LR, Polman R, Marchant D. Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med*. 2007;37(12):1019-28. PubMed PMID: 18027991.
73. Ehsani AA, Spina RJ, Peterson LR, Rinder MR, Glover KL, Villareal DT, et al. Attenuation of cardiovascular adaptations to exercise in frail octogenarians. *J Appl Physiol*. 2003 Nov;95(5):1781-8. PubMed PMID: 12857764. Epub 2003/07/15. eng.
74. Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med*. 2013 May;43(5):313-38. PubMed PMID: 23539308.
75. Leger L, Mercier D. Gross energy cost of horizontal treadmill and track running. *Sports Med*. 1984 Jul-Aug;1(4):270-7. PubMed PMID: 6390604. Epub 1984/07/01. eng.
76. Billat LV, Koralsztein JP. Significance of the velocity at VO<sub>2</sub>max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med*. 1996 Aug;22(2):90-108. PubMed PMID: 8857705.
77. Midgley AW, McNaughton LR, Carroll S. Time at VO<sub>2</sub>max during intermittent treadmill running: test protocol dependent or methodological artefact? *Int J Sports Med*. 2007 Nov;28(11):934-9. PubMed PMID: 17497578.
78. Romero-Arenas S, Blazevich AJ, Martinez-Pascual M, Perez-Gomez J, Luque AJ, Lopez-Roman FJ, et al. Effects of high-resistance circuit training in an elderly population. *Experimental gerontology*. 2013 Mar;48(3):334-40. PubMed PMID: 23352954.
79. Bosquet L, Gamelin FX, Berthoin S. Reliability of postexercise heart rate recovery. *Int J Sports Med*. 2008 Mar;29(3):238-43. PubMed PMID: 17614018. Epub 2007/07/07. eng.
80. Kline GM, Porcari JP, Hintermeister R, Freedson PS, Ward A, McCarron RF, et al. Estimation of VO<sub>2</sub>max from a one-mile track walk, gender, age, and body weight. *Med Sci Sports Exerc*. 1987 Jun;19(3):253-9. PubMed PMID: 3600239. Epub 1987/06/01. eng.
81. Poher DM, Freedson PS, Kline GM, McInnis KJ, Rippe JM. Development and validation of a one-mile treadmill walk test to predict peak oxygen uptake in healthy adults ages 40 to 79 years. *Can J Appl Physiol*. 2002 Dec;27(6):575-89. PubMed PMID: 12500996. Epub 2002/12/26. eng.
82. Zavorsky GS. Evidence and possible mechanisms of altered maximum heart rate with endurance training and tapering. *Sports Med*. 2000 Jan;29(1):13-26. PubMed PMID: 10688280.

83. Bean JF, Kiely DK, Leveille SG, Herman S, Huynh C, Fielding R, et al. The 6-minute walk test in mobility-limited elders: what is being measured? *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2002 Nov;57(11):M751-6. PubMed PMID: 12403805. Epub 2002/10/31. eng.
84. Astrand PO, Ryhming I. A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol*. 1954 Sep;7(2):218-21. PubMed PMID: 13211501.
85. Ebbeling CB, Ward A, Puleo EM, Widrick J, Rippe JM. Development of a single-stage submaximal treadmill walking test. *Med Sci Sports Exerc*. 1991 Aug;23(8):966-73. PubMed PMID: 1956273. Epub 1991/08/01. eng.
86. Waddoups L, Wagner D, Fallon J, Heath E. Validation of a single-stage submaximal treadmill walking test. *J Sports Sci*. 2008 Mar;26(5):491-7. PubMed PMID: 18274946. Epub 2008/02/16. eng.
87. Beekley MD, Brechue WF, deHoyos DV, Garzarella L, Werber-Zion G, Pollock ML. Cross-validation of the YMCA submaximal cycle ergometer test to predict VO<sub>2</sub>max. *Res Q Exerc Sport*. 2004 Sep;75(3):337-42. PubMed PMID: 15487296.
88. McAuley E, Szabo AN, Mailey EL, Erickson KI, Voss M, White SM, et al. Non-Exercise Estimated Cardiorespiratory Fitness: Associations with Brain Structure, Cognition, and Memory Complaints in Older Adults. *Mental health and physical activity*. 2011 Jun 1;4(1):5-11. PubMed PMID: 21808657. Pubmed Central PMCID: 3146052.
89. Enoka RM. Muscle strength and its development. *New perspectives. Sports Med*. 1988 Sep;6(3):146-68. PubMed PMID: 3055145.
90. Hunter GR, McCarthy JP, Bamman MM. Effects of resistance training on older adults. *Sports Med*. 2004;34(5):329-48. PubMed PMID: 15107011.
91. Tracy BL, Enoka RM. Older adults are less steady during submaximal isometric contractions with the knee extensor muscles. *Journal of applied physiology*. 2002 Mar;92(3):1004-12. PubMed PMID: 11842033.
92. Bosquet L, Berryman N, Dupuy O, Mekary S, Arvisais D, Bherer L, et al. Effect of training cessation on muscular performance: A meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 2013 Jan 24. PubMed PMID: 23347054.
93. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol*. 2002 Oct;93(4):1318-26. PubMed PMID: 12235031.
94. Marieb EN, Hoehn K. *Anatomie et physiologie humaines*. 4e éd. ed. Saint-Laurent, Québec: Éditions du Renouveau pédagogique; 2010. xxvii, 1293, [118] p.
95. Komi PV, Comité international olympique. Commission médicale, Fédération internationale de médecine sportive. *Strength and power in sport*. 2nd ed. Osney Mead, Oxford ; Malden, MA: Blackwell Science; 2002. xiv, 523 p.
96. Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med*. 2007;37(2):145-68. PubMed PMID: 17241104.
97. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological reviews*. 2001 Oct;81(4):1725-89. PubMed PMID: 11581501.
98. Sale DG. Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*. 1988 Oct;20(5 Suppl):S135-45. PubMed PMID: 3057313.
99. Moritani T, deVries HA. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American journal of physical medicine*. 1979 Jun;58(3):115-30. PubMed PMID: 453338.

100. Aagaard P. Training-induced changes in neural function. *Exercise and sport sciences reviews*. 2003 Apr;31(2):61-7. PubMed PMID: 12715968.
101. Macaluso A, De Vito G. Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *Eur J Appl Physiol*. 2004 Apr;91(4):450-72. PubMed PMID: 14639481.
102. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing maximal neuromuscular power: Part 1-- biological basis of maximal power production. *Sports Med*. 2011 Jan 1;41(1):17-38. PubMed PMID: 21142282.
103. Knight CA, Kamen G. Adaptations in muscular activation of the knee extensor muscles with strength training in young and older adults. *J Electromyogr Kinesiol*. 2001 Dec;11(6):405-12. PubMed PMID: 11738953.
