Effet du vieillissement sur les facteurs de la performance en triathlon

Frédéric Sultana

▶ **To cite this version:**

Frédéric Sultana. Effet du vieillissement sur les facteurs de la performance en triathlon. Education. Université de Toulon, 2011. Français. NNT : 2011TOUL0013 . tel-00912327

HAL Id: tel-00912327
https://theses.hal.science/tel-00912327

Submitted on 2 Dec 2013

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

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

Ecole doctorale « Sciences du Mouvement Humain »

Laboratoire Handibio

THÈSE présentée par :

Frédéric Sultana

Soutenue le 5 décembre 2011

pour obtenir le grade de Docteur en *Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives*

Spécialité : Sciences de la vie et de la santé

EFFET DU VIEILLISSEMENT SUR LES FACTEURS DE LA PERFORMANCE EN TRIATHLON

Devant le jury composé de :

M S. Berthoin (Rapporteur)	*Professeur*	Université de Lille 2
M L. Bosquet (Rapporteur)	*Professeur*	Université de Poitiers
M P. Gorce (Examinateur)	*Professeur*	Université du Sud Toulon-Var
M R. Lepers (Examinateur)	*MCU, HDR*	Université de Bourgogne
M F. Bignet (Examinateur)	*DTN*	Fédération Française de Triathlon
M J. Brisswalter (Directeur)	*Professeur*	Université de Nice-Sophia Antipolis
M T. Bernard (Co-directeur)	*MCU, HDR*	Université du Sud Toulon-Var

Citation

« *Les graines d'un vieillissement en bonne santé se sèment tôt* ».

Kofi Annan

Extrait d'un discours à l'Assemblée mondiale sur le vieillissement - 27 septembre 2001

Remerciements

Je désire exprimer ma profonde gratitude à monsieur le Professeur Jeanick Brisswalter pour sa disponibilité et ses précieux conseils. Tu as accepté mon approche parfois intuitive tout en me guidant avec beaucoup de flexibilité. Tu m'as aussi m'encouragé aux moments cruciaux.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à monsieur Thierry Bernard pour son amitié et son soutien. Faire rentrer dans le moule universitaire un *Master* ingénieur raide et rude était un vrai challenge.

Je remercie les Professeurs Serge Berthoin et Laurent Bosquet qui ont accepté d'établir les rapports de cette thèse ainsi que messieurs Romuald Lepers et Frank Bignet qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie très sincèrement monsieur le Professeur Philippe Gorce pour m'avoir accepté dans le laboratoire Handibio et faire partie de mon jury de thèse.

Je souhaite remercier aussi les personnes qui ont donné de leur temps en acceptant d'être sujets dans ces expérimentations. Merci Julien pour ton aide et ton amitié pendant ce parcours souvent solitaire.

Un grand merci à mes enfants Paul, Cécile, Philippe, Marion et Jean-Charles, pour avoir partagé mes joies et les moments plus difficiles. Un autre merci aux membres de ma famille et à Marie-Pierre pour m'avoir soutenu inconditionnellement.

Sommaire

Introduction générale 2

Chapitre I. Cadre théorique 5

I.1 Le Master athlète d'endurance 5

I.1.A Définition 5

I.1.B Les facteurs de la performance en endurance. 6

I.1.C Les facteurs de la performance en natation. 7

I.1.D Les facteurs de la performance en cyclisme. 9

I.1.E Les facteurs de la performance en course à pied. 12

I.1.F Les facteurs de la performance en triathlon. 17

I.1.G Synthèse 20

I.2 Effet du vieillissement sur la performance 21

I.2.A Généralités 21

I.2.B Déclin des performances en natation. 21

I.2.C Déclin des performances en cyclisme. 22

I.2.D Déclin des performances en course à pied. 23

I.2.E Modélisation du déclin des performances 24

I.2.F Synthèse 25

I.3 Performance musculaire et vieillissement 26

I.3.A Définition 26

I.3.B Effet du vieillissement sur la structure du muscle 26

I.3.C Effet du vieillissement sur la *contractibilité* du muscle 29

I.3.D Effet du vieillissement sur la capacité oxydative du muscle 32

I.3.E Effet du vieillissement sur les performances musculaires 33

I.3.F Effet de l'entraînement 37

I.3.G Synthèse 41

I.4 Puissance maximale aérobie et vieillissement 42
I.4.A Définition 42
I.4.B Evolution des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ chez le *Master* athlète d'endurance 42
I.4.C *Master* athlète d'endurance et facteurs limitant de $\dot{V}O_{2max}$ 48
I.4.D Synthèse 59
I.5 Endurance aérobie et vieillissement 60
I.5.A Définition 60
I.5.B Détermination de l'endurance aérobie 60
I.5.C Notion de seuils 61
I.5.D Effet du vieillissement sur l'endurance aérobie 63
I.5.E Synthèse 64
I.6 Coût énergétique de la locomotion et vieillissement 65
I.6.A Notion de coût énergétique 65
I.6.B Effet du vieillissement sur le métabolisme de repos 69
I.6.C Effet du vieillissement sur l'efficience de la locomotion en triathlon 70
I.6.D Effet de l'entraînement sur l'efficience énergétique 73
I.6.E Synthèse 75
Chapitre II. Matériels et méthodes 77
II.1 Problématiques, hypothèses de travail et arbre de recherches 77
II.1.A Introduction 77
II.1.B Un travail expérimental en trois parties 77
II.1.C Arbre de recherches du travail expérimental 79
II.2 Etude 1 : Effet de l'âge sur les performances en triathlon 80
II.2.A Recueil des données 80
II.2.B Méthode de calcul et de modélisation du déclin des performances 80
II.3 Etude 2 : Modèle du « *Master* triathlète » 81

II.3.A Caractérisation générale des sujets 81
II.3.B Mesures des performances musculaires 82
II.3.C Mesures de la puissance maximale aérobie 84
II.3.D Détermination de l'endurance aérobie 86
II.3.E Mesures de la réponse cardiaque pendant un triathlon 86
II.4 Etude 3 : Effet de l'âge sur l'efficience énergétique 87
II.4.A Procédure expérimentale 87
II.4.B Détermination du rendement énergétique du pédalage 88
Chapitre III. Travail expérimental 91
III.1 Etude 1 : Effet de l'âge sur les performances en triathlon 91
III.1.A Effet de l'âge et du sexe sur les performances en triathlon distance olympique 91
III.1.B Synthèse 98
III.1.C Déclin de la performance avec l'âge sur triathlon distance olympique : Effet du mode de locomotion 99
III.1.D Synthèse 115
III.1.E Déclin des performances avec l'âge sur triathlon *Ironman* 117
III.1.F Synthèse 124
III.2 Etude 2 : Modèle du « *Master* triathlète » 126
III.2.A Réponse cardio-ventilatoire et musculaire avant et après un triathlon 126
III.2.B Synthèse 135
III.3 Etude 3 : Effet de l'âge sur l'efficience énergétique 137
III.3.A Effet de l'âge sur le rendement énergétique du pédalage chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés 137
III.3.B Synthèse 158
Chapitre IV. Conclusion générale et perspectives 160
Bibliographie 166
Annexe I : Questionnaire « Mode de vie – Santé – Pratique sportive – Posture vélo » 182

Annexe II : Mesures anthropométriques.....186

Publications personnelles.....192

Introduction Générale

Introduction générale

Le développement de la médecine moderne au début du XXème siècle a permis une avancée considérable de la connaissance du vivant, marquant le début d'une période d'accroissement rapide de l'espérance de vie humaine. Toutefois, le prolongement de la vie présente peu d'intérêt si la qualité de vie de la personne vieillissante se dégrade. La finalité des recherches sur la sénescence ne se réduit donc pas au prolongement de la durée de vie, mais également et surtout au maintien, voire à l'amélioration des qualités d'existence. En France, l'espérance de vie s'allonge significativement au rythme d'un trimestre par an et dépasse désormais 80 ans. Nous sommes actuellement en pleine transition démographique : plus de 10 millions de personnes, dans notre pays, ont plus de 65 ans, ce qui représente 16% de la population, et probablement 28% dans 40 ans. Nous comptons, parmi nos concitoyens, un nombre croissant de centenaires, aujourd'hui 20.000 et 60.000 prévus en 2050. Ainsi notre population vieillit de plus en plus (source INSEE : projection de population 2005 – 2050. http://www.insse.fr).

Le vieillissement correspond à l'ensemble des processus physiologiques et psychologiques qui modifient la structure et les fonctions de l'organisme à partir de la naissance. Il est la résultante des effets combinés de facteurs génétiques (vieillissement intrinsèque) et de facteurs environnementaux auxquels est soumis l'organisme tout au long de sa vie. Il s'agit d'un processus lent et progressif qui doit être distingué des manifestations des maladies. L'état de santé d'une personne âgée résulte habituellement des effets du vieillissement et des effets additifs de maladies passées (séquelles), actuelles, chroniques ou aiguës.

Une bonne connaissance du vieillissement normal est indispensable afin de distinguer les effets du vieillissement de ceux des maladies. Le processus de vieillissement est complexe et multifactoriel. Les progrès de la recherche ont permis de reconnaître le rôle important des facteurs génétiques, des altérations du fonctionnement cellulaire ou encore le rôle des modifications du métabolisme des protéines. L'ensemble de ces constats justifie pleinement le besoin de mieux comprendre les effets d'une pratique sportive intense et du vieillissement. Un petit nombre d'individus âgés parviennent à conserver tout au long de leur vie des capacités physiques hors du commun, parfois jusqu'à l'âge de 80 ou 90 ans. Ces *Masters* athlètes, comme les appellent les Anglo-Saxons, ne réalisent évidemment plus les performances qui

étaient les leurs à 20 ans, mais leurs capacités physiques dépassent souvent largement celles d'une grande partie des jeunes adultes. Les *Masters* athlètes s'entraînent régulièrement en volume et intensité et participent à des compétitions sportives avec un objectif de performance. Les *Masters* athlètes ont parfois repris l'entraînement physique après des périodes plus ou moins longues d'inactivité physique. Ils constituent un modèle intéressant pour étudier les effets concomitants du vieillissement avec un entraînement intense et régulier (Tanaka et Seals 2003). L'étude du *Master* athlète pratiquant de manière intensive une activité physique permet aussi de s'affranchir en partie des problèmes de santé pour se consacrer aux effets du vieillissement.

Une meilleure compréhension des interactions entre l'âge et les phénomènes d'adaptation à l'entraînement pourrait servir de support de motivation pour la lutte contre la sédentarité dans notre pratique quotidienne et permettre d'envisager des stratégies susceptibles de prévenir certains effets du vieillissement. Les *Masters* athlètes refusent d'abandonner leur sport de compétition et se tournent vers de nouveaux défis sportifs à un âge avancé comme le marathon (Trappe 2007; Lepers et Cattagni 2011). Cette tendance concerne surtout les sports d'endurance et se traduit par une augmentation rapide au cours des 30 dernières années du nombre de *Masters* à des compétitions d'endurance telles que la course à pied, le cyclisme ou le triathlon (Jokl et al. 2004; Bernard et al. 2010). Le *Master* athlète d'endurance est un «modèle de vieillissement réussi» (Hawkins et Wiswell 2003). Avec le développement de la pratique du triathlon, le *Master* triathlète devient un nouveau « modèle de vieillissement » qui n'a pas encore été étudié à notre connaissance. Utilisant trois modes de locomotion, sa stratégie d'entraînement combine aujourd'hui de manière intuitive les stratégies du *Master* nageur, du *Master* cycliste et du *Master* coureur.

Chapitre I

Chapitre I. Cadre théorique

I.1 Le *Master* athlète d'endurance

I.1.A **Définition**

Les *Masters* athlètes sont des sportifs de plus de 40 ans qui s'entraînent régulièrement en volume et intensité afin de participer à des compétitions sportives avec un objectif de performance. Les *Masters* athlètes peuvent aussi parfois avoir repris l'entraînement physique après des périodes plus ou moins longues d'inactivité physique. Ces sujets constituent un modèle intéressant pour étudier les effets concomitants du vieillissement associé à un entraînement régulier et intense sur les performances et les paramètres physiologiques (Tanaka et Seals 2003).

Chaque fédération nationale ou internationale détermine l'âge à partir duquel on devient *Master* athlète. En général, il est fonction de l'âge pour lequel les meilleures performances dans la discipline sont établies. Par exemple, la catégorie «*Master*» débute à 25 ans en natation, à 35 ans en cyclisme, à 40 ans en athlétisme et à 50 ans pour le golf.

Les *Masters* athlètes pratiquent donc leur activité dans la durée. Le plaisir, la santé, la remise en forme, le lien social ou la compétition sont les principaux facteurs de motivation de cette population de sportifs (Shaw et Ostrow 2005). Les hommes semblent plus orientés vers la performance et l'accomplissement, et les femmes davantage axées sur la santé, le lien social et le bien être (Kolt et al. 2004; Hodge et al. 2008).

Le *Master* athlète d'endurance a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Le modèle du *Master* coureur à pied est le plus étudié. A notre connaissance, il n'existe pas encore d'étude traitant du *Master* triathlète qui pratique une activité qui combine trois modes de locomotion. Le modèle utilisé pour notre travail sera le *Master* triathlète: âgé de plus de 40 ans, très entraîné, expérimenté et performant. Des modèles scientifiques de facteurs de la performance existent mais aucun modèle prenant en compte la spécificité des mécanismes de production d'une performance n'apparaît pour le *Master* triathlète.

I.1.B **Les facteurs de la performance en endurance.**

La puissance maximale aérobie (ou $\dot{V}O_{2max}$), la capacité aérobie et l'économie de la locomotion sont considérées comme les indices les mieux appropriés à la prédiction de la performance en endurance si on considère que les facteurs cardiorespiratoires et énergétiques peuvent expliquer, à eux seuls, le niveau de performance d'un individu (di Prampero 1981, 1986; Coyle 1995; Bassett et Howley 1997, 2000). di Prampero (1986) est l'un des premiers à proposer un modèle de prédiction de la vitesse de course de l'athlète (V) en fonction de son $\dot{V}O_{2max}$, de la fraction utilisée de $\dot{V}O_{2max}$ (F) et de son économie de la locomotion (C):

$$V = \frac{F \,.\, \dot{V}O_{2max}}{C}$$

Récemment, Tanaka et Seals (1997, 2003, 2008), Reaburn et Dascombe (2008), Peiffer et al. (2008) ont repris et adapté ce modèle pour étudier le *Master* athlète d'endurance. Tanaka et Seals (2008) ont développé et adapté le générique des facteurs de la performance en incorporant les effets de l'âge et en notant l'importance du volume et de l'intensité de l'entraînement (Figure 1).

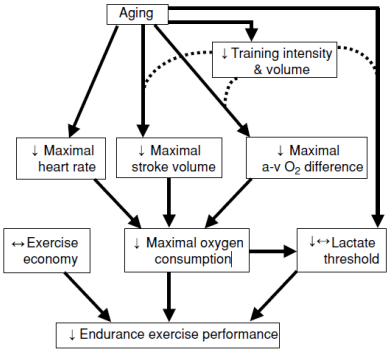


Figure 1 : Facteurs et mécanismes physiologiques contribuant au déclin des performances avec le vieillissement chez des sujets en bonne santé (Tanaka et Seals 2008).

Si ce modèle semble applicable en général, les facteurs de la performance sont spécifiques à chaque mode de locomotion du triathlon. Les mécanismes physiologiques et biomécaniques diffèrent selon que l'on se déplace sur terre ou dans l'eau, en courant ou en pédalant. Ces facteurs renvoient à la quantité d'énergie dont dispose un individu à l'effort et à sa capacité à transformer cette énergie en fonction du type de déplacement. S'agissant du triathlon, il convient non seulement de définir les facteurs de la performance pris isolément pour chaque mode de locomotion mais également les facteurs spécifiques à l'enchaînement des trois disciplines.

I.1.C **Les facteurs de la performance en natation.**

L'influence du milieu est primordiale dans l'analyse des facteurs physiologiques de la performance en natation. L'immersion en position horizontale et le déplacement en milieu aquatique caractérisent les principales spécificités de cette activité. Par ailleurs, la natation sollicite l'ensemble des ressources musculaires (membres supérieurs et inférieurs). La puissance propulsive des membres dépend de la technique de nage utilisée. Pour le crawl, la puissance propulsive est fournie par les membres supérieurs avec une contribution des membres inférieurs. Divers auteurs ont étudié les facteurs de la performance et les contraintes spécifiques de la natation (Cazorla et al. 1982; Léone et al. 1987; Poujade et al. 2002; Ratel et Poujade 2009). Léone et al. (1987) montrent que la performance en natation est étroitement liée à la filière aérobie. Plus spécifiquement chez le nageur adulte, la performance sur 400 m crawl est corrélée avec la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ (Costill et al. 1985; Lavoie et Montpetit 1986). Cependant, la capacité de l'individu à transformer cette puissance métabolique en vitesse de nage est un deuxième facteur déterminant. C'est pourquoi, au cours des 30 dernières années, de nombreuses études ont porté sur le coût énergétique de la nage (C_n) (Costill et al. 1985; di Prampero 1986 ; Chatard et al. 1990). Les résultats montrent que la performance est liée au coût énergétique du nageur (Chatard et al. 1990), fortement influencé par la technique de nage (Zamparo et al. 2000a; Zamparo et al. 2000b) et par les caractéristiques morphologiques (Chatard et al. 1990; Zamparo et al. 1996). C_n est calculé d'après l'expression élaborée par di Prampero (1986) :

$$C_n = \frac{\dot{V}O_2}{V}$$

C_n : coût énergétique en $mlO_2.m^{-1}$;

$\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène brute en $mlO_2.min^{-1}$;

V : vitesse de nage en $m.min^{-1}$.

Bien que la dépense énergétique en natation dépende de la taille du corps et de sa flottabilité, c'est l'efficacité de l'application de la force contre l'eau qui est le principal facteur déterminant du coût énergétique du déplacement. La figure 2 montre la différence des besoins en oxygène entre un groupe entraîné de nageurs de compétition masculins et féminins et un groupe de triathlètes très entraînés (Costill et al. 1994). Bien que les triathlètes s'entraînent tous les jours en natation, aucun d'entre eux dans cette étude n'était issu de la natation de

compétition. Plusieurs de ces triathlètes possédaient des qualités aérobies nettement supérieures aux nageurs de compétition.

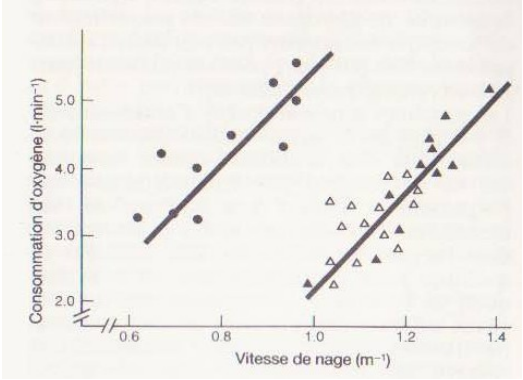


Figure 2 : Consommation d'oxygène de triathlètes masculins (●) et de nageurs de compétition (masculins ▲; féminins Δ). (Costill et al. 1994).

La majeure partie du coût énergétique en natation est liée à l'énergie utilisée pour vaincre les résistances mécaniques externes à l'avancement :

- Les résistances hydrodynamiques (Rx) ;
- La traînée de pression ;
- La traînée de frottement.

La résultante des résistances hydrodynamiques Rx s'oppose au déplacement d'un corps dans un fluide et augmente avec le carré de la vitesse.

$$Rx = 0,5.S.Cx.\rho.V^2$$

où

S (m^2) est la surface frontale,

Cx (sans unité) est le coefficient de forme. Cx dépend de la morphologie du nageur et de sa position dans l'eau,

ρ la masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$).

La traînée réside dans la différence de pression qui règne entre l'avant et l'arrière du corps en déplacement. En natation, la traînée résulte des résistances tourbillonnaires (ou de remous) liées à la zone de dépression à l'arrière du corps et des résistances frontales. Toutefois ces résistances sont très difficilement quantifiables séparément. De plus, les «résistances actives», s'opposant au déplacement d'un nageur en mouvement sont distinguées des «résistances

passives» mesurées sur un nageur tracté passivement au moyen d'un câble. Ces résistances de pression représentent un bon indicateur de l'aptitude à glisser (Chatard et al. 1990).

La traînée de frottement est générée par les résistances de frottement des molécules du fluide directement sur la surface du corps en mouvement. Ces résistances augmentent en fonction de la taille et du type d'aspérités de la surface du corps. Pour réduire ces résistances de frottement, les nageurs de compétition se rasent le corps et/ou utilisent de plus en plus des combinaisons réalisées avec de nouveaux textiles.

Synthèse

La performance en natation est davantage limitée par l'habilité technique que par la valeur de $\dot{V}O_{2max}$. L'optimisation de la performance consiste tant à diminuer les résistances mécaniques (afin de réduire le Cn) qu'à générer une puissance propulsive (essentiellement avec les bras pour le crawl) comme peut en rendre compte l'équation de di Prampero (1986).

$$V = \frac{Puissance\ propulsive}{Cn}$$

I.1.D **Les facteurs de la performance en cyclisme.**

Pour se déplacer, le cycliste doit générer une puissance mécanique ($P_{méca}$) afin de fournir l'énergie nécessaire à son avancement (Duc 2005; Grappe 2009). Il doit donc créer au niveau du pédalier un couple de pédalage (C_p), à partir des moments articulaires de la hanche, du genou et de la cheville. Le C_p est le produit de la force efficace (F_E) et de la longueur de la manivelle (L_m):

$$C_p = F_E \,.\, L_m$$

Avec

F_E : force (efficace, c'est-à-dire la composante de la force totale appliquée perpendiculairement à la manivelle) ;

L_m : longueur de la manivelle.

L'intensité du C_p dépend donc, à chaque instant du cycle de pédalage, de l'intensité de la force efficace (F_E), c'est à dire de la composante de la force totale (F) appliquée perpendiculairement à la manivelle. La force inutile (F_I) correspond à la composante de F appliquée parallèlement à la manivelle (Figure 3).

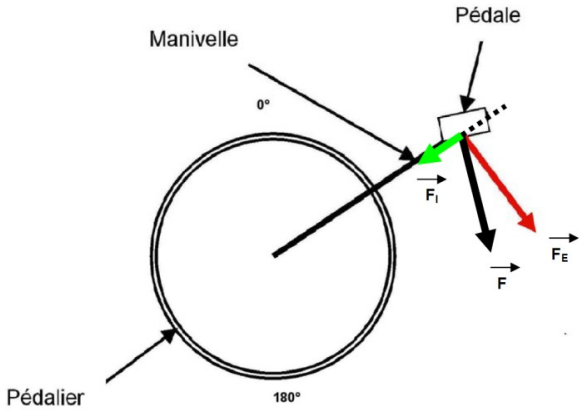


Figure 3: Force totale (F, en noir), force efficace (F_E, en rouge) et force inutile (F_I, en vert) appliquée sur la pédale.

La puissance mécanique développée ($P_{méca}$) est donnée par l'équation :

$P_{méca} = Cp \cdot \omega$

Avec :

Cp = couple de pédalage = F . L ;

ω = vitesse angulaire du pédalier = 2 . π . f / 60 (où f est la fréquence de pédalage).

Les moments articulaires du cycliste vont s'opposer aux moments de forces créés par les différentes résistances (paramètres externes), avec pour objectif final de les surpasser pour générer le mouvement. Pour se déplacer, le cycliste doit vaincre les différentes résistances externes à son avancement : la résistance de l'air (R_a), la force de gravité (R_g), la résistance au roulement (R_r) et l'inertie si sa vitesse de déplacement n'est pas constante.

$$P_{méca} = V_d [(½ \cdot \rho \cdot SC_x (V_d + V_v)^2 + (m \cdot g \cdot \sin \alpha) + (C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha)]$$

R_a R_g R_r

Avec

L_m : longueur de la manivelle (m)

ρ : masse volumique de l'air ($kg.m^{-3}$). (ρ = 1,293 $kg.m^{-3}$ à une pression atmosphérique de 760 mmHg et une température de 273 °K)

SC_x : surface frontale effective du cycliste et du vélo (m^2). Déterminé expérimentalement en soufflerie, de l'ordre de 0,9.

V_v : composante de la vitesse du vent dans la direction et le sens du déplacement ($m.s^{-1}$)

V_d : vitesse de déplacement du cycliste ($m.s^{-1}$)

m : masse du cycliste et du vélo (kg)

g : gravité (9,81 $m.s^{-2}$)

α : inclinaison de la route par rapport à l'horizontale (en degré)

C_r : coefficient de roulement (valeur moyenne sur asphalte pour un vélo de compétition 0,004)

La résistance de l'air (R_a) résulte des résistances aérodynamiques à l'avancement. Les résistances aérodynamiques représentent 90% des résistances totales à des vitesses supérieures à 40 $km.h^{-1}$ (Kyle 1994). Les éléments permettant par ordre de grandeur décroissant de diminuer les résistances aérodynamiques sont (McCole et al. 1990; Hagberg et McCole 1996):

1) la position du coureur ;

2) la forme de la bicyclette, en particulier le type et le diamètre de la roue avant ;

3) les vêtements moulants et le type de textile ;

4) le casque ;

5) l'utilisation de matériel aérodynamique, comme des bidons profilés.

Il existe ainsi de nombreuses possibilités pour réduire ces résistances aérodynamiques. Par exemple, l'utilisation de roues profilées peut s'accompagner d'une réduction de la dépense énergétique allant jusqu'à ~ 8% (Hagberg et McCole 1996).

La force de gravité (R_g) est résistive en montée et propulsive en descente.

La résistance au roulement (R_r) résulte des frottements et frictions internes à la bicyclette, et frottements dus au contact pneus/route : $Rr = C_r . m . g . \cos \alpha$

La fraction de l'énergie dépensée pour vaincre les résistances autres qu'aérodynamiques est la plus faible en cyclisme, par rapport aux autres modes de locomotion terrestre (Di Prampero 1986).

Synthèse

Outre les déterminants de la performance d'endurance communs aux divers modes de locomotion, le cyclisme se caractérise par la spécificité du mouvement de pédalage qui consiste à la production d'une puissance mécanique et par l'importance des résistances aérodynamiques sur les résistances à l'avancement. Ces dernières altèrent le coût énergétique du déplacement, qui constitue un facteur de performance dans les épreuves de longue durée. A des vitesses supérieures à 40 km.h^{-1}, les résistances aérodynamiques représentent 90% des résistances totales à l'avancement.

I.1.E **Les facteurs de la performance en course à pied.**

La course à pied constitue pour l'homme le moyen naturel le plus rapide pour se déplacer par une succession de foulées bondissantes à partir d'appuis pédestres effectués alternativement sur chaque pied. Elle est caractérisée par une projection aérienne du corps en translation, consécutive à chacune des phases d'appui, et ne comporte donc pas de phase de double appui (comme la marche). Malgré son caractère éminemment naturel, ce type de déplacement fait toujours l'objet de nombreux travaux de recherche nécessitant des techniques d'observation et de mesure de plus en plus perfectionnées. La course reste d'autre part un enjeu scientifique dans les trois aspects suivants : la coordination gestuelle qu'elle impose, l'optimisation de la dépense énergétique occasionnée et très récemment les problèmes de traumatologie liés à une pratique intensive sportive et de loisirs.

La foulée est le bond compris entre deux contacts successifs avec le sol. Elle se compose d'une phase d'appui et d'une phase de suspension (Figure 4).

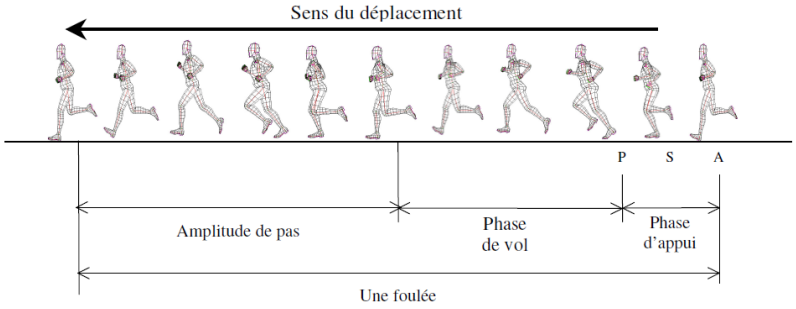


Figure 4 : Représentation d'une foulée, décomposée en deux pas. Un pas est constitué d'une phase de vol et d'une phase d'appui. La phase d'appui comprend une phase d'amortissement (A), une phase de soutien (S) et une phase de propulsion (P) (adaptée de Slawinski 2003).

La phase d'appui correspond au moment ou le pied du coureur est en contact avec le sol. Selon cette approche, cette phase se divise en trois moments successifs (Figure 4). D'un point de vue purement mécanique, l'amortissement débute à l'instant où le pied entre en contact avec le sol et se termine au moment où la projection verticale du centre de gravité coïncide avec la verticale de l'appui. Pendant la durée de cette phase la force de réaction exercée sur l'athlète est orientée dans le sens inverse de son déplacement.

Le soutien correspond au moment où le centre de gravité est à l'aplomb de l'appui au sol. La poussée commence au moment du soutien et se termine au moment où le pied quitte le sol. La composante des forces exercées par le coureur sur le sol est orientée dans le sens de son déplacement.

La suspension est le résultat objectif des efforts produits lors de la phase d'appui qui l'a précédée. Elle permet au coureur de réaliser des ajustements segmentaires favorisant le maintien de son équilibre et la préparation des actions motrices à venir. La suspension commence au moment où le pied de poussée quitte le sol et se termine au moment où l'athlète reprend appui. Pendant cette phase aérienne, le coureur n'a aucun point de contact avec le sol. A ce moment, son centre de gravité décrit une trajectoire qu'il ne peut plus modifier. Cette trajectoire est parabolique et se caractérise par une portée (distance entre chaque appui) et par une flèche (hauteur de la trajectoire).

Un point remarquable de la course à pied, concerne la position du pied lorsqu'il entre en contact avec le sol. On distingue deux grandes catégories qui sont les « *midfoot* » et les « *rearfoot* » (Cavanagh et Lafortune 1980). La différence principale entre ces deux catégories est la localisation plantaire de la prise de contact avec le sol. Elle est au niveau des métatarses chez les « *midfoot* », et se centre sur le talon chez les « *rearfoot* ». Ceci génère principalement une différence de la durée de la phase excentrique, qui est supérieure chez les « *rearfoot* », entraînant une augmentation de la production de travail mécanique.

Quel que soit le modèle de calcul utilisé pour évaluer l'énergie mécanique dépensée en course à pied une part de l'énergie mécanique est utilisée pour vaincre la gravité (van Ingen Schenau et Cavanagh 1990). Elle n'est pas locomotrice. Cette composante énergétique dépend des oscillations verticales du centre de gravité ou de profil du parcours (ascendant, descendant, plat). La force gravitaire constitue donc très certainement le facteur majeur influençant l'économie de course et la performance en course à pied. La masse de l'athlète, ses caractéristiques anthropométriques (longueur des segments corporels – positions du centre de

masse des différents segments corporels) et les masses additionnelles supportées (vêtements, ravitaillement,…) constituent un ensemble de facteurs influençant l'économie de course d'un athlète (van Ingen Schenau et Cavanagh 1990).

L'efficacité du cycle étirement-détente permet aussi de réduire le coût énergétique par un emmagasinement d'énergie élastique pouvant être restituée de manière optimale (Cavagna 1977; Komi 1984). En effet, la course à pied peut aussi être décrite comme une série de rebonds au cours desquels les muscles, tendons et ligaments stockent et libèrent alternativement l'énergie absorbée à chaque impact du pied au sol. Une grande partie du travail fourni lors de la foulée provient alors de l'élasticité des muscles et des tendons. Les modèles biomécaniques généralement utilisés pour décrire la locomotion en course à pied assimilent ces différents éléments élastiques (Figure 5) à un unique ressort linéaire (Kerdok et al. 2002).

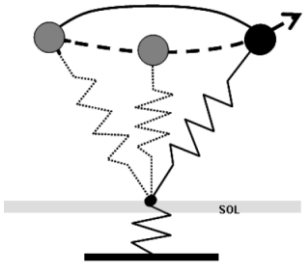


Figure 5 : Modèle de Kerdok et al. (2002) représentant la jambe d'un coureur au contact avec le sol.