104. Gabriel DA, Kamen G, Frost G. Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. *Sports Med*. 2006;36(2):133-49. PubMed PMID: 16464122.
105. Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gavardi C, et al. Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Physiol Scand*. 1996 Jun;157(2):175-86. PubMed PMID: 8800357.
106. Wilson JM, Loenneke JP, Jo E, Wilson GJ, Zourdos MC, Kim JS. The effects of endurance, strength, and power training on muscle fiber type shifting. *J Strength Cond Res*. 2012 Jun;26(6):1724-9. PubMed PMID: 21912291.
107. Andersen JL, Aagaard P. Effects of strength training on muscle fiber types and size; consequences for athletes training for high-intensity sport. *Scand J Med Sci Sports*. 2010 Oct;20 Suppl 2:32-8. PubMed PMID: 20840560.
108. Malisoux L, Francaux M, Theisen D. What do single-fiber studies tell us about exercise training? *Med Sci Sports Exerc*. 2007 Jul;39(7):1051-60. PubMed PMID: 17596771.
109. Schoenfeld BJ. Is There a Minimum Intensity Threshold for Resistance Training-Induced Hypertrophic Adaptations? *Sports Med*. 2013 Aug 19. PubMed PMID: 23955603.
110. Schoenfeld BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med*. 2013 Mar;43(3):179-94. PubMed PMID: 23338987.
111. Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med*. 2005;35(4):339-61. PubMed PMID: 15831061.
112. Spiering BA, Kraemer WJ, Anderson JM, Armstrong LE, Nindl BC, Volek JS, et al. Resistance exercise biology: manipulation of resistance exercise programme variables determines the responses of cellular and molecular signalling pathways. *Sports Med*. 2008;38(7):527-40. PubMed PMID: 18557656.
113. West DW, Burd NA, Churchward-Venne TA, Camera DM, Mitchell CJ, Baker SK, et al. Sex-based comparisons of myofibrillar protein synthesis after resistance exercise in the fed state. *Journal of applied physiology*. 2012 Jun;112(11):1805-13. PubMed PMID: 22383503.
114. West DW, Phillips SM. Associations of exercise-induced hormone profiles and gains in strength and hypertrophy in a large cohort after weight training. *Eur J Appl Physiol*. 2012 Jul;112(7):2693-702. PubMed PMID: 22105707. Pubmed Central PMCID: 3371329.
115. Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, Bellamy L, Parise G, Baker SK, Phillips SM. Muscular and systemic correlates of resistance training-induced muscle hypertrophy. *PLoS One*. 2013;8(10):e78636. PubMed PMID: 24130904. Pubmed Central PMCID: 3793973.
116. Burd NA, West DW, Staples AW, Atherton PJ, Baker JM, Moore DR, et al. Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low



- volume resistance exercise in young men. *PLoS One*. 2010;5(8):e12033. PubMed PMID: 20711498. Pubmed Central PMCID: 2918506.
117. Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, Burd NA, Breen L, Baker SK, et al. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *Journal of applied physiology*. 2012 Jul;113(1):71-7. PubMed PMID: 22518835. Pubmed Central PMCID: 3404827.
  118. Burd NA, Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, Phillips SM. Bigger weights may not beget bigger muscles: evidence from acute muscle protein synthetic responses after resistance exercise. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2012 Jun;37(3):551-4. PubMed PMID: 22533517.
  119. Kadi F, Charifi N, Denis C, Lexell J, Andersen JL, Schjerling P, et al. The behaviour of satellite cells in response to exercise: what have we learned from human studies? *Pflugers Arch*. 2005 Nov;451(2):319-27. PubMed PMID: 16091958.
  120. Hill A. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc Lond B*. 1938;126:136-95.
  121. Wilson JM, Flanagan EP. The role of elastic energy in activities with high force and power requirements: a brief review. *J Strength Cond Res*. 2008 Sep;22(5):1705-15. PubMed PMID: 18714212.
  122. Roberts TJ, Konow N. How tendons buffer energy dissipation by muscle. *Exercise and sport sciences reviews*. 2013 Oct;41(4):186-93. PubMed PMID: 23873133.
  123. Skelton DA, Greig CA, Davies JM, Young A. Strength, power and related functional ability of healthy people aged 65-89 years. *Age Ageing*. 1994 Sep;23(5):371-7. PubMed PMID: 7825481.
  124. Edwen CE, Thorlund JB, Magnusson SP, Slinde F, Svantesson U, Hulthen L, et al. Stretch-shortening cycle muscle power in women and men aged 18-81 years: Influence of age and gender. *Scand J Med Sci Sports*. 2013 Mar 28. PubMed PMID: 23551758.
  125. Marmon AR, Pascoe MA, Schwartz RS, Enoka RM. Associations among strength, steadiness, and hand function across the adult life span. *Med Sci Sports Exerc*. 2011 Apr;43(4):560-7. PubMed PMID: 20689447.
  126. Delmonico MJ, Harris TB, Visser M, Park SW, Conroy MB, Velasquez-Mieyer P, et al. Longitudinal study of muscle strength, quality, and adipose tissue infiltration. *The American journal of clinical nutrition*. 2009 Dec;90(6):1579-85. PubMed PMID: 19864405. Pubmed Central PMCID: 2777469.
  127. Lang T, Streeper T, Cawthon P, Baldwin K, Taaffe DR, Harris TB. Sarcopenia: etiology, clinical consequences, intervention, and assessment. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*. 2010 Apr;21(4):543-59. PubMed PMID: 19779761. Pubmed Central PMCID: 2832869.
  128. McNeil CJ, Doherty TJ, Stashuk DW, Rice CL. Motor unit number estimates in the tibialis anterior muscle of young, old, and very old men. *Muscle & nerve*. 2005 Apr;31(4):461-7. PubMed PMID: 15685623.
  129. Aagaard P, Suetta C, Caserotti P, Magnusson SP, Kjaer M. Role of the nervous system in sarcopenia and muscle atrophy with aging: strength training as a countermeasure. *Scand J Med Sci Sports*. 2010 Feb;20(1):49-64. PubMed PMID: 20487503.
  130. Stevens JE, Stackhouse SK, Binder-Macleod SA, Snyder-Mackler L. Are voluntary muscle activation deficits in older adults meaningful? *Muscle & nerve*. 2003 Jan;27(1):99-101. PubMed PMID: 12508301.

131. Nilwik R, Snijders T, Leenders M, Groen BB, van Kranenburg J, Verdijk LB, et al. The decline in skeletal muscle mass with aging is mainly attributed to a reduction in type II muscle fiber size. *Experimental gerontology*. 2013 May;48(5):492-8. PubMed PMID: 23425621.