Le modèle biomécanique est expliqué sur le plan de la physiologie par le potentiel de stockage de l'énergie élastique des muscles actifs et des attachements tendineux (Thys et al. 1972; Thys 1987). Un stockage passif dans les ligaments articulaires est également théoriquement possible. Chez l'homme l'élasticité du muscle provient d'une part, des filaments de titine entrant dans la composition même des fibres musculaires et agissant dans l'ombre des filaments plus connus d'actine et de myosine ; et d'autre part, des fibres de collagènes situées au niveau des fibres musculaires, des tendons et des ligaments.

La capacité de stockage/restitution d'énergie des muscles extenseurs du genou est d'autant plus importante que l'amplitude de la flexion du genou entre le moment de l'impact au sol et la fin de la phase excentrique est faible (Figure 6 A). Cette plus faible amplitude de flexion au niveau du genou permet également de limiter les oscillations verticales du centre de gravité (i.e. du bassin) dévoreuses d'énergie (Figure 6 B). La raideur de ces fibres peut aussi être modifiée, notamment en fonction de la dureté du sol sur lequel le coureur évolue.

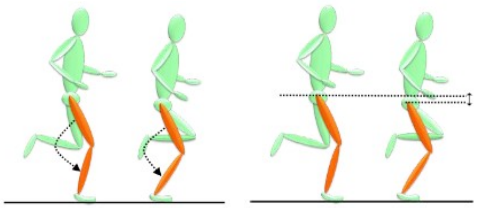


Figure 6 : Capacité de stockage/restitution d'énergie (A : amplitude de la flexion du genou ; B : oscillations verticales du centre de gravité)

Une amélioration du cycle étirement-détente peut donc être envisagée au niveau de la raideur musculaire. Comme pour un ressort ($F = k \times \Delta L$), la raideur du système musculaire k peut être définie comme son aptitude à restituer une tension (F, en N) en fonction de sa déformation élastique (ΔL, en m). Dalleau et al. (1998) ainsi que Heise et Martin (1998) montrent que cette raideur est inversement corrélée au coût énergétique ou à l'économie de course. Un meilleur stockage et une meilleure utilisation de l'énergie élastique, liés à une raideur du « système coureur » plus grande, permettraient de diminuer la demande énergétique. Au sein d'un groupe de coureurs issus de l'élite mondiale, les coureurs les moins souples étaient les plus économiques (donc les plus performants). Les coureurs les moins souples sont ceux qui possèdent les structures musculo-tendineuses les plus raides. La raideur musculaire permettrait de mieux restituer l'énergie élastique emmagasinée. L'économie de course serait liée à l'élasticité musculaire. Des observations suggèrent que le coût en oxygène d'une course à 16 $km.h^{-1}$ soit négativement corrélé à la flexibilité des membres inférieurs, i.e. les coureurs les plus 'raides' sont les plus économiques (Gleim et al. 1990; Craib et al. 1996). Une des explications serait que la raideur musculaire et tendineuse stocke plus facilement l'énergie élastique au cours des phases excentriques des phases d'étirement-contraction et que cette énergie stockée pourrait être libérée au cours des phases concentriques de l'action, ce qui contribuerait à diminuer le coût en oxygène de l'exercice (Heise et Martin 1998). Alternativement, un manque de flexibilité dans le tronc et les hanches peut stabiliser le bassin au cours des phases de position (d'équilibre) et limiter l'utilisation d'une activité musculaire stabilisatrice (Craib et al. 1996).

Ainsi, pour une vitesse de déplacement donnée, la raideur du système musculaire est d'autant plus importante que la fréquence de foulée est élevée. Cette augmentation de raideur diminuerait alors la quantité d'énergie absorbée et non restituée (i.e. "gaspillée") à chaque impact. La capacité de stockage/restitution d'énergie des groupes musculaires impliqués dans la course est proportionnelle au temps de contact au sol. En cherchant à passer le plus rapidement possible d'un appui à l'autre, ce principe serait optimisé (Slawinski et Billat

2004). Les résultats des travaux de Slawinski et Billat (2004) confortent ce principe en présentant par exemple la fréquence et l'amplitude des foulées de 3 groupes d'athlètes aux niveaux d'expertises différents (international, national et débutant). Les auteurs (Tableau 1) montrent que la fréquence de foulée du groupe international est supérieure à celles des autres groupes. Parallèlement, l'amplitude de foulée est inférieure pour le groupe international en comparaison au groupe national.

Niveau d'expertise	International	National	Débutants
Fréquence de foulée (Hz)	3,21 ± 0,22	3,01 ± 0,11 *	2,96 ± 0,21 *
Longueur de foulée (m)	1,52 ± 0,14	1,66 ± 0,08 *	1,58 ± 0,12

Tableau 1 : Fréquence et longueur de foulée (moyenne ± écartype) en fonction du niveau d'expertise d'après Slawinski et Billat (2004)

Les mêmes auteurs montrent également que plus cette fréquence de foulée est élevée, plus faibles sont les oscillations verticales du centre de masse. Le graphique (Figure 7) ci-après met en évidence la relation inverse entre l'augmentation de la fréquence de la foulée et la diminution du coût mécanique potentiel de la course.

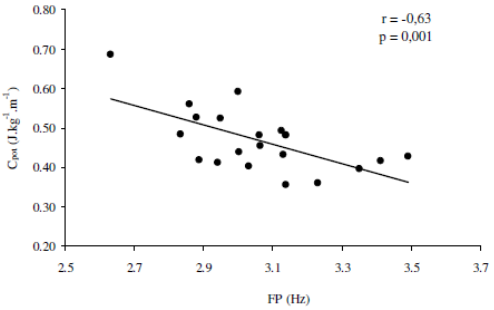


Figure 7 : Influence de la fréquence de foulée sur le coût mécanique potentiel de la course (Slawinski et Billat 2004).

En course à pied, la proportion de CE nécessaire pour lutter contre les résistances aérodynamiques a été évaluée entre 2% (à 16,6 km.h^{-1}) et 7,8% (à 21,6 km.h^{-1}) (Di Prampero 1986), et autour de 7,5% (à 19,5 km.h^{-1}). Pour des vitesses faibles inférieures à 15 km.h^{-1}, les résistances aérodynamiques sont considérées comme négligeables (Pugh 1971).

Synthèse

L'énergie mécanique utilisée pour vaincre la gravité n'est pas locomotrice en course à pied. Le coût énergétique en course à pied dépend donc de la masse et des caractéristiques anthropométriques de l'athlète. Cependant, la capacité de stockage/restitution d'énergie des groupes musculaires impliqués dans la course permet une économie nécessitant une optimisation de l'efficacité du cycle étirement-détente. Pour des vitesses faibles inférieures à 15 km.h^{-1}, les résistances aérodynamiques sont considérées comme négligeables.

I.1.F **Les facteurs de la performance en triathlon.**

Récemment, Hausswirth et Brisswalter (2008) ont analysé les facteurs de la performance pour les épreuves d'endurance utilisant le triathlon comme modèle d'application. Outre les déterminants communs de la performance d'endurance, ils ont retenu que la performance en triathlon dépendait de la stratégie et tactique de course en milieu ouvert, de l'utilisation des conditions d'aspiration (en natation et en cyclisme) et de l'efficience énergétique dans les trois modes de locomotion.

I.1.F.a Amélioration du coût énergétique en situation d'aspiration

La réduction des résistances à l'avancement en situation d'aspiration (i.e., *drafting*) dans le sillage d'un athlète qui précède a été mise en évidence dans les trois modes de locomotion du triathlon (Figure 8). La dépense énergétique en natation est largement affectée par les résistances hydrodynamiques qui s'opposent à l'avancement (Lavoie et Montpetit 1986; Chatard et Millet 1996). En triathlon, ces résistances peuvent être diminuées par deux moyens: d'une part le port d'une combinaison en néoprène, et d'autre part le *drafting*, stratégie consistant à nager dans l'aspiration d'un autre nageur. L'efficacité de propulsion en eau libre, le port de la combinaison, l'habileté à utiliser l'aspiration sont des facteurs spécifiques de la performance en natation en triathlon. Le fait de nager en situation d'aspiration se traduit par une amélioration de CE de 5 à 10% (Bassett et al. 1991). Lors d'un exercice maximal en situation d'aspiration, la performance était améliorée de 3,2 à 6% ; soit 9 à 12 s sur 400 m (Chollet et al. 2000). L'amélioration des performances est plus importante chez des nageurs ayant un faible taux de masse grasse et une faible poussée de flottaison.

En cyclisme, la proportion d'énergie économisée en situation d'aspiration est variable selon la vitesse de déplacement, le type d'abri et la position des cyclistes entre eux. McCole et al. (1990) ont mis en évidence une réduction de $\dot{V}O_2$ de 26, 39 et 62% lorsqu'un athlète est en position d'aspiration derrière un coureur isolé, dans un groupe ou derrière un camion respectivement. La distance séparant un cycliste de celui qui le précède est aussi un paramètre important. Cependant, pour les catégories d'âge, le triathlon est une épreuve individuelle sans aide extérieure et sans la possibilité de pouvoir s'abriter en vélo, contrairement au triathlon « élite ». Les 40 km de cyclisme sont donc réalisés par les *Masters* triathlètes dans des conditions proches d'un contre-la-montre individuel, sans bénéficier de l'aspiration du cycliste qui précède. Contrairement aux triathlètes « élites », les *Masters* triathlètes ne

peuvent pas épargner d'énergie économisée en restant continuellement en situation de *drafting* sur la partie cycliste. L'influence du cyclisme sur la course à pied a fait l'objet d'un intérêt particulier. Quelques études se sont intéressées à cette règle et à ses influences potentielles sur la performance (Hausswirth et al. 1999). Elles révèlent une meilleure performance pédestre après une épreuve de cyclisme réalisé en condition de *drafting* par comparaison avec une épreuve réalisée seul (Hausswirth et al. 1999). Bien qu'en course à pied, l'influence des résistances aérodynamiques soit moindre, l'amélioration des performances est de l'ordre de 1 s par 400 m pour des vitesses supérieures à 20 $km \cdot h^{-1}$ (Pugh 1971).

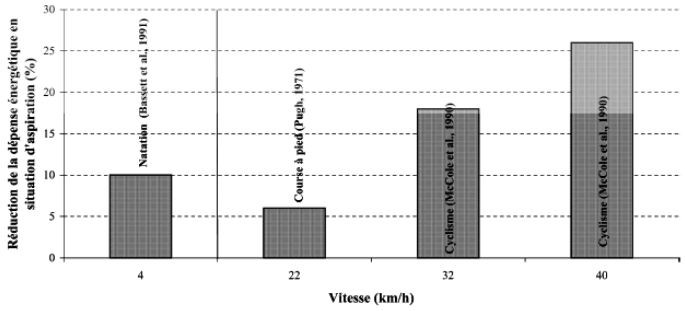


Figure 8 : Réduction de la dépense énergétique en situation d'aspiration, selon les modes de locomotion et la vitesse de déplacement (d'après Millet et Candau 2002).

I.1.F.b Stratégie et tactique de course en milieu ouvert

La natation en triathlon possède sa propre spécificité. Tout d'abord l'environnement : les triathlons se déroulent généralement dans un cadre extérieur où l'épreuve de natation est organisée sur un plan d'eau, en rivière ou en mer. Cet environnement impose aux triathlètes de prendre en considération plusieurs facteurs tel que :

- la mouvance du milieu. En effet, les triathlètes doivent s'adapter aux différents éléments rencontrés dans le milieu naturel comme les vagues, qui perturbent la technique du nageur, les courants (mer, rivière) et le vent, qui crée de la houle dès qu'il atteint une certaine vitesse.

- la modification des repères (essentiellement d'ordre visuel). En piscine, le nageur évolue entre des lignes d'eau et un mur. Tous ces repères matériels disparaissent en milieu naturel. Seules des bouées situées parfois à plusieurs centaines de mètres guident les triathlètes. Chacun doit alors adopter les meilleures trajectoires possibles.

L'une des autres spécificités de la natation en triathlon est le port de la combinaison. Elle est obligatoire lorsque la température est trop froide. Cependant, elle a d'autres incidences :

- un gain de flottabilité : grâce au port de la combinaison, les triathlètes conservent une position plus horizontale et disposent d'une meilleure flottabilité. Ainsi, plus le nageur est dense et plus le port de la combinaison lui permet d'améliorer ses performances.

- une diminution des résistances hydrodynamiques: le port de la combinaison permet également de diminuer les résistances liées au frottement de l'eau sur la peau (les frottements de l'eau sur la combinaison sont inférieurs aux frottements de l'eau sur la peau). De plus, les jambes s'enfoncent moins dans l'eau. Elles permettent ainsi de diminuer le maître couple et donc la résistance à l'avancement.

Enfin, la dernière particularité de la natation en triathlon est la tactique de course. Les trois phases clefs de la natation en triathlon sont :

- Le départ : en triathlon le départ regroupe l'ensemble des concurrents. Généralement, les triathlètes se placent dans l'aire de départ suivant leur niveau. Dès les premiers mètres, les meilleurs nageurs tentent de s'extirper du groupe le plus rapidement possible.

- La course : les triathlètes ont la possibilité de nager en groupe tout au long du parcours natation.

- La fin de course : dans les derniers mètres, les triathlètes préparent la transition. Ils visualisent leur emplacement dans l'aire de transition et le changement qu'ils vont effectuer.

Lors du cyclisme en triathlon, la puissance développée enregistrée n'est pas constante. Les conditions environnementales, le profil du parcours, les conditions météo (vent), le *drafting* (pour les épreuves « élite » seulement) induisent des variations d'intensité. Une étude récente (Bernard et al. 2009) démontre qu'une épreuve de cyclisme réalisée avec des variations de puissance de 5 à 15% autour de la puissance moyenne sur 20km, entraîne une moins bonne performance lors de la course à pied subséquente par rapport à une épreuve de cyclisme réalisée à puissance constante. En conditions stochastiques (variation aléatoire de puissance), la fatigue neuromusculaire induite par le cyclisme pourrait être plus importante.

Pour la course à pied, seules quelques études ont examiné les fréquences et longueurs de foulée lors de la course à pied du triathlon (Hausswirth et Lehenaff 2001). Si la foulée est plus courte au début de l'enchaînement vélo-course par rapport à une course contrôle, les valeurs sont les mêmes pour les deux modalités à la fin de la course à pied. Le niveau et la durée de l'activation de plusieurs muscles (biceps femoris, vastus lateralis, vastus medialis, rectus fomeris) sont plus importants en course à pied après un effort de cyclisme. De plus,

l'enchaînement cyclisme - course à pied induit une flexion plus importante du tronc sur la hanche lors du premier kilomètre. Ces observations justifient la nécessité d'un entraînement spécifique pour permettre une coordination appropriée et une adaptation musculaire à l'enchaînement. Par ailleurs, Bernard et al. (2003) ont montré que le choix d'une cadence de pédalage basse, qui induit généralement une fréquence de foulée et une vitesse de course plus faible lors du premier kilomètre, peut être une bonne stratégie pour améliorer la performance lors d'un triathlon olympique. Lors d'un enchaînement cyclisme - course à pied, la stratégie conduisant à la meilleure performance sur 10 km est celle qui consiste à courir le premier kilomètre 5% plus lentement que la vitesse moyenne d'une course à pied isolée. Cela souligne la nécessité de partir plus lentement pour conserver un coût énergétique constant en course à pied (Hausswirth et al. 2010).

I.1.G **Synthèse**

Le tableau de synthèse ci-après (Tableau 2) récapitule les principaux déterminants de la performance du triathlon. Il reprend les déterminants généraux de la performance en endurance, les déterminants de la performance pour chaque mode de locomotion et les déterminants de la performance en triathlon pour les triathlètes « élites ». Des conditions de course différentes (du fait de l'interdiction du drafting en cyclisme) ou les modifications sous l'effet du vieillissement des caractéristiques physiologiques et biomécaniques pourraient conduire à adapter ou corriger ce tableau afin de le rendre applicable au Master triathlète. Une analyse inverse consistant à vérifier la pertinence et la validité des déterminants de la performance identifiés à la population des Masters triathlètes pourrait être conduite.

	Principaux déterminants	**Spécificité**	**Références**
Performance en endurance	$\dot{V}O_{2max}$ Fraction de $\dot{V}O_{2max}$ Economie de course Capacité du muscle à produire de la force/puissance Entrainement (volume et intensité)		Di Prampero (1986; 2003), Coyle (1995) Bassett et Howley (1997; 2000) Faulkner et al. (2008) Tanaka et Seals (2008)
Natation	Technique de nage pour : - Réduire les résistances mécaniques - Produire une puissance propulsive.	Mode de locomotion porté. Membres supérieurs locomoteurs avec contribution des membres inférieurs	Chatard et al. (1990) Costill (1994)
Cyclisme	Production $P_{méca}$ à partir du mouvement de pédalage Contraintes aérodynamiques du contre la montre individuel	Mode de locomotion porté. Membres inférieurs locomoteurs	Grappe (2009) Kyle (1984) ; Hagberg et McCole (1996)
Course à pied	Masse et caractéristiques anthropométriques Capacité de stockage et de restitution de l'énergie par le système musculaire	Mode de locomotion non porté. Membres inférieurs locomoteurs avec contribution des membres supérieurs	Van Ingen Shenau et Cavanagh (1990) Cavagna (1977) Slawinski et Billat (2004)
Triathlon	Utilisation des conditions d'aspiration (en natation et en course à pied au dessus de 15 $km.h^{-1}$) Stratégie et tactique de course en milieu ouvert		Hausswirth et Brisswalter (2008)

Tableau 2 : Déterminants de la performance en triathlon

I.2 Effet du vieillissement sur la performance

I.2.A Généralités

Depuis les premiers travaux de Hill (1925), l'analyse des performances « record » a souvent été utilisée dans la littérature pour étudier les mécanismes d'adaptation physiologique lors de l'exercice et plus récemment l'influence du processus de vieillissement sur ces mécanismes. L'effet du vieillissement sur la performance a été étudié dans un premier temps pour la course à pied et la natation. L'intérêt grandissant, le déclin des performances d'endurance lié à l'âge a été observé pour une plus grande diversité d'activités comprenant le marathon et la course sur route (Wiswell et al. 2001; Jokl et al. 2004; Trappe 2007; Leyk et al. 2007; Lepers et Cattagni 2011), la course sur piste (Moore 1975; Stones et Kozma 1981; Fung et Ha 1994; Baker et al 2003 ; Young et Starkes 2005), l'aviron (Seiler et al. 1998), la natation (Bongard et al. 2007; Donato et al. 2003; Fairbrother 2007; Rahe et Arthur 1975; Tanaka et al. 1997) et le cyclisme (Balmer et al. 2008a; Balmer et al. 2008b; Ransdell et al. 2009).

I.2.B Déclin des performances en natation.

En natation, le déclin des performances avec l'âge a déjà fait l'objet d'études plus ou moins anciennes. Donato et al. (2003) ont utilisé les performances réalisées lors du championnat des Etats Unis sur le 1500m nage libre pour étudier le déclin des performances avec l'âge, chez les hommes et les femmes (Figure 9). Il est curvilinéaire pour les deux sexes. Les meilleures performances sont maintenues jusqu'à environ 35 ans. Elles déclinent progressivement jusqu'à environ 70 ans. Ensuite, le déclin augmente substentiellement (Donato et al. 2003).

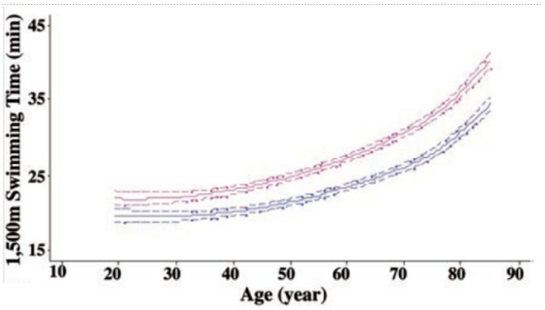


Figure 9 : Evolution des performances avec l'âge réalisées sur le 1500m nage libre (hommes en bleu et femmes en mauve) du championnat des Etats Unis (performance moyenne et intervalle de confiance à 95%) d'après Donato et al. (2003)

Plus récemment, les performances « record » (données de la fédération internationale de natation) sur 50 m et 1500 m nage libre ont été étudiées en fonction de l'âge par Tanaka et

Seals (2008) (Figure 10). Cette étude ne montre pas de différence du déclin entre les hommes et les femmes sur l'épreuve d'endurance où la participation par groupe d'âge est similaire quel que soit le sexe. L'activité natation permettrait de s'affranchir du biais de «sélection» souvent évoqué dans d'autres activités induit par le fait qu'il y a un plus faible nombre de sportives dans les catégories les plus âgés.

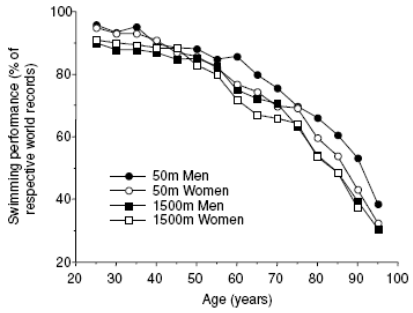


Figure 10 : Records du monde du 1500m et du 50m nage libre, hommes et femmes, en fonction de l'âge (Tanaka and Seals 2008)

I.2.C **Déclin des performances en cyclisme.**

Il n'existe malheureusement pas beaucoup de données ou d'études permettant de décrire le déclin de la performance en cyclisme probablement du fait qu'il est difficile de comparer des performances réalisées lors des épreuves de course en ligne. Seules les épreuves de contre la montre permettent d'établir des performances chronométriques comparables. Récemment, (Ransdell et al. 2009) ont examiné les performances record des Etats Unis pour l'épreuve de contre la montre sur 40 km pour décrire le déclin (Tableau 3). De 35 à 60 ans, le déclin par rapport au record du monde passe de 0,5 à 11% chez les hommes soit environ 0,5% par an. Enfin, une grande différence est notée entre les hommes et les femmes surtout au dessus de 50 ans. Cependant, il convient de souligner que l'étude du déclin en cyclisme ne se base que sur une quantité restreinte de données. Des études complémentaires mériteraient d'être conduites pour consolider ou préciser ces résultats.

	Age group (yr)					
	35	40	45	50	55	60
40 km — road, time trial, USA records (min): 47.58 (men); 51.60 (women)						
Men's records (sec)	47.82	48.43	49.97	50.60	51.95	52.72
Women's records (sec)	51.60	53.03	53.03	57.03	59.02	
Age difference (%)						
Men	0.5	1.8	5.0	6.3	9.2	10.8
Women	2.8	2.8	10.5	14.4		
Gender difference (%)	10.9	9.5	14.1	16.6		

*Data obtained from http://www.usacycling.org/forms/records.pdf

Tableau 3 : Records des EU du contre la montre cycliste sur 40 km. Différence en pourcentage (%) avec le record du monde par groupe d'âge et en fonction du sexe (d'après Ransdell et al. 2009).

I.2.D **Déclin des performances en course à pied.**

Le déclin des performances avec l'âge est bien documenté dans la littérature et a fait l'objet de nombreuses études notamment pour le marathon. Ainsi Trappe (2007) a étudié l'évolution des performances record sur marathon avec l'âge pour les deux sexes (Figure 11). Cette étude montre que le déclin est exponentiel avec l'âge mais que les performances réalisées dépassent souvent largement celles d'une grande partie des jeunes adultes : moins de trois heures pour la décade supérieure à 70 ans. Enfin, ce déclin est plus important chez les femmes.

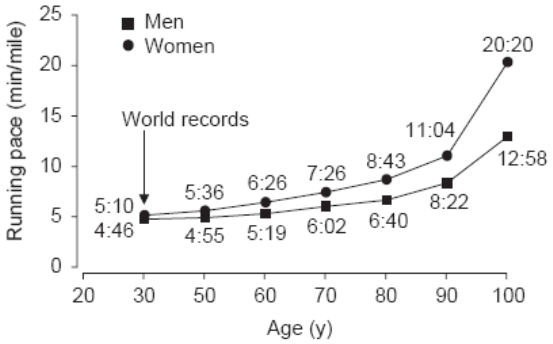


Figure 11 : Relation entre la vitesse (performances record du monde) de course, hommes et femmes, sur marathon et l'âge (Trappe 2007)

Avec l'augmentation de la participation des athlètes *Masters* d'endurance dans certaines épreuves, une grande quantité de données sur les performances réalisées par les *Masters* athlètes sur marathon ou semi-marathon est disponible. Pour identifier les ruptures dans le déclin des performances en utilisant une autre méthodologie, Leyk et al. (2007) ont analysé statistiquement les résultats de 65 semi marathons et 69 marathons en utilisant la performance moyenne des dix premiers arrivants (TOP 10) par tranche de 10 ans. Bien qu'il ne s'agisse pas de performances «record», les résultats confirment les observations précédentes et indiquent un déclin des performances de 2,6% à 4,4% par décade entre 50 et 70 ans.

L'analyse des performances réalisées lors du Marathon de New York en fonction de l'âge et du sexe (415000 performances) entre 1983 et 1999 montre une augmentation de la participation féminine au marathon et une amélioration significativement des performances chez les *Masters* athlètes, en particulier chez les athlètes féminines âgées (Jokl et al. 2004). Cette tendance est confirmée par Lepers et Cattagni (2011). Ces résultats laissent à penser que l'augmentation de la participation féminine aux épreuves *Masters* devrait permettre de réduire le biais de « sélection » et de pouvoir comparer de manière pertinente la réduction des capacités fonctionnelles selon le sexe pour des niveaux d'entraînement équivalent.

I.2.E **Modélisation du déclin des performances**

L'utilisation de modèles mathématiques pour décrire la relation entre l'âge et la performance est nécessaire pour décrire et pour effectuer des comparaisons. Dans leur étude, Baker et al (2003) ont proposé un modèle pour étudier le déclin des performances avec l'âge en exprimant la meilleure performance d'un groupe d'âge en fonction de la meilleure performance des moins de 30 ans. L'intérêt de cette représentation normalisée est de pouvoir étudier le déclin indépendamment des conditions de réalisation de la performance comme le profil d'une course hors stade ou les conditions de vent sur une épreuve de contre la montre en cyclisme. Le déclin est alors représenté par un ratio qui décroît de manière exponentielle du type : $Y = 1 - Exp^{(T-T_0)/\tau}$ pour les épreuves de course à pied (Figure 12). Y représente la performance sous la forme du ratio, τ une constante de temps représentative du déclin exponentiel des performances, T_0 l'âge théorique pour lequel la performance s'annule.

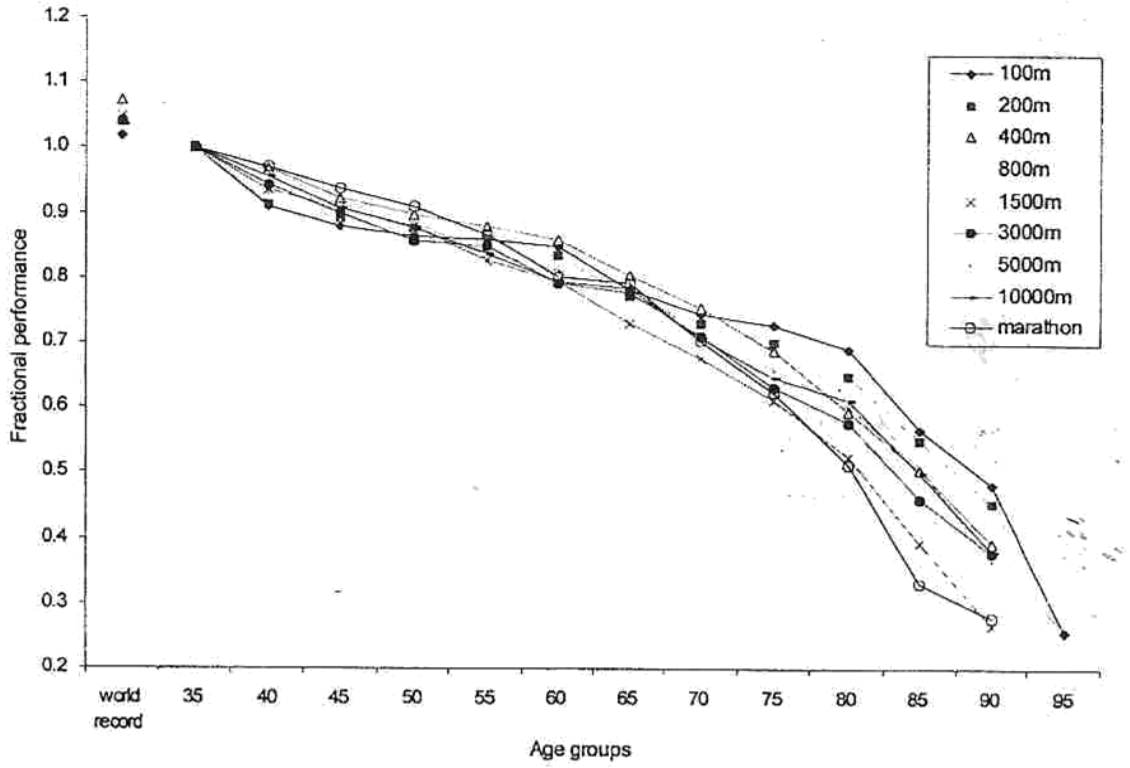


Figure 12 : Evolution du ratio des records de course à pied par groupe d'âge sous la forme Baker et al. (2003).

I.2.F **Synthèse**

Pour les épreuves d'endurance, les performances semblent se maintenir jusqu'à environ 35 ans, diminuer progressivement de 35 à 70 ans, et décliner fortement après 70 ans. Les différences de déclin observées entre les disciplines sportives suggèrent que le déclin de la performance dépendrait de l'activité, et surtout du mode de locomotion. Au delà de la diminution des capacités physiologiques, l'importance des facteurs socio-psychologiques est prépondérante. Il s'agit en particulier de la diminution du volume et de l'intensité des entraînements (impératifs familiaux et professionnels, limitations imposées par la tolérance aux efforts de l'appareil locomoteur, baisse de la motivation, aspects psychosociaux et pression sociale). Parmi les contraintes psycho-sociologiques citées, nous pouvons noter : l'environnement socio-professionnel, les contraintes familiales, l'absence de structures avec entraîneurs pour Master athlètes ou le moindre investissement en temps par rapport aux athlètes élites. Les hypothèses explicatives du déclin des performances avec l'âge (Faulkner et al. 2008 ; Reaburn et Dascombe 2008) retiennent non seulement la diminution des facteurs de la performance aérobie (conformément au modèle traditionnel de la performance aérobie di Prampero 1986) mais aussi la diminution des performances musculaires.

I.3 Performance musculaire et vieillissement

I.3.A **Définition**

Le vieillissement du muscle est communément associé à la sarcopénie, caractérisée par une diminution de la masse musculaire. Cependant, les conséquences physiologiques et fonctionnelles du vieillissement résultent d'interactions complexes entre de multiples facteurs. Vandervoort (2002) utilise la représentation schématique (Figure 13) pour décrire la sarcopénie qui se définit comme l'amyotrophie du vieillissement, l'altération des performances musculaires et son importante fatigabilité (Butler-Browne et Bigard 2006). L'origine de la sarcopénie reste encore mal connue.

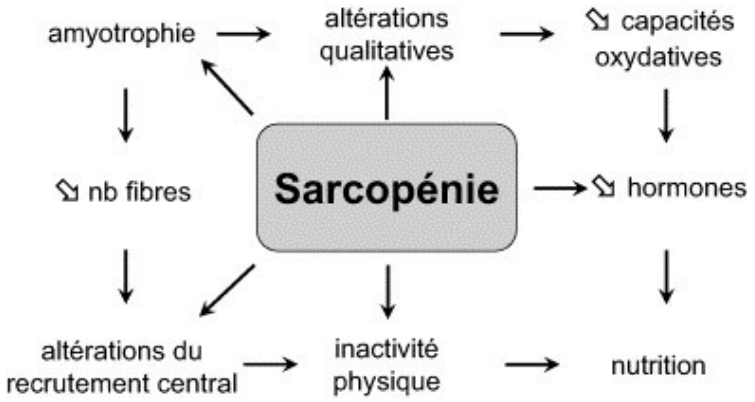


Figure 13 : Représentation schématique des multiples facteurs à l'origine de la sarcopénie (Vandervoort, 2002).