132. Verdijk LB, Snijders T, Drost M, Delhaas T, Kadi F, van Loon LJ. Satellite cells in human skeletal muscle; from birth to old age. *Age*. 2013 Oct 12. PubMed PMID: 24122288.
133. Narici MV, Maganaris CN, Reeves ND, Capodaglio P. Effect of aging on human muscle architecture. *Journal of applied physiology*. 2003 Dec;95(6):2229-34. PubMed PMID: 12844499.
134. Bassey EJ, Fiatarone MA, O'Neill EF, Kelly M, Evans WJ, Lipsitz LA. Leg extensor power and functional performance in very old men and women. *Clinical science*. 1992 Mar;82(3):321-7. PubMed PMID: 1312417.
135. Clark DJ, Manini TM, Fielding RA, Patten C. Neuromuscular determinants of maximum walking speed in well-functioning older adults. *Experimental gerontology*. 2013 Mar;48(3):358-63. PubMed PMID: 23376102. Pubmed Central PMCID: 3594593.
136. Latham NK, Bennett DA, Stretton CM, Anderson CS. Systematic review of progressive resistance strength training in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2004 Jan;59(1):48-61. PubMed PMID: 14718486.
137. Hazell T, Kenno K, Jakobi J. Functional benefit of power training for older adults. *J Aging Phys Act*. 2007 Jul;15(3):349-59. PubMed PMID: 17724399.
138. Tschopp M, Sattelmayer MK, Hilfiker R. Is power training or conventional resistance training better for function in elderly persons? A meta-analysis. *Age Ageing*. 2011 Sep;40(5):549-56. PubMed PMID: 21383023.
139. Aagaard P, Magnusson PS, Larsson B, Kjaer M, Krstrup P. Mechanical muscle function, morphology, and fiber type in lifelong trained elderly. *Med Sci Sports Exerc*. 2007 Nov;39(11):1989-96. PubMed PMID: 17986907.
140. Gillespie LD, Gillespie WJ, Robertson MC, Lamb SE, Cumming RG, Rowe BH. Interventions for preventing falls in elderly people. *Cochrane Database Syst Rev*. 2003 (4):CD000340. PubMed PMID: 14583918.
141. Abernethy P, Wilson G, Logan P. Strength and power assessment. Issues, controversies and challenges. *Sports Med*. 1995 Jun;19(6):401-17. PubMed PMID: 7676101. Epub 1995/06/01. eng.
142. Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*. 1993 Nov;25(11):1279-86. PubMed PMID: 8289617.
143. B. Jidovtseff J-LC, C. Demoulin, J.-M. Crielaard. Évaluation inertielle: état de la question et perspectives. *Science & Sports*. 2008;23(3-4):107-17.
144. Verdijk LB, van Loon L, Meijer K, Savelberg HH. One-repetition maximum strength test represents a valid means to assess leg strength in vivo in humans. *J Sports Sci*. 2009 Jan 1;27(1):59-68. PubMed PMID: 19031334.
145. Henwood TR, Riek S, Taaffe DR. Strength versus muscle power-specific resistance training in community-dwelling older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2008 Jan;63(1):83-91. PubMed PMID: 18245765. Epub 2008/02/05. eng.
146. Phillips WT, Batterham AM, Valenzuela JE, Burkett LN. Reliability of maximal strength testing in older adults. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004 Feb;85(2):329-34. PubMed PMID: 14966722.
147. Holviala J, Kraemer WJ, Sillanpaa E, Karppinen H, Avela J, Kauhanen A, et al. Effects of strength, endurance and combined training on muscle strength, walking speed and dynamic balance in aging men. *Eur J Appl Physiol*. 2012 Apr;112(4):1335-47. PubMed PMID: 21796409.

148. Jidovtseff B, Harris NK, Crielaard JM, Cronin JB. Using the load-velocity relationship for 1RM prediction. *J Strength Cond Res.* 2011 Jan;25(1):267-70. PubMed PMID: 19966589.
149. Holsgaard Larsen A, Caserotti P, Puggaard L, Aagaard P. Reproducibility and relationship of single-joint strength vs multi-joint strength and power in aging individuals. *Scand J Med Sci Sports.* 2007 Feb;17(1):43-53. PubMed PMID: 16787447.
150. Wilson GJ, Elliott BC, Wood GA. The effect on performance of imposing a delay during a stretch-shorten cycle movement. *Med Sci Sports Exerc.* 1991 Mar;23(3):364-70. PubMed PMID: 2020276.
151. Pearson DR, Costill DL. The effects of constant external resistance exercise and isokinetic exercise training on work-induced hypertrophy. *The Journal of Applied Sport Science Research.* 1988;2(3):39-41.
152. Manini TM, Visser M, Won-Park S, Patel KV, Strotmeyer ES, Chen H, et al. Knee extension strength cutpoints for maintaining mobility. *J Am Geriatr Soc.* 2007 Mar;55(3):451-7. PubMed PMID: 17341251. Epub 2007/03/08. eng.
153. J.L. Croisier JMC. Exploration isocinétique: analyse des paramètres chiffrés. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique.* 1999;42(9):538-45.
154. Abernethy B, Hanna A, Plooy A. The attentional demands of preferred and non-preferred gait patterns. *Gait Posture.* 2002 Jun;15(3):256-65. PubMed PMID: 11983500. Epub 2002/05/02. eng.
155. Hartmann A, Knols R, Murer K, de Bruin ED. Reproducibility of an isokinetic strength-testing protocol of the knee and ankle in older adults. *Gerontology.* 2009;55(3):259-68. PubMed PMID: 18997454. Epub 2008/11/11. eng.
156. Harbo T, Brincks J, Andersen H. Maximal isokinetic and isometric muscle strength of major muscle groups related to age, body mass, height, and sex in 178 healthy subjects. *Eur J Appl Physiol.* 2012 Jan;112(1):267-75. PubMed PMID: 21537927.
157. Osternig LR. Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. *Exercise and sport sciences reviews.* 1986;14:45-80. PubMed PMID: 3525192.
158. Schrack JA, Simonsick EM, Ferrucci L. The relationship of the energetic cost of slow walking and peak energy expenditure to gait speed in mid-to-late life. *Am J Phys Med Rehabil.* 2013 Jan;92(1):28-35. PubMed PMID: 22854908. Pubmed Central PMCID: 3734804.
159. Huang G, Gibson CA, Tran ZV, Osness WH. Controlled endurance exercise training and VO2max changes in older adults: a meta-analysis. *Preventive cardiology.* 2005 Fall;8(4):217-25. PubMed PMID: 16230876.
160. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences.* 2nd ed. Hillsdale: L. Erlbaum Associates; 1988.
161. Guiraud T, Nigam A, Gremeaux V, Meyer P, Juneau M, Bosquet L. High-intensity interval training in cardiac rehabilitation. *Sports Med.* 2012 Jul 1;42(7):587-605. PubMed PMID: 22694349.