Pour décrire et essayer d'expliquer le déclin des performances musculaires (force, puissance et endurance) avec l'âge, il est nécessaire de comprendre les effets du vieillissement et de l'entrainement à la fois sur la structure, la *contractibilité* et la capacité oxydative du muscle. Si la sarcopénie a été largement documentée chez la personne âgée sédentaire, peu de données concernent le *Master* athlète entraîné en endurance.

I.3.B **Effet du vieillissement sur la structure du muscle**

I.3.B.a Diminution de la masse musculaire

L'altération des propriétés fonctionnelles du muscle (force, puissance et endurance) est en premier lieu expliquée dans la littérature par la perte de masse musculaire ou amyotrophie. Il existe une évolution parallèle de la masse musculaire et de la baisse des performances musculaires avec l'âge, confirmant la relation entre l'amyotrophie et la baisse de performances. L'amyotrophie est due à une chute du nombre de fibres musculaires ainsi qu'à

l'atrophie de certaines d'entre-elles (Lexell 1995). On estime à 5 % la perte de masse musculaire enregistrée sur une période de dix ans, à partir de 40 ans, avec une perte majorée après 65 ans (Tzankoff et Norris 1977). L'amyotrophie est moindre chez la femme, même si les conséquences fonctionnelles semblent être aussi importantes, puisqu'à âge égal la masse musculaire est toujours plus faible que chez l'homme (Janssen et al. 2000). De nombreuses hypothèses ont été avancées afin d'expliquer l'amyotrophie du sujet âgé. L'amyotrophie semble être liée :

- à une altération des processus de synthèse protéique, affectant principalement les protéines contractiles et les formes rapides de myosine, ce qui a des conséquences sur la taille des fibres musculaires (Balagopal et al. 1997) ;
- à une réduction du nombre de fibres musculaires. On estime à près de 50 % la réduction du nombre de fibres observée entre 20 et 80 ans. Pour le même muscle, il a été montré que l'atrophie est surtout présente pour les fibres rapides (type II) mais pas, ou très peu, pour les fibres lentes (type I) (Lexell 1993; Porter et al. 1995b ; Kent-Braun et al. 2000);
- à des changements hormonaux. La diminution de la disponibilité de nombreuses hormones anabolisantes avec l'âge telles que l'insuline, l'hormone de croissance (GH), l'*Insuline-like Growth Factor* (IGF-1), les hormones sexuelles et la DHEA (déhydro-épiandrostérone) influence la perte de masse musculaire (Proctor et al. 1998; Greenlund et Nair 2003; Nair 2005; Macaluso et De Vito 2004).

Lorsque les performances de force ou de couple développées sont normalisées à la masse musculaire, celles-ci diminuent avec les années, et ce quelles que soient les modalités de contraction. Il a aussi été montré que des fibres musculaires de même type présentaient une force spécifique (rapport entre la force et la taille de la fibre) inférieure chez la personne âgée (Frontera et al. 2000b; Frontera et al. 2000a), ce qui signifie que d'autres modifications que la taille des fibres interviennent dans la diminution de force. Des études réalisées in vitro ont permis de confirmer cette notion et ont montré que les capacités de production de force des fibres musculaires diminuent avec l'âge, principalement pour les fibres lentes de type I et les fibres rapides à métabolisme mixte oxydatif et glycolytique (fibres de type IIa) (Larsson et al. 1997).

I.3.B.b Modification des caractéristiques mécaniques du muscle

Le vieillissement entraîne des altérations et des modifications tissulaires ayant des conséquences sur les caractéristiques mécaniques du muscle. Parmi l'ensemble de ces modifications, il convient de souligner la réduction de l'angle formé par les fibres musculaires et leur insertion sur les aponévroses (angle de pennation), qui augmente par conséquent la composante longitudinale du vecteur force. La réduction de l'angle de pennation compenserait partiellement la diminution de force (Narici et al. 2003).

En ce qui concerne le tissu conjonctif, le nombre et la dimension des protéines fibreuses qui le composent (collagène et élastine) augmentent, et leur structure devient plus rigide. Ces protéines perdent de leur élasticité, de leur extensibilité et de leur flexibilité, ce qui a pour effet de modifier les propriétés mécaniques du muscle (Goubel 2001). Les modifications des propriétés mécaniques du muscle liées au vieillissement et leurs conséquences fonctionnelles (notamment pour la course à pied) n'ont pas été étudiées à notre connaissance.

I.3.B.c Augmentation des inclusions lipidiques

La diminution de la masse musculaire diminue progressivement associée à une augmentation de la place occupée par le tissu non-contractile (i.e. masse graisseuse), ayant pour effet de diminuer considérablement la capacité de production de force. Kent-Braun et al. (2000) ont observé une augmentation du tissu non-contractile quantifié à l'aide de l'imagerie par résonnance magnétique (IRM) avec l'âge (Figure 14). L'augmentation des inclusions lipidiques est modulée en fonction de l'activité physique. En effet, une corrélation significative entre le pourcentage du tissu non-contractile et l'activité physique est observée chez les sujets âgés uniquement.

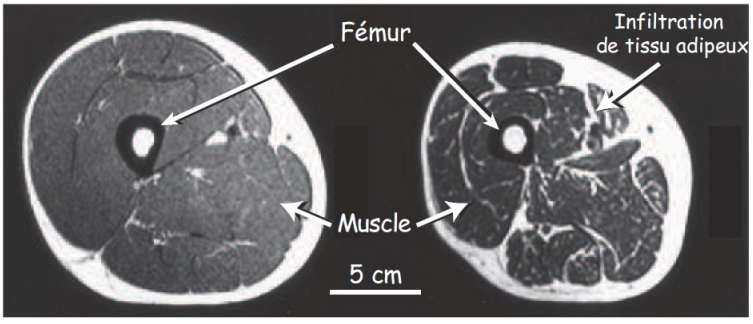


Figure 14 : Modifications anatomiques survenant au cours du vieillissement musculaire. Coupe transversale, obtenue par imagerie par résonance magnétique nucléaire, de la cuisse d'un sujet adulte (24 ans ; à gauche) et âgé (65 ans ; à droite). Cette image illustre la perte de masse musculaire ainsi que l'infiltration de tissu adipeux survenant au cours du vieillissement (Image modifiée de Jubrias et al. 1997).

Synthèse

L'atrophie des fibres musculaires induite par le vieillissement n'affecte pas de manière similaire tous les types de fibres; ce sont en effet les fibres rapides de type II qui semblent être le plus affectées par le vieillissement, avec une baisse de 20 à 60 % de leur calibre. L'atrophie des fibres musculaires est associée à une modification des caractéristiques mécaniques du muscle dont les conséquences fonctionnelles méritent d'être investiguées et à une augmentation des inclusions lipidiques. Les modifications de la structure musculaire induites par le vieillissement ne suffisent pas à expliquer le déclin des performances, d'autres facteurs comme les propriétés contractiles du muscle sont à prendre en considération.

I.3.C **Effet du vieillissement sur la *contractibilité* du muscle**

I.3.C.a Généralités

Les fibres musculaires sont sous le contrôle de motoneurones présentant des caractéristiques morphologiques et électriques différentes. La relation entre le motoneurone et la cellule musculaire est bien plus étroite que le simple événement excitation–contraction. Pour des raisons qui ne sont pas encore bien connues, la capacité de *contractibilité* du muscle squelettique est modifiée avec l'âge. Le vieillissement se traduit par une diminution du nombre d'unités motrices conduisant à un changement de typologie musculaire, par une diminution des capacités de recrutement des unités motrices (réduction d'activation volontaire et diminution de vitesse de contraction) et par une coactivation musculaire antagoniste.

I.3.C.b Diminution du nombre d'unités motrices et changement de typologie musculaire

Il existe aujourd'hui de nombreuses évidences directes et indirectes de modifications quantitatives et qualitatives du système nerveux avec l'âge. Parmi celles-ci, l'unité motrice qui constitue la base de l'organisation périphérique de la motricité est fortement perturbée au cours du vieillissement. En effet, après 60 ans le nombre de motoneurones diminue et s'accompagne d'une dégénérescence des axones correspondants (Kawamura et al. 1977a; Kawamura et al. 1977b; Kawamura et Dyck 1977). La perte d'unités motrices serait initiée par des modifications au niveau du système nerveux (Kanda et al. 1986). Bien qu'encore mal compris, ce mécanisme de mort cellulaire est accompagné d'un processus de dénervation des fibres appartenant à l'unité motrice correspondante. Un certain nombre de ces fibres est alors réinnervé par les axones des unités survivantes. La diminution du nombre de fibres et d'unités

motrices avec l'âge est présente dans quasiment tous les muscles de l'organisme et concerne tous les types de fibres (Hooper 1981; Alnaqeeb et Goldspink 1987; Maharam et al. 1999). Néanmoins, en règle générale, toutes les fibres d'une même unité motrice sont du même type, et la perte d'unités motrices avec l'âge concerne principalement celles composées de fibres de type II (Grimby et al. 1982; Lexell et al. 1988; Coggan et al. 1990; Klitgaard et al. 1990; Lexell et Downham 1991; Pyka et al. 1994). Certaines fibres dénervées seraient réinervées par des fibres nerveuses motrices de type I via un processus de germination axonale (Brown et al. 1981; Gordon et al. 2004). Parallèlement à la diminution du nombre d'unités motrices, ce processus de dénervation–réinnervation conduit à l'apparition d'unités « géantes » (Klass et al. 2005). Selon Lexell (1995), l'avancée dans l'âge entraîne une modification progressive de la typologie musculaire tournée vers les fibres de type I. Les unités motrices rapides disparaissent pour être, ou non, remplacées par des unités motrices lentes. Ce profond remodelage de l'unité motrice avec le vieillissement a des implications fonctionnelles importantes sur le contrôle nerveux de la contraction musculaire et permet notamment d'expliquer la perte de dextérité ainsi que la plus grande fluctuation de la force observée chez les personnes âgées lors du maintien d'une contraction sous maximale (Enoka et al. 2003). Les processus de sarcopénie et de perte de force développée observés dans les muscles des personnes âgées pourraient donc être dus à une altération de l'innervation du muscle squelettique. Ce phénomène induirait un découplage excitation–contraction, ce qui modifierait l'expression de certaines familles de gênes musculaires.

I.3.C.c Diminution des capacités de recrutement

Outre une réduction du nombre de motoneurones et un profond remodelage de l'unité motrice, la diminution de force et de puissance avec l'âge pourrait être partiellement due à une activation incomplète des muscles agonistes par le système nerveux central et un ralentissement des vitesses de contraction et de relaxation.

Une méthode classiquement utilisée pour tester la capacité d'un sujet à activer un groupe musculaire consiste à surimposer une stimulation électrique (stimulus isolé ou train de stimuli) pendant une contraction volontaire maximale. L'absence d'incrément en force, due à la stimulation électrique, suppose que le sujet est capable d'activer le groupe musculaire impliqué de façon maximale. En revanche, la présence d'un incrément en force traduit un déficit d'activation volontaire qui peut être alors quantifié (Herbert et Gandevia 1999). Ce déficit est le résultat d'un recrutement incomplet et/ou d'une fréquence de pulsations sous

optimale des unités motrices. Dans ce contexte, la littérature relative à la capacité d'activation volontaire chez les seniors est controversée.

En effet, certaines études ont montré que les personnes âgées actives sont capables d'activer leurs groupes musculaires de façon comparable aux sujets jeunes, du moins pendant des contractions isolées (De Serres et Enoka 1998; Klass et al. 2005; Scaglioni et al. 2002). D'autres travaux expérimentaux ont en revanche constaté que pour certains muscles, elles sont incapables de produire une commande volontaire similaire à celle des jeunes (Morse et al. 2004). Il convient néanmoins de souligner que si plusieurs essais sont permis, la différence d'activation volontaire entre les deux groupes disparaît quasi complètement (Jakobi et Rice 2002). Cette observation indique que le manque de pratique, plus que l'incapacité du système nerveux à activer les muscles de façon maximale, serait responsable de la réduction d'activation volontaire.

La diminution de vitesse de contraction du muscle s'expliquerait (Duchateau et al. 2006b) :

- par un ralentissement de la cinétique contractile de l'ensemble des fibres (D'Antona et al. 2003). Au niveau intracellulaire, un ralentissement de l'activité ATPasique de la myosine ainsi que des altérations du couplage « excitation–contraction » seraient responsables de la diminution de cinétique de contraction et de relaxation (Baudry et al. 2005; D'Antona et al. 2003; Payne et Delbono 2004). Ce dernier mécanisme, qui lie l'excitation électrique de membrane de la fibre musculaire au processus d'interaction des protéines contractiles lors de l'activation, est étroitement contrôlé par l'ion calcium. Ainsi, il a été montré que le mécanisme qui conduit à la relaxation musculaire (reséquestration du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique) est fortement ralenti au cours du vieillissement (Payne et Delbono 2004).
- par une plus grande atrophie des fibres rapides (type II) comparativement aux fibres lentes (type I) ;
- et dans une moindre mesure par une augmentation de la compliance de l'unité musculotendineuse (Narici et al. 2002).

Ce dernier mécanisme, qui lie l'excitation électrique de membrane de la fibre musculaire au processus d'interaction des protéines contractiles lors de l'activation, est étroitement contrôlé par l'ion calcium. Ainsi, Payne et Delbono (2004) ont montré que la reséquestration du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique, mécanisme qui conduit à la relaxation musculaire, est fortement ralenti au cours du vieillissement.

I.3.C.d Coactivation musculaire antagoniste

Une coactivation musculaire antagoniste de faible intensité sous la dépendance de la commande nerveuse serait également susceptible de réduire la force développée ainsi que la précision des mouvements dynamiques. Cette coactivation assure une meilleure stabilité de l'articulation et permet donc une meilleure action des muscles agonistes (Baratta et al. 1988). Le degré de coactivation est contrôlé par le système nerveux et varie en fonction de l'intensité de la contraction agoniste, le régime de contraction, la position angulaire ainsi que la vitesse de mouvement (Kellis 1998). De nombreuses études ont montré que la coactivation est accrue au cours du vieillissement (Klein et al. 2001; Macaluso et al. 2002). L'altération de la relaxation pourrait être en partie due à une baisse de la re-séquestration du calcium par le réticulum sarcoplasmique (Thompson 1994).

Synthèse

Outre la diminution de masse musculaire, la sénescence est associée à une réduction du nombre de motoneurones et à un profond remodelage de l'unité motrice. Malgré la plasticité du système nerveux, ces changements ont des implications fonctionnelles importantes sur le contrôle nerveux de la contraction musculaire. Une diminution des capacités de recrutement des unités motrices avec l'âge a été observée, mais les études sur ce sujet sont souvent contradictoires, car il apparait des variations en fonction de l'entraînement, du muscle testé et de l'activité physique habituelle. Par conséquent, une partie de la diminution de force, de puissance et la moindre précision des mouvements chez la personne âgée peuvent être dues à une activation inadéquate des muscles par le système nerveux.

I.3.D **Effet du vieillissement sur la capacité oxydative du muscle**

La capacité des muscles squelettiques à consommer l'O_2 provenant du sang artériel afin de produire de l'énergie (i.e., ATP) nécessaire à leur contraction est étroitement liée à la densité du réseau de capillaires présents au niveau des fibres musculaires, mais aussi de la quantité de mitochondries présentes au niveau musculaire, dont l'activité dépend aussi d'enzymes oxydatives (Tanaka et Seals 2008). Outre une diminution de la densité du réseau de capillaires (Coggan et al. 1992), les données de la littérature indiquent à la fois une diminution de la densité de mitochondries (Carmeli et al. 2002), de la vitesse maximale des phosphorylations oxydatives (Conley et al. 2007) et de l'activité des enzymes mitochondriales. Une diminution des enzymes oxydatives (citrate synthase, la succinate déshydrogénase, 2-oxogluterate-

déshydrogénase, β-hydroxy-CoA déshydrogénase) ou la cytochrome c-oxydase (chaîne de transfert des électrons) contribuerait à ralentir la vitesse de production d'ATP par les phosphorylations oxydatives (Coggan et al. 1990; Coggan et al. 1992; Trappe et al. 1996). Cependant, d'autres études ont enregistré un même niveau d'activité des enzymes oxydatives au niveau des muscles actifs, ainsi qu'un réseau de capillaires comparable (exprimées par la surface occupée ou par fibre) entre athlètes jeunes et *Masters* (Coggan et al. 1992; Proctor et al. 1998). Par ailleurs, la capacité oxydative du muscle avec l'âge serait modulée par le niveau d'activité physique. Kent-Braun et Ng (2000) n'ont pas trouvé de différence de l'activité oxydative du muscle en phase de récupération entre deux populations d'âge différent (n = 19; 33,8 ± 4,8 vs. n = 18; 75,5 ± 4,5 ans) mais ayant un même niveau d'activité physique.