162. Guiraud T, Juneau M, Nigam A, Gayda M, Meyer P, Mekary S, et al. Optimization of high intensity interval exercise in coronary heart disease. *Eur J Appl Physiol.* 2010 Mar;108(4):733-40. PubMed PMID: 19915859. Epub 2009/11/17. eng.
163. Nemoto K, Gen-no H, Masuki S, Okazaki K, Nose H. Effects of high-intensity interval walking training on physical fitness and blood pressure in middle-aged and older people. *Mayo Clin Proc.* 2007 Jul;82(7):803-11. PubMed PMID: 17605959.
164. Sloth M, Sloth D, Overgaard K, Dalgas U. Effects of sprint interval training on VO and aerobic exercise performance: A systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports.* 2013 Jul 25. PubMed PMID: 23889316.

165. Wang E, Naess MS, Hoff J, Albert TL, Pham Q, Richardson RS, et al. Exercise-training-induced changes in metabolic capacity with age: the role of central cardiovascular plasticity. *Age*. 2013 Nov 16. PubMed PMID: 24243396.
166. Kamen G, Knight CA. Training-related adaptations in motor unit discharge rate in young and older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2004 Dec;59(12):1334-8. PubMed PMID: 15699535.
167. Tracy BL, Enoka RM. Steadiness training with light loads in the knee extensors of elderly adults. *Med Sci Sports Exerc*. 2006 Apr;38(4):735-45. PubMed PMID: 16679991.
168. Stewart VH, Saunders DH, Greig CA. Responsiveness of muscle size and strength to physical training in very elderly people: A systematic review. *Scand J Med Sci Sports*. 2013 Oct 24. PubMed PMID: 24151875.
169. Steib S, Schoene D, Pfeifer K. Dose-response relationship of resistance training in older adults: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc*. 2010 May;42(5):902-14. PubMed PMID: 19996996.
170. Ronnestad BR, Mujika I. Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scand J Med Sci Sports*. 2013 Aug 5. PubMed PMID: 23914932.
171. Berryman N, Maurel D, Bosquet L. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res*. 2010 Jul;24(7):1818-25. PubMed PMID: 20543734. Epub 2010/06/15. eng.
172. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and  $\dot{V}O_2$  kinetics. *Med Sci Sports Exerc*. 2002 Aug;34(8):1351-9. PubMed PMID: 12165692.
173. Storen O, Helgerud J, Stoa EM, Hoff J. Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 2008 Jun;40(6):1087-92. PubMed PMID: 18460997.
174. Bonacci J, Chapman A, Blanch P, Vicenzino B. Neuromuscular adaptations to training, injury and passive interventions: implications for running economy. *Sports Med*. 2009;39(11):903-21. PubMed PMID: 19827859.
175. Karlsen T, Helgerud J, Stoylen A, Lauritsen N, Hoff J. Maximal strength training restores walking mechanical efficiency in heart patients. *Int J Sports Med*. 2009 May;30(5):337-42. PubMed PMID: 19199203.
176. Shephard RJ, Åstrand P-O, Comité international olympique. Commission médicale, Fédération internationale de médecine sportive. *Endurance in sport*. Oxford ; Boston St. Louis, Mo.: Blackwell Scientific Publications ; Mosby-Year Book distributor; 1992. xvi, 638 p.
177. Aagaard P, Andersen JL. Effects of strength training on endurance capacity in top-level endurance athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2010 Oct;20 Suppl 2:39-47. PubMed PMID: 20840561.
178. VanSwearingen JM, Perera S, Brach JS, Cham R, Rosano C, Studenski SA. A randomized trial of two forms of therapeutic activity to improve walking: effect on the energy cost of walking. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2009 Nov;64(11):1190-8. PubMed PMID: 19643842. Epub 2009/08/01. eng.
179. Almeida OP, Khan KM, Hankey GJ, Yeap BB, Golledge J, Flicker L. 150 minutes of vigorous physical activity per week predicts survival and successful ageing: a population-based 11-year longitudinal study of 12 201 older Australian men. *Br J Sports Med*. 2013 Sep 3. PubMed PMID: 24002240.
180. Karavirta L, Hakkinen K, Kauhanen A, Arijia-Blazquez A, Sillanpaa E, Rinkinen N, et al. Individual responses to combined endurance and strength training in older adults. *Med Sci Sports Exerc*. 2011 Mar;43(3):484-90. PubMed PMID: 20689460.

181. Renaud M, Bherer L. [Impact on physical fitness on cognitive aging]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil*. 2005 Sep;3(3):199-206. PubMed PMID: 16126472. Epub 2005/08/30. L'impact de la condition physique sur le vieillissement cognitif. fre.
182. Spirduso WW, Francis KL, MacRae PG. *Physical dimensions of aging*. 2nd ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2005. ix, 374 p.
183. 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. PubMed PMID: 12127181. Epub 2002/07/20. eng.
184. Engle RW, Conway ARA, Tuholski SW, Shisler RJ. A RESOURCE ACCOUNT OF INHIBITION. *Psychological Science*. 1995 Mar;6(2):122-5. PubMed PMID: WOS:A1995QR66500010.
185. Grady C. BRAIN AGEING The cognitive neuroscience of ageing. *Nature Reviews Neuroscience*. 2012 Jul;13(7):491-505. PubMed PMID: WOS:000305614600011.
186. Hedden T, Gabrieli JD. Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience. *Nat Rev Neurosci*. 2004 Feb;5(2):87-96. PubMed PMID: 14735112.
187. Boucard GK, Albinet CT, Bugajska A, Bouquet CA, Clarys D, Audiffren M. Impact of physical activity on executive functions in aging: a selective effect on inhibition among old adults. *J Sport Exerc Psychol*. 2012 Dec;34(6):808-27. PubMed PMID: 23204360.
188. Etnier JL, Nowell PM, Landers DM, Sibley BA. A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Res Rev*. 2006 Aug 30;52(1):119-30. PubMed PMID: 16490256. Epub 2006/02/24. eng.
189. Kramer AF, Erickson KI, Colcombe SJ. Exercise, cognition, and the aging brain. *J Appl Physiol*. 2006 Oct;101(4):1237-42. PubMed PMID: 16778001. Epub 2006/06/17. eng.
190. Kramer AF, Colcombe SJ, McAuley E, Scalf PE, Erickson KI. Fitness, aging and neurocognitive function. *Neurobiol Aging*. 2005 Dec;26 Suppl 1:124-7. PubMed PMID: 16213062. Epub 2005/10/11. eng.
191. Colcombe S, Kramer AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychol Sci*. 2003 Mar;14(2):125-30. PubMed PMID: 12661673. Epub 2003/03/29. eng.
192. Smith PJ, Blumenthal JA, Hoffman BM, Cooper H, Strauman TA, Welsh-Bohmer K, et al. Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosom Med*. 2010 Apr;72(3):239-52. PubMed PMID: 20223924. Epub 2010/03/13. eng.
193. Angevaren M, Aufdemkampe G, Verhaar HJ, Aleman A, Vanhees L. Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database Syst Rev*. 2008 (3):CD005381. PubMed PMID: 18646126. Epub 2008/07/23. eng.
194. Renaud M, Bherer L, Maquestiaux F. A high level of physical fitness is associated with more efficient response preparation in older adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*. 2010 May;65B(3):317-22. PubMed PMID: 20139133. Epub 2010/02/09. eng.
195. Erickson KI, Prakash RS, Voss MW, Chaddock L, Hu L, Morris KS, et al. Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*. 2009 Oct;19(10):1030-9. PubMed PMID: 19123237. Epub 2009/01/06. eng.
196. Benedict C, Brooks SJ, Kullberg J, Nordenskjold R, Burgos J, Le Greves M, et al. Association between physical activity and brain health in older adults. *Neurobiol Aging*. 2013 Jan;34(1):83-90. PubMed PMID: 22592017.

197. Yaffe K, Barnes D, Nevitt M, Lui LY, Covinsky K. A prospective study of physical activity and cognitive decline in elderly women: women who walk. *Arch Intern Med.* 2001 Jul 23;161(14):1703-8. PubMed PMID: 11485502. Epub 2001/08/04. eng.
198. Larson EB, Wang L, Bowen JD, McCormick WC, Teri L, Crane P, et al. Exercise is associated with reduced risk for incident dementia among persons 65 years of age and older. *Ann Intern Med.* 2006 Jan 17;144(2):73-81. PubMed PMID: 16418406. Epub 2006/01/19. eng.
199. Wendell CR, Gunstad J, Waldstein SR, Wright JG, Ferrucci L, Zonderman AB. Cardiorespiratory Fitness and Accelerated Cognitive Decline With Aging. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2013 Nov 5. PubMed PMID: 24192540.
200. 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. PubMed PMID: 12657064. Epub 2003/03/27. eng.
201. Kramer AF, Hahn S, Cohen NJ, Banich MT, McAuley E, Harrison CR, et al. Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature.* 1999 Jul 29;400(6743):418-9. PubMed PMID: 10440369. Epub 1999/08/10. eng.
202. Bherer L, Belleville S. Age-related differences in response preparation: the role of time uncertainty. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci.* 2004 Mar;59(2):P66-74. PubMed PMID: 15014089. Epub 2004/03/12. eng.
203. Bherer L, Belleville S, Hudon C. [Executive function deficits in normal aging, Alzheimer's disease, and frontotemporal dementia]. *Psychol Neuropsychiatr Vieil.* 2004 Sep;2(3):181-9. PubMed PMID: 15689332. Epub 2005/02/04. Le declin des fonctions executives au cours du vieillissement normal, dans la maladie d'Alzheimer et dans la demence frontotemporale. fre.
204. Fabre C, Chamari K, Mucci P, Masse-Biron J, Prefaut C. Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. *Int J Sports Med.* 2002 Aug;23(6):415-21. PubMed PMID: 12215960.
205. Voelcker-Rehage C, Godde B, Staudinger UM. Cardiovascular and coordination training differentially improve cognitive performance and neural processing in older adults. *Frontiers in human neuroscience.* 2011;5:26. PubMed PMID: 21441997. Pubmed Central PMCID: 3062100.
206. Smiley-Oyen AL, Lowry KA, Francois SJ, Kohut ML, Ekkekakis P. Exercise, fitness, and neurocognitive function in older adults: the "selective improvement" and "cardiovascular fitness" hypotheses. *Ann Behav Med.* 2008 Dec;36(3):280-91. PubMed PMID: 18825471. Pubmed Central PMCID: 2748860. Epub 2008/10/01. eng.
207. Ploughman M. Exercise is brain food: the effects of physical activity on cognitive function. *Dev Neurorehabil.* 2008 Jul;11(3):236-40. PubMed PMID: 18781504. Epub 2008/09/11. eng.
208. Vaynman S, Gomez-Pinilla F. License to run: exercise impacts functional plasticity in the intact and injured central nervous system by using neurotrophins. *Neurorehabil Neural Repair.* 2005 Dec;19(4):283-95. PubMed PMID: 16263961. Epub 2005/11/03. eng.
209. Neeper SA, Gomez-Pinilla F, Choi J, Cotman C. Exercise and brain neurotrophins. *Nature.* 1995 Jan 12;373(6510):109. PubMed PMID: 7816089. Epub 1995/01/12. eng.
210. Christie BR, Eadie BD, Kannangara TS, Robillard JM, Shin J, Titterness AK. Exercising our brains: how physical activity impacts synaptic plasticity in the dentate gyrus. *Neuromolecular Med.* 2008;10(2):47-58. PubMed PMID: 18535925. Epub 2008/06/07. eng.
211. Lista I, Sorrentino G. Biological mechanisms of physical activity in preventing cognitive decline. *Cell Mol Neurobiol.* 2010 May;30(4):493-503. PubMed PMID: 20041290. Epub 2009/12/31. eng.

212. Nindl BC, Pierce JR. Insulin-like growth factor I as a biomarker of health, fitness, and training status. *Med Sci Sports Exerc.* 2010 Jan;42(1):39-49. PubMed PMID: 20010131. Epub 2009/12/17. eng.
213. Bishop NA, Lu T, Yankner BA. Neural mechanisms of ageing and cognitive decline. *Nature.* 2010 Mar 25;464(7288):529-35. PubMed PMID: 20336135. Epub 2010/03/26. eng.
214. van Dam PS, Aleman A. Insulin-like growth factor-I, cognition and brain aging. *Eur J Pharmacol.* 2004 Apr 19;490(1-3):87-95. PubMed PMID: 15094076. Epub 2004/04/20. eng.
215. Aleman A, Verhaar HJ, De Haan EH, De Vries WR, Samson MM, Drent ML, et al. Insulin-like growth factor-I and cognitive function in healthy older men. *J Clin Endocrinol Metab.* 1999 Feb;84(2):471-5. PubMed PMID: 10022403. Epub 1999/02/18. eng.
216. Al-Delaimy WK, von Muhlen D, Barrett-Connor E. Insulinlike growth factor-1, insulinlike growth factor binding protein-1, and cognitive function in older men and women. *J Am Geriatr Soc.* 2009 Aug;57(8):1441-6. PubMed PMID: 19515112. Pubmed Central PMCID: 2728156. Epub 2009/06/12. eng.