Synthèse

La capacité oxydative du muscle pourrait être altérée par la réduction de la densité mitochondriale. Le vieillissement affecterait aussi le nombre de capillaires et les systèmes enzymatiques directement impliqués dans la fourniture de l'énergie. Cependant, cette réduction serait modulée en fonction de l'activité physique.

I.3.E **Effet du vieillissement sur les performances musculaires**

A la lumière des effets du vieillissement sur le système musculaire, il devient plus facile de décrire et d'essayer d'expliquer le déclin des performances musculaires (force, puissance et endurance) avec l'âge.

I.3.E.a Effet du vieillissement sur la force

La force musculaire est communément caractérisée par la charge maximale développée par un muscle ou un groupe de muscles. L'un des effets de l'âge sur le système moteur est certainement la diminution de la force maximale. Le déclin de force avec l'âge a été largement documenté chez la personne âgée sédentaire, mais très peu de données concernent le *Master* athlète d'endurance.

Tzankoff et Norris (1977) rapportent une faible diminution (5%.décade^{-1}) de la force dès 40 ans. L'ensemble des études rapporte une diminution de 15-35% de la capacité de production de force maximale volontaire (FMV) à partir de 60 ans et plus prononcée chez la femme (Coggan et al. 1990; Fiatarone et al. 1990; Sipila et al. 1991; Porter et al. 1995; Izquierdo et al. 1999a; Izquierdo et al. 1999b; Lynch et al. 1999; Vandervoort 2002; Macaluso et De Vito

2004; Butler-Browne et Bigard 2006). Le déclin de force est indépendant du genre des individus (Frontera et al. 1991; Lindle et al. 1997; Izquierdo et al. 1999), du mode de contraction (Figure 15) et concerne autant les muscles des membres inférieurs que supérieurs.

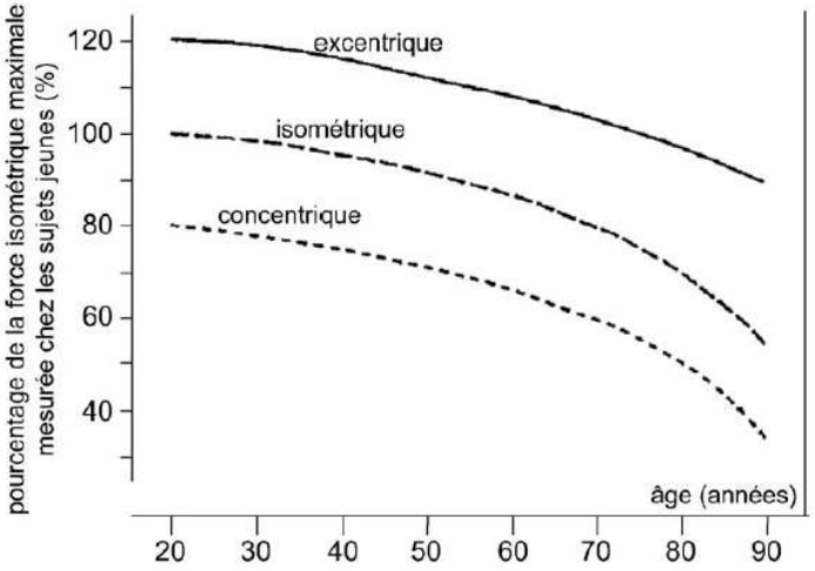


Figure 15 : Effet de l'âge sur la force musculaire évaluée selon différents modes de contraction; isométrique, concentrique, excentrique (Vandervoort, 2002).

En comparaison avec la perte de force en mode concentrique, l'altération des performances est moins importante en mode excentrique, tout particulièrement chez la femme. La raison de cette meilleure préservation de la force pendant des contractions excentriques n'est pas encore parfaitement élucidée, mais elle semble liée à un ralentissement de la cinétique contractile (Poulin et al. 1992 ; Lynch et al 1999).

L'importance de la perte de force varie d'un groupe musculaire à l'autre et dépend globalement de l'importance des activités musculaires pratiquées quotidiennement par les individus (Macaluso et al 2004; Porter et al. 1995). L'analyse du déclin de force musculaire ne peut pas s'affranchir de la prise en compte du niveau d'activité physique.

La capacité de production de force est davantage affectée pour les mouvements rapides que pour les mouvements lents (Pousson et al. 2001). Les vitesses de contraction et de relaxation sont ralenties avec l'âge (Porter et al. 1995 ; Macaluso et De Vito 2004). Contrairement à la force maximale qui décline plus fortement à partir de 50–60 ans, la cinétique contractile des muscles se ralentit très progressivement à partir de 20 ans (Vandervoort et McComas 1986).

I.3.E.b Effet du vieillissement sur la puissance musculaire

La performance musculaire est la résultante fonctionnelle de la force et de la vitesse. Elle se mesure en termes de puissance. La combinaison de la perte de force et le ralentissement de la cinétique contractile conduit à une diminution de puissance musculaire (force × vitesse) qui est forcément plus prononcée que chacun des paramètres pris isolément (Macaluso et De Vito 2004). Dans une étude relativement ancienne, Margaria (1966) a utilisé un test de montée à vitesse maximale d'un escalier pour mesurer le déclin de la puissance maximale. Bien qu'ancienne, cette étude (Margaria 1966) permet d'illustrer le déclin avec l'âge de la puissance maximale (Figure 16).

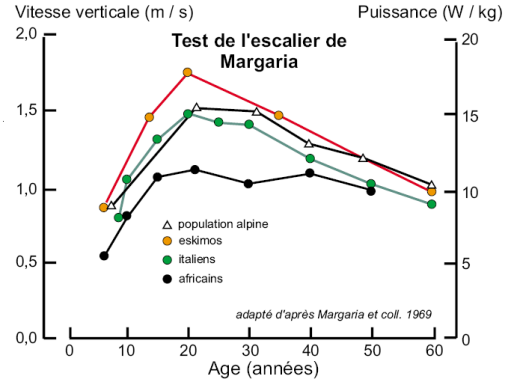


Figure 16 : Déclin de la puissance maximale avec l'âge (adapté par Vandervoort d'après Margaria 1966)

Le déclin de puissance musculaire avec l'âge a été clairement identifié à travers une diminution de la force explosive produite au cours de contractions dynamiques brèves (Margaria 1966; Bosco et Komi 1980; Bassey et al. 1992; Thelen et al. 1996) et par une diminution du taux de développement de force (i.e., RFD, pour *rate of force developement*) au cours de contractions maximales isométriques (Clarkson et al. 1981; Vandervoort et McComas 1986; Thelen et al. 1996).

I.3.E.c Effet du vieillissement sur l'endurance musculaire

La capacité du muscle à répéter de nombreuses contractions, ou à maintenir longuement des contractions statiques, s'appelle l'endurance musculaire. L'endurance musculaire est une composante importante des performances du muscle qui est aussi affectée par la sénescence. Bien que cette notion reste controversée, il semble bien que le vieillissement soit associé avec une augmentation de la fatigabilité musculaire. La baisse de l'endurance musculaire serait en partie expliquée par les modifications de la commande neuronale, mais aussi par des modifications importantes du métabolisme énergétique (diminution de la capacité oxydative du muscle). Les approches méthodologiques de l'endurance musculaire varient suivant les

auteurs, ce qui ne facilite pas la comparaison des études expérimentales, mais on a assez souvent pu mettre en évidence une plus grande sensibilité à la fatigue avec l'âge.

En matière l'endurance musculaire de longue durée, la sensibilité à la déplétion glyconégénique musculaire avec le vieillissement suggère une diminution de l'aptitude aérobie de longue durée avec l'âge chez le *Master* athlète. Meredith et al. (1989) rapportent une déplétion glycogénique musculaire plus importante à l'exercice chez l'homme âgé (Meredith et al. 1989). Les informations relatives à la glycogénolyse musculaire et hépatique à l'exercice sont peu nombreuses chez l'homme âgé. Cette observation est confirmée chez le rat (Cartee et Farrar 1988; Fitts et al. 1984). La diminution de la concentration en glycogène intra musculaire observée (Cartee 1994b) associée au déclin des capacités de glycogénèse hépathique et de glycogénèse (Podolin et al. 1994) ou d'oxydation des lipides (Sial et al. 1998) pourraient concourir à diminuer le potentiel énergétique musculaire et l'aptitude des efforts de longue durée du *Master* athlète. Le lien avec le déclin de la fonction oxydative mitochondriale reste à établir (Crane et al. 2010).

Synthèse

Le déclin de force avec l'âge est largement documenté chez la personne âgée sédentaire, mais très peu de données concernent le Master athlète d'endurance. La force musculaire est diminuée, et ce aussi bien chez les hommes que chez les femmes; la baisse de la force musculaire est observée aussi bien pour les muscles des membres supérieurs que pour ceux des membres inférieurs, et pour tous les modes de contraction du muscle (contractions isométriques ou anisométriques). La diminution de force semble néanmoins plus prononcée pour des contractions isométriques et concentriques que pour des contractions excentriques. La perte de force s'explique en grande partie par la diminution de la masse musculaire et dépend de l'importance des activités musculaires pratiquées quotidiennement par les individus. La capacité de production de force est davantage affectée pour les mouvements rapides que pour les mouvements lents. La perte des unités motrices de type 2 expliquerait en grande partie le déclin de force et de puissance musculaire avec l'âge. Le déclin de puissance musculaire avec l'âge semble plus prononcé que le déclin de force. La baisse de l'endurance musculaire serait en partie expliquée par les modifications de la commande neuronale, mais aussi par une diminution de la capacité oxydative du muscle.

I.3.F **Effet de l'entraînement**

I.3.F.a Généralités

L'exercice permet-il de lutter contre les effets du vieillissement ? Compte tenu de l'importance grandissante des populations âgées dans nos pays, de nombreuses contre-mesures ont été proposées dans le but d'en minimiser les conséquences. L'exercice physique représente un moyen facile à mettre en application pour réduire l'impact du vieillissement.

I.3.F.b Effet de l'entraînement sur la structure du muscle

I.3.F.b.1 Effet de l'entraînement sur la masse musculaire

Entraînement en force

L'entraînement en force permet de conserver, voire d'augmenter la surface de section des fibres musculaires pour les deux sexes. De très nombreuses études expérimentales se sont attachées à évaluer les effets de programmes d'entraînement en force sur la masse musculaire et les performances du muscle. Des bénéfices considérables ont été mis en évidence, y compris chez des sujets très âgés (Harridge et al. 1999). La majorité des études qui ont mesuré l'évolution de la masse musculaire après un programme de musculation chez la personne âgée ont rapporté une hypertrophie de l'ordre de 2 à 15 % (Porter et al. 1995 ; Macaluso et De Vito 2004). Cette observation indique clairement que le muscle squelettique est capable, même à un âge avancé, d'accroître la synthèse protéique pour autant que la charge imposée soit suffisante. Il a également été montré, au moyen de biopsies, que les deux types de fibres musculaires s'hypertrophiaient dans des proportions similaires après entraînement (Macaluso et De Vito 2004). Cet effet favorable des exercices en force résulte d'une augmentation des flux de synthèse de l'ensemble des protéines musculaires chez des sujets âgés de différentes classes d'âge (Yarasheski et al. 1999).

Entrainement en endurance

Les exercices dynamiques de faible intensité et prolongés permettent de prévenir l'amyotrophie du vieillissement en augmentant les flux de synthèse des protéines musculaires (Willis et al. 1998). La préservation relative des synthèses protéiques dans le muscle âgé est principalement liée à une activation de la voie de signalisation protéine kinase B mTOR (Reynolds et al. 2004). L'entraînement en endurance permet aussi d'augmenter la population de cellules satellites (Roth et al. 2001; Martel et al. 2001), ce qui constitue un facteur

favorable au maintien de la population de fibres musculaires et permet de minimiser la sarcopénie. Chez les *Masters* athlètes d'endurance, la perte de masse musculaire serait limitée (Heath et al. 1981; Faulkner et al. 2008).

I.3.F.b.2 Effet de l'entraînement sur la typologie musculaire

Le changement de typologie musculaire avec l'âge serait d'autant plus important que les personnes pratiquent régulièrement un entraînement en endurance (Coggan et al. 1990; Lexell 1995; Trappe et al. 1995). D'un autre côté, certaines études ont enregistré une augmentation de la taille des fibres de types I et II (Pyka et al. 1994; Larsson et al. 1997) et du pourcentage des fibres de type II (Orlander et Aniansson 1980) après un programme d'entraînement en force réalisé par des personnes âgées sédentaires (60 à 75 ans). Dans ce cadre, l'entraînement en endurance régulier conduirait à augmenter la proportion des fibres de type I (Coggan et al. 1992; Trappe et al. 1995), alors que l'entraînement en force préserverait les fibres de type II (Klitgaard et al. 1990).

I.3.F.b.3 Effet de l'entraînement sur l'élasticité musculaire

Les composantes contractiles et élastiques du muscle peuvent voir leurs propriétés mécaniques se modifier à des degrés divers sous l'effet de l'entrainement (Goubel 2001). Cette approche biomécanique illustre l'importante «plasticité» des structures musculo-tendineuses qui s'adaptent au changement de demande fonctionnelle. Pour la composante contractile, l'adaptation peut se traduire tant en termes de production de force que de modification de vitesse de raccourcissement. En ce qui concerne les éléments élastiques passifs (composante élastique parallèle et fraction passive de l'élasticité série), il ne semble pouvoir s'opérer qu'une évolution allant dans le sens d'une raideur accrue. En revanche, la fraction active de l'élasticité série paraît pouvoir devenir soit plus raide soit plus compliante selon le type d'entraînement pratiqué. Là encore, cette adaptation semble liée à des remaniements dans la composition du muscle en fibres de types différents. La possibilité d'évolution opposée des deux fractions de la composante élastique série (CES) n'est pas dépourvue d'intérêt. En effet, au cours de nombreux exercices, la CES subit des cycles étirement–détente où, pour améliorer le rendement du muscle, elle devrait tendre à satisfaire à deux exigences opposées : une raideur accrue pour mieux transmettre la force et réduire le temps de couplage étirement–détente, une compliance accrue pour permettre d'accroître l'énergie potentielle restituée. La prise en compte des variations de raideur musculaire liées au cycle étirement–détente permet de mieux comprendre certains effets de l'entraînement.

L'amélioration de la performance passe, entre autres, par une augmentation de raideur des muscles étirés que les sujets entraînés sont capables de supporter. Les effets de l'entraînement sur les caractéristiques mécaniques du muscle chez le *Master* athlète n'ont pas été étudiés à notre connaissance.