217. Fabel K, Fabel K, Tam B, Kaufer D, Baiker A, Simmons N, et al. VEGF is necessary for exercise-induced adult hippocampal neurogenesis. *Eur J Neurosci.* 2003 Nov;18(10):2803-12. PubMed PMID: 14656329.
218. Voss MW, Nagamatsu LS, Liu-Ambrose T, Kramer AF. Exercise, brain, and cognition across the life span. *J Appl Physiol.* 2011 Nov;111(5):1505-13. PubMed PMID: 21527670. Pubmed Central PMCID: 3220305.
219. Davenport MH, Hogan DB, Eskes GA, Longman RS, Poulin MJ. Cerebrovascular reserve: the link between fitness and cognitive function? *Exercise and sport sciences reviews.* 2012 Jul;40(3):153-8. PubMed PMID: 22504726.
220. Scherder EJ, Eggermont LH, Geuze RH, Vis J, Verkerke GJ. Quadriceps strength and executive functions in older women. *Am J Phys Med Rehabil.* 2010 Jun;89(6):458-63. PubMed PMID: 20216058.
221. Kervio G, Carre F, Ville NS. Reliability and intensity of the six-minute walk test in healthy elderly subjects. *Med Sci Sports Exerc.* 2003 Jan;35(1):169-74. PubMed PMID: 12544651. Epub 2003/01/25. eng.
222. Boyle PA, Buchman AS, Wilson RS, Leurgans SE, Bennett DA. Association of muscle strength with the risk of Alzheimer disease and the rate of cognitive decline in community-dwelling older persons. *Archives of neurology.* 2009 Nov;66(11):1339-44. PubMed PMID: 19901164. Pubmed Central PMCID: 2838435.
223. Liu-Ambrose T, Nagamatsu LS, Graf P, Beattie BL, Ashe MC, Handy TC. Resistance training and executive functions: a 12-month randomized controlled trial. *Arch Intern Med.* 2010 Jan 25;170(2):170-8. PubMed PMID: 20101012. Epub 2010/01/27. eng.
224. Cassilhas RC, Viana VA, Grassmann V, Santos RT, Santos RF, Tufik S, et al. The impact of resistance exercise on the cognitive function of the elderly. *Med Sci Sports Exerc.* 2007 Aug;39(8):1401-7. PubMed PMID: 17762374. Epub 2007/09/01. eng.
225. Cassilhas RC, Lee KS, Fernandes J, Oliveira MG, Tufik S, Meeusen R, et al. Spatial memory is improved by aerobic and resistance exercise through divergent molecular mechanisms. *Neuroscience.* 2012 Jan 27;202:309-17. PubMed PMID: 22155655.
226. Forte R, Boreham CA, Leite JC, De Vito G, Brennan L, Gibney ER, et al. Enhancing cognitive functioning in the elderly: multicomponent vs resistance training. *Clinical interventions in aging.* 2013;8:19-27. PubMed PMID: 23341738. Pubmed Central PMCID: 3546758.
227. McGough EL, Kelly VE, Logsdon RG, McCurry SM, Cochrane BB, Engel JM, et al. Associations between physical performance and executive function in older adults with mild cognitive

- impairment: gait speed and the timed "up & go" test. *Phys Ther*. 2011 Aug;91(8):1198-207. PubMed PMID: 21616934. Pubmed Central PMCID: 3145896.
228. Lundin-Olsson L, Nyberg L, Gustafson Y. "Stops walking when talking" as a predictor of falls in elderly people. *Lancet*. 1997 Mar 1;349(9052):617. PubMed PMID: 9057736. Epub 1997/03/01. eng.
  229. Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. The role of executive function and attention in gait. *Mov Disord*. 2008 Feb 15;23(3):329-42; quiz 472. PubMed PMID: 18058946. Pubmed Central PMCID: 2535903. Epub 2007/12/07. eng.
  230. Srygley JM, Mirelman A, Herman T, Giladi N, Hausdorff JM. When does walking alter thinking? Age and task associated findings. *Brain Res*. 2009 Feb 9;1253:92-9. PubMed PMID: 19084511. Pubmed Central PMCID: 2631095. Epub 2008/12/17. eng.
  231. Yang YR, Chen YC, Lee CS, Cheng SJ, Wang RY. Dual-task-related gait changes in individuals with stroke. *Gait Posture*. 2007 Feb;25(2):185-90. PubMed PMID: 16650766. Epub 2006/05/03. eng.
  232. Beauchet O, Annweiler C, Dubost V, Allali G, Kressig RW, Bridenbaugh S, et al. Stops walking when talking: a predictor of falls in older adults? *Eur J Neurol*. 2009 Jul;16(7):786-95. PubMed PMID: 19473368. Epub 2009/05/29. eng.
  233. Graham JE, Ostir GV, Fisher SR, Ottenbacher KJ. Assessing walking speed in clinical research: a systematic review. *J Eval Clin Pract*. 2008 Aug;14(4):552-62. PubMed PMID: 18462283. Pubmed Central PMCID: 2628962. Epub 2008/05/09. eng.
  234. Larish DD, Martin PE, Mungiole M. Characteristic patterns of gait in the healthy old. *Ann N Y Acad Sci*. 1988;515:18-32. PubMed PMID: 3364884. Epub 1988/01/01. eng.
  235. Fisher SV, Gullickson G, Jr. Energy cost of ambulation in health and disability: a literature review. *Arch Phys Med Rehabil*. 1978 Mar;59(3):124-33. PubMed PMID: 148252. Epub 1978/03/01. eng.
  236. Martin PE, Rothstein DE, Larish DD. Effects of age and physical activity status on the speed-aerobic demand relationship of walking. *J Appl Physiol*. 1992 Jul;73(1):200-6. PubMed PMID: 1506370. Epub 1992/07/01. eng.
  237. Alton F, Baldey L, Caplan S, Morrissey MC. A kinematic comparison of overground and treadmill walking. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1998 Sep;13(6):434-40. PubMed PMID: 11415818. Epub 2001/06/21. Eng.
  238. Marsh AP, Katula JA, Pacchia CF, Johnson LC, Koury KL, Rejeski WJ. Effect of treadmill and overground walking on function and attitudes in older adults. *Med Sci Sports Exerc*. 2006 Jun;38(6):1157-64. PubMed PMID: 16775558. Epub 2006/06/16. eng.
  239. Gayda M, Bosquet L, Juneau M, Guiraud T, Lambert J, Nigam A. Comparison of gas exchange data using the Aquatrainer system and the facemask with Cosmed K4b2 during exercise in healthy subjects. *Eur J Appl Physiol*. 2010 May;109(2):191-9. PubMed PMID: 20049481. Epub 2010/01/06. eng.
  240. Munro BH. *Statistical methods for health care research*. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. xiii, 494 p.