I.3.F.c Effet de l'entraînement sur la contractibilité du muscle

Des adaptations nerveuses (intensification de la commande volontaire et de sa régulation réflexe, coordination motrice) contribueraient aussi à l'augmentation de la force après entraînement (Macaluso et De Vito 2004 ; Morse et al. 2005). Les effets propres de l'exercice, rapidement observés après la mise en œuvre d'un entraînement en force, sont tout d'abord à mettre sur le compte d'adaptations de l'innervation, du recrutement des différents groupes musculaires, du patron de recrutement des muscles agonistes–antagonistes au cours de mouvements complexes (Hakkinen et al. 2000). Il a été mis en évidence que lorsque l'activation volontaire est sous maximale, elle est parfaitement susceptible de s'améliorer par la pratique de contractions musculaires intenses (Morse et al. 2005 ; Jakobi et Rice 2002). Par ailleurs, un programme de musculation permet de réduire le degré de coactivation des muscles ischiojambiers pendant la contraction maximale des quadriceps (Hakkinen et al. 1998). Les activités réflexes de muscles de la main sont augmentées suite à un entraînement de dextérité manuelle (Ranganathan et al. 2001). Le réflexe H recueilli au niveau du muscle soleus ne semble pas être modifié par un programme de musculation chez la personne âgée (Scaglioni et al. 2002). De façon intéressante, un programme de musculation a conduit à une réduction des fluctuations de la force pendant le maintien d'une contraction sous-maximale (Keen et al. 1994). Au niveau intracellulaire, le ralentissement de la reséquestration du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique après chaque activation, observé au cours du vieillissement, semble être partiellement contrecarré par l'entraînement (Hunter et al. 1999). Récemment, Power et al. (2010) ont rapporté une quantité similaire d'unités motrices fonctionnelles au niveau du tibial antérieur chez des *Masters* coureurs à pied (~ 65 ans) et des personnes jeunes non entraînées (~ 25 ans). Les *Masters* athlètes présentaient également plus d'unités motrices que des personnes âgées sédentaires du même âge (~ 65ans). L'entraînement en endurance régulier permettrait ainsi de préserver la quantité d'unités motrices fonctionnelles avec l'âge (Power et al. 2010). Ces adaptations à l'entraînement, principalement associées à des mécanismes nerveux, mettent en évidence le maintien de la capacité de plasticité du système neuromusculaire même à un âge avancé.

I.3.F.d Effet de l'entrainement sur la capacité oxydative du muscle

À l'instar de modèles animaux jeunes, l'entraînement permettrait d'augmenter les capacités oxydatives musculaires de rats âgés (Rossiter et al. 2005). L'entraînement en endurance induit une augmentation de la densité capillaire et de la capillarisation musculaire, ce qui se traduit par une amélioration de la distribution de l'oxygène dans le muscle (Hepple et al. 1997 ; Rossiter et al. 2005). L'entraînement en endurance chez le sujet âgé est susceptible d'augmenter à la fois la diffusion de l'oxygène dans le muscle squelettique, mais aussi son utilisation pour la fourniture de l'énergie nécessaire pour la réalisation de l'exercice.

I.3.F.e Effet de l'entraînement sur les performances musculaires

Malgré le phénomène de sarcopénie, de nombreuses études ont montré que la force musculaire est susceptible d'augmenter par un programme de musculation approprié et ce, même à un âge avancé (i.e. supérieur à 70 ans) (Frontera et al. 1988 ; Porter et al. 1995 ; Hunter et al. 1999 ; Macaluso et De Vito 2004 ; Louis et al. 2011). Des gains en force isométrique et dynamique compris entre 10 et ~200 % ont été rapportés en fonction du niveau physique initial, du groupe musculaire ainsi que des caractéristiques du programme d'entraînement (régime de contraction, niveau des charges, nombre de répétitions et de séries, durée du programme). Parmi ces études, celles qui ont utilisé des charges supérieures à 60 % de la charge maximale (RM1 : une répétition maximale) du sujet ont obtenu de meilleurs résultats que celles qui ont utilisé des charges plus légères (Porter et al. 2001).

L'entrainement en force permet à la fois d'entretenir l'efficacité gestuelle (par un maintien des processus de stratégie motrice), de finaliser la synchronisation des motoneurones au cours de la contraction maximale, d'augmenter la taille des fibres et par conséquent, d'augmenter la masse musculaire (Macaluso et De Vito 2004). Bien qu'il soit difficile de comparer les adaptations liées à l'entraînement en force, chez les jeunes et les *Masters*, l'âge ne semble pas diminuer les gains de force éventuels (Frontera et al. 1988), ni empêcher l'hypertrophie musculaire (Hagerman et al. 2000).

Alors que la répétition d'exercices en force s'est avérée être un bon moyen de limiter l'importance de la sarcopénie, les effets d'exercices en endurance sont moins bien connus ; leur mise en œuvre semblant plus aisée et plus facile à proposer aux sujets âgés, il est intéressant d'évaluer leurs effets à long terme.

Synthèse

Malgré une grande variété de résultats liée à des différences de programmes d'entraînement (i.e. type d'activité, intensité, et durée), la majorité des études semble indiquer un déclin persistant de la proportion du nombre de fibres de type II avec l'âge chez le Master athlète. Cette modification de typologie musculaire avec l'âge pourrait être en partie responsable de la diminution de la force maximale volontaire et de l'ensemble des performances musculaires.

Les améliorations des performances du muscle en réponse à l'entraînement en force sont plutôt à mettre sur le compte d'adaptations neuronales se traduisant par une meilleure synchronisation des motoneurones au cours de la contraction. Les effets délétères du vieillissement sur le système neuromusculaire semblent partiellement réversibles par l'entraînement. Les effets propres de l'exercice, rapidement observés après la mise en œuvre d'un entraînement en force, sont tout d'abord à mettre sur le compte d'adaptations de l'innervation, du recrutement des différents groupes musculaires, du patron de recrutement des muscles agonistes–antagonistes au cours de mouvements complexes. Les améliorations des performances du muscle en réponse à l'entraînement en endurance sont plutôt à mettre sur le compte des adaptations métaboliques et circulatoires locales. L'entrainement aérobie limite la régression du potentiel oxydatif observée au cours du vieillissement.

I.3.G **Synthèse**

Le vieillissement est un processus inexorable qui s'accompagne d'une baisse progressive des performances musculaires. L'entraînement régulier est un moyen efficace pour limiter les effets délétères du vieillissement, mais ne permet pas de les annuler. La structure du système musculaire (masse et caractéristiques mécaniques) est modifiée. Les qualités de force, de puissance et d'endurance musculaire diminuent avec l'âge. Des facteurs génétiques et le niveau d'activité physique modulent l'amplitude de cette dégradation. La fonte musculaire provient essentiellement d'une diminution des synthèses protéiques et de la perte des unités motrices contrôlant les fibres rapides. Les modifications consécutives à un programme d'entraînement indiquent clairement que la capacité d'adaptation du système neuromusculaire est préservée au cours du vieillissement. Ces adaptations mettent en jeu des mécanismes situés non seulement au niveau du muscle mais aussi du système nerveux.

I.4 Puissance maximale aérobie et vieillissement

I.4.A **Définition**

La puissance maximale aérobie correspond à la limite maximale de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) obtenue en réponse à une augmentation de l'intensité d'un exercice. Elle permet de caractériser le potentiel aérobie d'un sujet. Cette valeur est appelée consommation maximale d'oxygène ou $\dot{V}O_{2max}$. Parmi les déterminants de la performance lors des épreuves d'endurance, $\dot{V}O_{2max}$ est sans doute le plus étudié. Selon l'équation modifiée de Fick, $\dot{V}O_{2max}$ est le produit de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}), du volume maximal d'éjection systolique (facteurs centraux), et de la différence artério-veineuse en oxygène (facteurs périphériques). La différence artério veineuse en oxygène est également influencée par une variété de facteurs, dont la masse musculaire, la capacité de transport d'oxygène du sang (volume de sang, hémoglobine) et la capacité des tissus à prendre et à utiliser l'oxygène (capillarisation, type de fibre musculaire, activité aérobie enzyme).

I.4.B **Evolution des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ chez le *Master* athlète d'endurance**

I.4.B.a Généralités

De nombreuses études descriptives se sont intéressées au déclin de la puissance maximale aérobie avec l'âge. L'une des principales limites méthodologiques dans l'interprétation des résultats est la difficulté de distinguer dans la diminution des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ la part de la diminution de l'activité physique avec l'âge et celle du vieillissement de l'organisme. Le modèle de master athlète d'endurance permet d'étudier les effets concomitants de l'activité physique et du vieillissement.

La diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'âge chez les *Masters* athlètes d'endurance est bien documentée à la fois dans des études transversales et longitudinales, pour les hommes et les femmes continuant à s'entraîner à haut niveau jusqu'à un âge avancé (Heath et al. 1981; Hagberg et al. 1985; Rogers et al. 1990; Kavanagh et Shephard 1990; Kasch et al. 1993; Hagerman et al. 1996; Fitzgerald et al. 1997; Pollock et al. 1997; Wilson et Tanaka 2000; Katzel et al. 2001; Wiswell et al. 2001; Pimentel et al. 2003; Brown et al. 2007).

La littérature indique une diminution des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ en moyenne de 10% par décennie chez les hommes et femmes de 45 à 70 ans (Buskirk et Hodgson 1987; Rosen et al. 1998; Trappe et al. 1996; Trappe 2007). Si les études descriptives du déclin de la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ chez les *Masters* athlètes d'endurance sont nombreuses, il faut rester prudent concernant les interprétations du fait de la variabilité importante des valeurs et des résultats. Des études relativement anciennes ont suggéré que le taux de diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'âge chez les *Masters* athlètes d'endurance pouvait être réduit de moitié par rapport à celui observé chez les personnes sédentaires (Hagberg et al. 1985; Heath et al. 1981; Kasch et al. 1993).

Un déclin annuel de 0,24 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$ a été observé par Buskirk et al. (1987) chez des *Masters* athlètes, correspondant à près de la moitié de celui des hommes sédentaires (0,45 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$). Dans une étude longitudinale menée sur 10, 15, 20 et 25 ans, Kasch et al. (1993) ont mesuré la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ de 12 hommes entraînés âgés de 44-79 ans. La baisse de $\dot{V}O_{2max}$ observée sur cette période de 25 ans est de 13% (soit environ 5% par décennie).

Toutefois, des études plus récentes suggèrent que le déclin de $\dot{V}O_{2max}$ en valeur absolue ne serait pas atténué chez des *Masters* athlètes d'endurance (Fitzgerald et al. 1997 ; Wilson et Tanaka 2000; Pimentel et al. 2003). En effet, Pimentel et al. (2003) observent une baisse plus importante de $\dot{V}O_{2max}$ en valeur absolue chez les sujets entraînés (Figure 17) qui présentent cependant des valeurs initiales de $\dot{V}O_{2max}$ supérieures à la normale. La diminution du volume et de l'intensité de l'entraînement peut expliquer ce résultat.

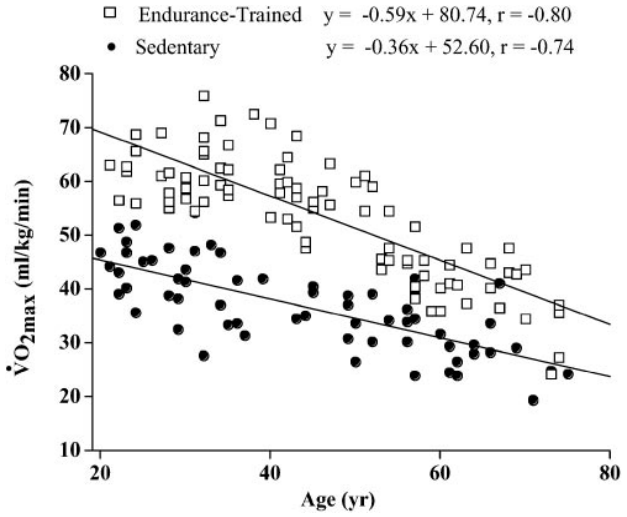


Figure 17 : Relation entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'âge chez des sujets entraînés et sédentaires (Pimentel et al. 2003).

Wilson et Tanaka (2000) ont également utilisé une méta-analyse (Figure 18) pour décrire des baisses liées à l'âge de $\dot{V}O_{2max}$ de 0,40, 0,39, et 0,46 mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1} respectivement chez des hommes sédentaires (n = 6231), actifs (n = 5261, activité d'endurance irrégulière mais environ deux fois par semaine), et entraînés en endurance (n = 1961, trois entrainements par semaine).

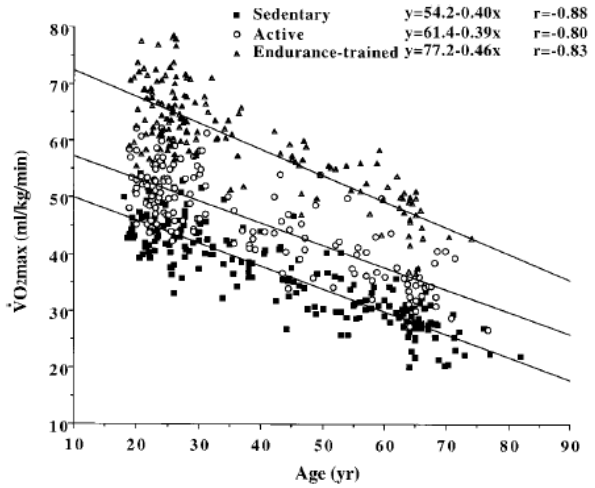


Figure 18 : Relation entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'âge chez des sujets entraînés, actifs et sédentaires (Wilson et Tanaka, 2000). Le déclin de $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas différent pour trois populations.

Par ailleurs, la pente du déclin de $\dot{V}O_{2max}$ semble dépendre de la tranche d'âge observée. Pimental et al. (2003) ont distingué deux tranches d'âge chez les sujets entraînés en endurance, la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ diminue de 0,2 mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1} entre 20 et 50 ans, ce déclin passe à 0,89 mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1} entre 50 et 74 ans (Figure 19). Ces différences peuvent s'expliquer par la diminution du volume, de la fréquence et de l'intensité d'entraînement observés chez les *Masters* athlètes d'endurance après 50 ans.

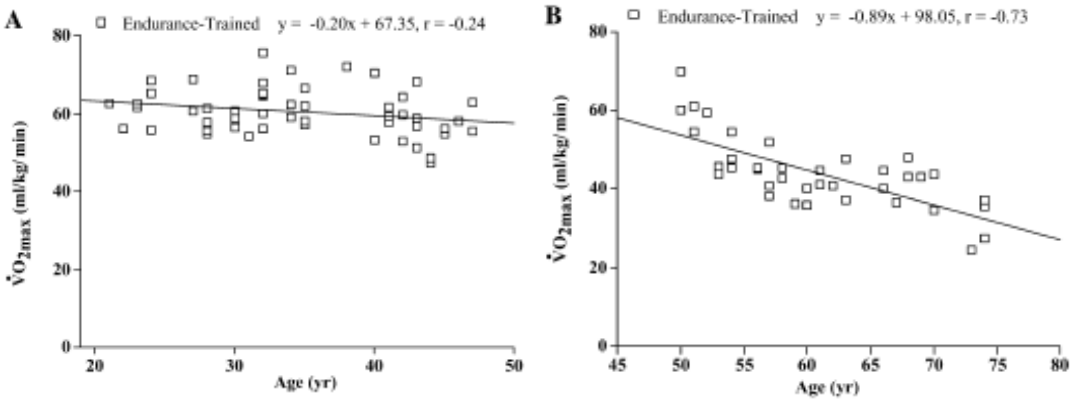


Figure 19 : Baisse de $\dot{V}O_{2max}$ en fonction de l'âge chez les sujets entraînés (Pimentel et al. 2003)(Pimentel et al. 2003)(Pimentel et al. 2003). A : entre 20 et 50 ans; B : entre 50 et 80 ans

Le déclin de $\dot{V}O_{2max}$ a été également observé chez les *Masters* athlètes en endurance féminins (Fitzgerald et al. 1997 ; Weiss et al. 2006; Brown et al. 2007). Par exemple, Fitzgerald et al. (1997) utilisant une méta-analyse observent des taux de déclin de $\dot{V}O_{2max}$ différents chez les femmes sédentaires (0,35 $mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1}$), actives (0,44 $mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1}$), et entraînés en endurance (0,62 $mL.kg^{-1}.min^{-1}.an^{-1}$).

Synthèse

Il n'existe pas de réel consensus pour les valeurs absolues de diminution de la puissance maximale aérobie chez le Master athlète d'endurance. Cependant, les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ restent supérieures chez les sujets entraînés, quel que soit l'âge.

La pente du déclin de $\dot{V}O_{2max}$ semble plus importante après 50 ans.