  241. Currier DP. *Elements of research in physical therapy*. 3rd ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1990. xi, 333 p.
  242. Weir JP. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *J Strength Cond Res*. 2005 Feb;19(1):231-40. PubMed PMID: 15705040. Epub 2005/02/12. eng.



243. Griffin TM, Roberts TJ, Kram R. Metabolic cost of generating muscular force in human walking: insights from load-carrying and speed experiments. *J Appl Physiol.* 2003 Jul;95(1):172-83. PubMed PMID: 12794096. Epub 2003/06/10. eng.
244. Umberger BR. Stance and swing phase costs in human walking. *J R Soc Interface.* 2010 Sep 6;7(50):1329-40. PubMed PMID: 20356877. Pubmed Central PMCID: 2894890. Epub 2010/04/02. eng.
245. Vincent WJ. *Statistics in kinesiology.* 3rd ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2005. xvi, 311 p.
246. Atkinson G, Nevill AM. Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Med.* 1998 Oct;26(4):217-38. PubMed PMID: 9820922. Epub 1998/11/20. eng.
247. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med.* 2000 Jul;30(1):1-15. PubMed PMID: 10907753. Epub 2000/07/25. eng.
248. Rolland YM, Cesari M, Miller ME, Penninx BW, Atkinson HH, Pahor M. Reliability of the 400-m usual-pace walk test as an assessment of mobility limitation in older adults. *J Am Geriatr Soc.* 2004 Jun;52(6):972-6. PubMed PMID: 15161464. Epub 2004/05/27. eng.
249. Graham JE, Ostir GV, Kuo YF, Fisher SR, Ottenbacher KJ. Relationship between test methodology and mean velocity in timed walk tests: a review. *Arch Phys Med Rehabil.* 2008 May;89(5):865-72. PubMed PMID: 18452733. Pubmed Central PMCID: 2659762. Epub 2008/05/03. eng.
250. Malatesta D, Simar D, Dauvilliers Y, Candau R, Ben Saad H, Prefaut C, et al. Aerobic determinants of the decline in preferred walking speed in healthy, active 65- and 80-year-olds. *Pflugers Arch.* 2004 Mar;447(6):915-21. PubMed PMID: 14666424. Epub 2003/12/11. eng.
251. Studenski S, Perera S, Wallace D, Chandler JM, Duncan PW, Rooney E, et al. Physical performance measures in the clinical setting. *J Am Geriatr Soc.* 2003 Mar;51(3):314-22. PubMed PMID: 12588574.
252. Tinetti ME, Speechley M, Ginter SF. Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *N Engl J Med.* 1988 Dec 29;319(26):1701-7. PubMed PMID: 3205267.
253. Zhang F, Ferrucci L, Culham E, Metter EJ, Guralnik J, Deshpande N. Performance on five times sit-to-stand task as a predictor of subsequent falls and disability in older persons. *Journal of aging and health.* 2013 Apr;25(3):478-92. PubMed PMID: 23407343.
254. Podsiadlo D, Richardson S. The timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons. *J Am Geriatr Soc.* 1991 Feb;39(2):142-8. PubMed PMID: 1991946. Epub 1991/02/01. eng.
255. Shumway-Cook A, Brauer S, Woollacott M. Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults using the Timed Up & Go Test. *Phys Ther.* 2000 Sep;80(9):896-903. PubMed PMID: 10960937.
256. Gross MM, Stevenson PJ, Charette SL, Pyka G, Marcus R. Effect of muscle strength and movement speed on the biomechanics of rising from a chair in healthy elderly and young women. *Gait Posture.* 1998 Dec 1;8(3):175-85. PubMed PMID: 10200407.
257. Acevedo EO. *The Oxford handbook of exercise psychology.* New York: Oxford University Press; 2012. xiv, 523 p. p.
258. Laurin D, Verreault R, Lindsay J, MacPherson K, Rockwood K. Physical activity and risk of cognitive impairment and dementia in elderly persons. *Archives of neurology.* 2001 Mar;58(3):498-504. PubMed PMID: 11255456.

259. Liu-Ambrose T, Donaldson MG. Exercise and cognition in older adults: is there a role for resistance training programmes? *Br J Sports Med.* 2009 Jan;43(1):25-7. PubMed PMID: 19019904. Epub 2008/11/21. eng.
260. Ozkaya GY, Aydin H, Toraman FN, Kizilay F, Ozdemir O, Cetinkaya V. Effect of strength and endurance training on cognition in older people. *Journal of Sports Science and Medicine.* 2005 Sep;4(3):300-13. PubMed PMID: ISI:000231570600012. English.
261. Voelcker-Rehage C, Godde B, Staudinger UM. Physical and motor fitness are both related to cognition in old age. *Eur J Neurosci.* 2010 Jan;31(1):167-76. PubMed PMID: 20092563.
262. Liu-Ambrose T, Nagamatsu LS, Hsu CL, Bolandzadeh N. Emerging concept: 'central benefit model' of exercise in falls prevention. *Br J Sports Med.* 2013 Jan;47(2):115-7. PubMed PMID: 22522589.
263. Buysse DJ, Reynolds CF, 3rd, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry research.* 1989 May;28(2):193-213. PubMed PMID: 2748771.
264. Cayrou S, Dickes P, Dolbeault S, Gauvain-Piquard A, Desclaux B. French validation of the profile of mood states (POMS). *Psycho-Oncol.* 2000 Sep-Oct;9(5):S52-S. PubMed PMID: WOS:000089846700207. English.
265. Berryman N, Gayda M, Nigam A, Juneau M, Bherer L, Bosquet L. Comparison of the metabolic energy cost of overground and treadmill walking in older adults. *Eur J Appl Physiol.* 2012 May;112(5):1613-20. PubMed PMID: 21863296. Epub 2011/08/25. eng.
266. Bohannon RW. Reference values for the timed up and go test: a descriptive meta-analysis. *Journal of geriatric physical therapy.* 2006;29(2):64-8. PubMed PMID: 16914068.
267. Milot MH, Nadeau S, Gravel D. Muscular utilization of the plantarflexors, hip flexors and extensors in persons with hemiparesis walking at self-selected and maximal speeds. *J Electromyogr Kinesiol.* 2007 Apr;17(2):184-93. PubMed PMID: 16516495.
268. Nana A, Slater GJ, Hopkins WG, Burke LM. Effects of exercise sessions on DXA measurements of body composition in active people. *Med Sci Sports Exerc.* 2013 Jan;45(1):178-85. PubMed PMID: 22895377.
269. Dupuy O, Lussier M, Fraser S, Bherer L, Audiffren M, Bosquet L. Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports.* 2012 Apr 27. PubMed PMID: 22537000.
270. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1988. 1-567 p.
271. Munro B. *Statistical methods for health care research.* Third edition. New York: Lippincott; 1997. 1-444 p.
272. Liu-Ambrose T, Donaldson MG, Ahamed Y, Graf P, Cook WL, Close J, et al. Otago home-based strength and balance retraining improves executive functioning in older fallers: a randomized controlled trial. *J Am Geriatr Soc.* 2008 Oct;56(10):1821-30. PubMed PMID: 18795987. Epub 2008/09/18. eng.
273. Fleg JL, Morrell CH, Bos AG, Brant LJ, Talbot LA, Wright JG, et al. Accelerated longitudinal decline of aerobic capacity in healthy older adults. *Circulation.* 2005 Aug 2;112(5):674-82. PubMed PMID: 16043637.
274. Skelton DA, Kennedy J, Rutherford OM. Explosive power and asymmetry in leg muscle function in frequent fallers and non-fallers aged over 65. *Age Ageing.* 2002 Mar;31(2):119-25. PubMed PMID: 11937474.

275. Buatois S, Miljkovic D, Manckoundia P, Gueguen R, Miget P, Vancon G, et al. Five times sit to stand test is a predictor of recurrent falls in healthy community-living subjects aged 65 and older. *J Am Geriatr Soc.* 2008 Aug;56(8):1575-7. PubMed PMID: 18808608.
276. Dehail P, Bestaven E, Muller F, Mallet A, Robert B, Bourdel-Marchasson I, et al. Kinematic and electromyographic analysis of rising from a chair during a "Sit-to-Walk" task in elderly subjects: role of strength. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2007 Dec;22(10):1096-103. PubMed PMID: 17897758.
277. Judge JO, Davis RB, 3rd, Ounpuu S. Step length reductions in advanced age: the role of ankle and hip kinetics. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 1996 Nov;51(6):M303-12. PubMed PMID: 8914503.
278. Sunde A, Storen O, Bjerkaas M, Larsen MH, Hoff J, Helgerud J. Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *J Strength Cond Res.* 2010 Aug;24(8):2157-65. PubMed PMID: 19855311.
279. Hillman CH, Erickson KI, Kramer AF. Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nat Rev Neurosci.* 2008 Jan;9(1):58-65. PubMed PMID: 18094706.
280. Renaud M, Maquestiaux F, Joncas S, Kergoat MJ, Bherer L. The effect of three months of aerobic training on response preparation in older adults. *Frontiers in aging neuroscience.* 2010;2:148. PubMed PMID: 21151355. Pubmed Central PMCID: 2991190.
281. 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. *Journal of aging research.* 2013;2013:657508. PubMed PMID: 24102028. Pubmed Central PMCID: 3786463.
282. Langlois F, Vu TT, Chasse K, Dupuis G, Kergoat MJ, Bherer L. Benefits of Physical Exercise Training on Cognition and Quality of Life in Frail Older Adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci.* 2012 Aug 28. PubMed PMID: 22929394.
283. Berryman N, Bherer L, Nadeau S, Lauziere S, Lehr L, Bobeuf F, et al. Executive functions, physical fitness and mobility in well-functioning older adults. *Experimental gerontology.* 2013 Sep 5. PubMed PMID: 24012563.
284. Matta Mello Portugal E, Cevada T, Sobral Monteiro-Junior R, Teixeira Guimaraes T, da Cruz Rubini E, Lattari E, et al. Neuroscience of exercise: from neurobiology mechanisms to mental health. *Neuropsychobiology.* 2013;68(1):1-14. PubMed PMID: 23774826.
285. Labelle V, Bosquet L, Mekary S, Bherer L. Decline in executive control during acute bouts of exercise as a function of exercise intensity and fitness level. *Brain Cogn.* 2013 Feb;81(1):10-7. PubMed PMID: 23146780.
286. Folstein MF, Folstein SE, McHugh PR. "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of psychiatric research.* 1975 Nov;12(3):189-98. PubMed PMID: 1202204.
287. Audiffren M, Tomporowski PD, Zagrodnik J. Acute aerobic exercise and information processing: modulation of executive control in a Random Number Generation task. *Acta Psychol (Amst).* 2009 Sep;132(1):85-95. PubMed PMID: 19632661. Epub 2009/07/28. eng.
288. Towse JN, Neil D. Analyzing human random generation behavior: A review of methods used and a computer program for describing performance. *Behav Res Methods Instr Comput.* 1998 Nov;30(4):583-91. PubMed PMID: WOS:000077781200004. English.
289. Abizanda P, Navarro JL, Garcia-Tomas MI, Lopez-Jimenez E, Martinez-Sanchez E, Paterna G. Validity and usefulness of hand-held dynamometry for measuring muscle strength in community-dwelling older persons. *Arch Gerontol Geriatr.* 2012 Jan;54(1):21-7. PubMed PMID: 21371760. Epub 2011/03/05. eng.

290. Jones CJ, Rikli RE, Beam WC. A 30-s chair-stand test as a measure of lower body strength in community-residing older adults. *Res Q Exerc Sport*. 1999 Jun;70(2):113-9. PubMed PMID: 10380242.
291. ACSM. American College of Sports Medicine Position Stand. Exercise and physical activity for older adults. *Med Sci Sports Exerc*. 1998 Jun;30(6):992-1008. PubMed PMID: 9624662. Epub 1998/06/13. eng.
292. Erickson KI, Voss MW, Prakash RS, Basak C, Szabo A, Chaddock L, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011 Feb 15;108(7):3017-22. PubMed PMID: 21282661. Pubmed Central PMCID: 3041121.
293. 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. PubMed PMID: 23110433. Pubmed Central PMCID: 3498517.
294. Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization. *Mov Disord*. 2012 May;27(6):765-70. PubMed PMID: 22419512.
295. Towse JN, Valentine JD. Random generation of numbers: A search for underlying processes. *European Journal of Cognitive Psychology*. 1997 Dec;9(4):381-400. PubMed PMID: WOS:000071228100002.
296. Jahanshahi M, Saleem T, Ho AK, Dirnberger G, Fuller R. Random number generation as an index of controlled processing. *Neuropsychology*. 2006 Jul;20(4):391-9. PubMed PMID: 16846257.
297. Baker LD, Frank LL, Foster-Schubert K, Green PS, Wilkinson CW, McTiernan A, et al. Effects of aerobic exercise on mild cognitive impairment: a controlled trial. *Archives of neurology*. 2010 Jan;67(1):71-9. PubMed PMID: 20065132. Pubmed Central PMCID: 3056436.
298. Silva NL, Oliveira RB, Fleck SJ, Leon AC, Farinatti P. Influence of strength training variables on strength gains in adults over 55 years-old: A meta-analysis of dose-response relationships. *J Sci Med Sport*. 2013 Jun 24. PubMed PMID: 23806877.