I.4.B.b Déclin de $\dot{V}O_{2max}$ en valeur relative

Comparé à une population sédentaire, les valeurs de déclin de $\dot{V}O_{2max}$en valeur relative (en % de $\dot{V}O_{2max}$) observé chez le *Master* athlète d'endurance sont réduites ou similaires suivants les études (Kasch et al. 1993; Kasch et al. 1995; Trappe et al 1996; Pollock et al 1997; Katzel et al. 2001; Pimentel et al. 2003). Dans une étude longitudinale, Trappe et al. (1996) ont étudié un groupe de 53 sujets coureurs de fond, très entraînés. Vingt-deux ans plus tard, ces sujets ont été catégorisés en fonction de leur âge et de leur niveau d'entraînement : très entraînés (n = 10), en forme et entraînés (n = 18), sédentaires (n = 15) et plus âgés (n = 10). Une diminution significative de $\dot{V}O_{2max}$ de 6, 10, 15, et 15% par décennie a été observée respectivement pour les groupes très entraînés, en forme et entraînés, sédentaires et plus âgés entre les deux évaluations. Dans une étude longitudinale similaire, Katzel et al. (2001) rappportent un déclin relatif de $\dot{V}O_{2max}$ chez 41 coureurs à pied d'endurance de 2,6% (très entraînés, n = 7), 4,6% (entraînés, n = 21) et 4.7% (faiblement entraînés, n = 13). Toutefois, dans des études plus récentes, Wiswell et al. (2001) ainsi que Pimentel et al. (2003) observent un déclin relatif similaire entre les sujets entraînés et sédentaires (Figure 20).

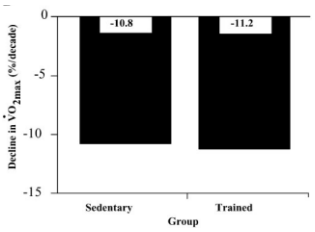


Figure 20 : Baisse de $\dot{V}O_{2max}$ par décennie en valeur relative ou pourcentage (Pimentel et al. 2003)

Synthèse

Les valeurs de diminution relative de la puissance maximale aérobie (en % $\dot{V}O_{2max}$) chez les Masters athlètes d'endurance sont très variables selon les études (valeurs comprises entre 6% et 11,2% par décale). Les mécanismes précis d'adaptation à l'entraînement en fonction de l'âge ne sont pas encore totalement connus et pourraient expliquer les différences de résultats observés entre les études. Par rapport à une population sédentaire, la diminution relative de $\dot{V}O_{2max}$ est réduite ou similaire mais supérieure au déclin de la performance (en %). Cette dernière observation suggère que d'autres facteurs de la performance interviennent dans l'altération des performances avec l'âge.

I.4.B.c Effet de l'entraînement sur les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$

Il est généralement admis que l'entraînement bien conduit contribue à augmenter les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$. Chez le sujet sédentaire, il se traduit par une augmentation notable jusqu'à la 8^{ième} décennie (Hagberg et al. 1989). Deux autres études montrent que pour les deux sexes, l'entraînement permet d'obtenir un gain de $\dot{V}O_{2max}$ indépendamment de l'âge et du sexe (Kohrt et al. 1991; Pollock et al. 1997) pour des sujets âgés de 21-25 ans et 60-71 ans. Malgré des valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ plus faibles chez les *Masters* athlètes, le gain en valeur absolue est de 5,5 à 6 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ dans les deux groupes pour un entraînement de 9 à 12 mois. Exprimé en valeur relative, ce gain est supérieur pour les hommes (21%) que pour les femmes (19%).

Plus récemment, Billat et al. (2004) ont observé une légère augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ chez 11 *Masters* athlètes d'endurance en course à pied (48 ± 2.9 ans) après six semaines d'entraînement. L'effet de l'entraînement sur le *Master* athlète d'endurance comme sur l'athlète d'endurance reste limité. Il a été montré que $\dot{V}O_{2max}$ augmente essentiellement pendant les 12 premières semaines d'un entraînement spécifique. Au-delà, si le gain de $\dot{V}O_{2max}$ est modeste, les pratiquants continuent malgré tout à améliorer leurs performances en endurance en développant leur capacité à travailler à un pourcentage plus élevé de leur $\dot{V}O_{2max}$. L'entraînement semble produire les mêmes effets sur l'aptitude aérobie quel que soit l'âge (Billat et al. 2004).

L'amplitude de l'augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ est très variable et dépend du niveau initial de puissance maximale aérobie (Meredith et al. 1989; Kohrt et al. 1991 ; Denis et Chatard 1994). Denis et Chatard (1994) ont regroupé les données des deux études précédemment citées pour

exprimer le pourcentage d'augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ ($\Delta\% \dot{V}O_{2max}$) suite à un entraînement réalisé à partir des valeurs initiales de $\dot{V}O_{2max}$. L'entraînement permettrait d'augmenter la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ avec une amplitude inversement proportionnelle à la valeur initiale (Figure 21).

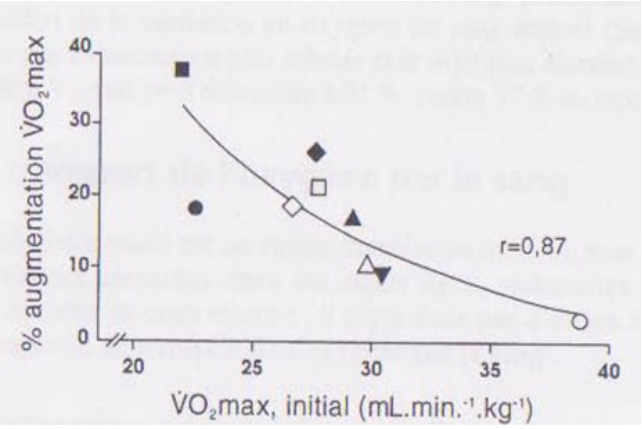


Figure 21 : Relation entre l'augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'un entraînement à l'exercice d'endurance et $\dot{V}O_{2max}$ initial chez des sujets d'un âge moyen supérieur à 60 ans obtenue à partir de données de la littérature (Denis et Chatard 1994).

Chez le sujet jeune, l'amélioration de $\dot{V}O_{2max}$ serait associée à une augmentation du débit cardiaque alors que chez les sujets âgés, l'augmentation serait liée à une amélioration plus importante de la capacité d'extraction et d'utilisation de l'O_2 par les muscles actifs (Saltin 1986; Coggan et al. 1992; Proctor et al. 1998). Cela suggère que les facteurs périphériques joueraient un rôle plus important chez les personnes âgées.

Synthèse

A défaut d'améliorer la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ dans la durée, l'entraînement pourrait-il en limiter le déclin consécutif aux effets du vieillissement ? Si la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ apparaît comme inévitable avec l'âge, le maintien de l'entraînement semble jouer un rôle atténuateur tant en déclin relatif qu'en valeur absolue au moins jusqu'à 70 ans. Cette hypothèse conforte l'importance de favoriser le développement de la capacité maximale aérobie chez les jeunes. L'observation dans la durée des effets du vieillissement sur les facteurs limitant de $\dot{V}O_{2max}$ chez le Master athlète d'endurance devrait permettre de mieux comprendre les effets concomitants du vieillissement et de l'entraînement.

I.4.C *Master* athlète d'endurance et facteurs limitant de $\dot{V}O_{2max}$

I.4.C.a Généralités

Pour décrire le déclin de $\dot{V}O_{2max}$ lié à l'âge, il semble nécessaire d'étudier les effets du vieillissement sur chacun des facteurs déterminants de la puissance maximale aérobie chez les *Masters* athlètes d'endurance et d'en évaluer les contributions. En d'autres termes, il s'agit de décrire les effets du vieillissement chez le *Master* athlète sur les :

- facteurs ventilatoires correspondant au fonctionnement des poumons ;

- facteurs centraux correspondant au fonctionnement du cœur ;

- facteurs périphériques comprenant d'une part, les facteurs vasculaires ; d'autres part, ceux d'ordre cellulaire ;

- facteurs anthropométriques (quand $\dot{V}O_{2max}$ est normalisé par unité de masse corporelle).

I.4.C.b Fonction ventilatoire et Master athlète

I.4.C.b.1 Généralités

Les effets du vieillissement de la fonction ventilatoire affectent la mécanique ventilatoire et les échanges gazeux. Hormis les études disponibles qui investiguent l'hypoxémie au cours de l'exercice chez les vétérans sportifs, le vieillissement de la fonction ventilatoire du *Master* athlète d'endurance n'est pas décrit à notre connaissance. Le vieillissement de la fonction ventilatoire ne peut donc être abordé que de manière générale. Il a fait l'objet d'une récente revue de littérature réalisée par Guénard et Rouatbi (2002). Du fait de la variabilité importante des valeurs de référence chez les sujets âgés, l'interprétation de modifications de la fonction ventilatoire, ne serait-ce que la spirométrie, doit rester très prudente.

I.4.C.b.2 Mécanique pulmonaire et vieillissement

Volumes et débits maximaux

La taille est considérée comme le déterminant prédictif majeur de la fonction pulmonaire quel que soit l'âge (Enright et al. 1993). Les volumes pulmonaires mobilisables diminuent avec l'âge alors que la capacité pulmonaire totale reste stable (Dockery et al. 1985). La capacité vitale diminue avec l'âge car la cage thoracique se rigidifie par suite des modifications

causées par l'arthrose, l'ostéoporose et les calcifications cartilagineuses. Mais, le volume résiduel augmente. Si les grosses bronches ne sont pas l'objet de changements majeurs, les canaux alvéolaires se dilatent nettement par la perte de fibres élastiques. On observe une augmentation de la dimension des sacs alvéolaires et une diminution de la densité capillaire (Mahler et al. 1986).

La masse pulmonaire ne semble pas varier avec l'âge (Guenard et al. 1992). Le nombre de sacs alvéolaires diminuant avec l'âge, ainsi que la densité capillaire, ce maintien de la masse pulmonaire ne peut-être attribué qu'à un épaississement du parenchyme ou plus probablement des parois bronchiques.

La diminution du volume expiratoire maximum seconde (VEMS) est estimée à en moyenne 30 ml/an à partir de l'âge de 30 ans (Dockery et al. 1985 ; Enright et al. 1993) et 50 ml/an à partir de 50 ans (Guenard et Rouatbi 2002). Cependant, la variabilité dans les études de la fonction pulmonaire en fonction de l'âge est importante.

Elasticité thoraco-pulmonaire

La représentation de la courbe débit - capacité vitale d'expiration forcée où les débits sont exprimés en les rapportant à la capacité pulmonaire totale et les volumes pulmonaires en % de la capacité vitale, permet de s'affranchir des différences de taille des individus. Elle est particulièrement intéressante car elle montre que ces débits relatifs changent peu avec l'âge. Cependant, les débits relatifs en fin d'expiration forcée apparaissent légèrement diminués (Knudson et al. 1977). La courbe débit - volume s'aplatit modérément. Les pertes en volumes et débits du vieillissement sont liées à des modifications d'élasticité des tissus thoracopulmonaires. Les variations de volume pulmonaire induites par les variations de pression sont fonction de la distensibilité (variation de volume en fonction de la variation de pression) de la structure. Si la pression autour du poumon diminue, le volume pulmonaire augmente. La variation de volume par unité de variation de pression ($\Delta V/\Delta P$), qui mesure la distensibilité pulmonaire, est appelée **compliance.** La distensibilité du thorax et des muscles respiratoires diminue avec l'âge, ce qui devrait entraîner, pour une ventilation donnée, une augmentation du travail thoracique respiratoire et une réduction de l'ampliation thoracique respiratoire (Estenne et al. 1985). Alors que la distensibilité thoracique diminue, la distensibilité pulmonaire augmente (Knudson et al. 1977). Ce changement des propriétés élastiques du thorax et des poumons a plusieurs conséquences.

La première est l'augmentation du volume de relaxation thoraco-pulmonaire, c'est-à-dire de la position pour laquelle les forces élastiques de distension thoracique équilibrent celles de rétraction du poumon. Ce volume de relaxation correspond à la capacité résiduelle fonctionnelle au repos qui est par conséquent augmentée. La seconde conséquence est la diminution du calibre des petites bronches qui, étant relativement compliantes, ne sont plus maintenues béantes par les forces élastiques de rétraction du parenchyme pulmonaire. Ceci a comme conséquence l'augmentation, linéaire avec l'âge, de la capacité de fermeture, du volume de fermeture et du volume résiduel (Wahba 1983).

Muscles respiratoires

La diminution de la force des muscles respiratoires, en rapport avec les modifications de structure des muscles squelettiques, font que les pressions inspiratoire et expiratoire maximales diminuent à partir de 50 ans (Mahler et al. 1986). La dispersion de ces pressions, pour un âge donné, est importante. Les pressions développées par le diaphragme changeraient peu avec l'âge (Watsford et al. 2007).

Récemment, Watsford et al. (2007) ont étudié l'effet de l'âge sur les muscles respiratoires en mesurant à la fois la force des muscles respiratoires (à l'inspiration et à l'expiration), l'endurance musculaire à l'inspiration et une performance sur un test de marche de 1,6 km pour un groupe d'hommes et de femmes âgés de 50 à 79 ans. Aucun effet du genre n'a été observé. Une réduction de la force des muscles respiratoires est observée à la fois à l'inspiration et à l'expiration par la mesure des pressions maximales. Par ailleurs, l'endurance musculaire à inspiration diminue aussi avec l'âge. Dans la même étude, la diminution de la performance réalisée lors d'un test de marche est corrélée avec le déclin de l'endurance musculaire respiratoire. L'entraînement pouvant faire augmenter ces valeurs de pression, l'exploration fonctionnelle des muscles respiratoires du *Master* athlète apporterait un complément d'informations important.

La ventilation pulmonaire et le transport de l'oxygène dans l'organisme nécessitent de l'énergie : 2% environ de l'énergie totale consommée par l'organisme au repos. Plus de 15% de l'oxygène consommé pendant un exercice de natation à vitesse élevée peut être attribué au diaphragme, aux muscles thoraciques et abdominaux pour ventiler les poumons. Pendant la récupération après l'exercice, le travail ventilatoire continue à imposer une demande énergétique notable, utilisant 9 à 12% de l'oxygène consommé (Costill et al. 1994).

La part du coût énergétique de la ventilation chez le *Master* athlète ou de son évolution avec l'âge n'a pas encore fait l'objet d'étude. Les effets du vieillissement induisent des contraintes sur la mécanique ventilatoire (diminution des volumes mobilisables, diminution de la compliance pulmonaire et thoracique, diminution de force des muscles respiratoires) qui pourraient induire une augmentation du coût énergétique de la ventilation avec l'âge.

I.4.C.b.3 Diminution de la capacité d'échanges gazeux du poumon

La diffusion pulmonaire n'est pas modifiée au repos et à l'exercice par l'entraînement. Elle est améliorée à l'effort maximum, probablement par une augmentation du flux sanguin et par une meilleure implication des alvéoles (réduction des inhomogénéités). Les effets du vieillissement en général tendent à diminuer la capacité de diffusion ou d'échanges gazeux du poumon expliquée par :

- Une diminution de la pression alvéolaire de O_2 (pression alvéolaire de O_2) baisse avec l'âge (Knudson et al. 1977) ;
- Une augmentation de l'hétérogénéité de la ventilation perfusion $\dot{V}_A/\dot{Q}$ (Cardus et al. 1997) ;
- Une diminution de la surface d'échange alvéolaire (Sherrill et al. 1999).

I.4.C.b.4 Adaptations respiratoires à l'exercice physique

La diminution de la capacité d'échanges gazeux du poumon peut entraîner une diminution de SaO_2 à l'exercice. Celle-ci est d'autant plus marquée que l'exercice est intense ou le sujet plus entraîné. Chez le sujet sain, SaO_2 passe de 97% à 91% à $\dot{V}O_{2max}$. A l'exercice, les besoins en oxygène peuvent devenir tellement importants qu'une diminution de la saturation en O_2 de l'hémoglobine artérielle pourrait subvenir plus précocement chez le sujet âgé. L'hypoxémie est observée chez 40 à 50% des athlètes d'endurance de haut niveau (Préfaut et al. 1994). Ce n'est jamais le cas chez les sportifs modérément entraînés. Le système respiratoire est bien adapté chez le sujet jeune pour satisfaire à la demande, que l'exercice soit bref ou prolongé.

Hypoxémie au cours de l'exercice chez les vétérans sportifs

Classiquement, il n'existe pas de limitation ventilatoire au cours de l'exercice. Pourtant, la vitesse maximale de diffusion de l'oxygène au travers de la membrane alvéolo - capillaire est un facteur pouvant limiter la $\dot{V}O_{2max}$. Une désaturation de l'oxyhémoglobine lors d'un exercice exhaustif a été observé chez l'athlète jeune de haut niveau (dit extrême) dont la $\dot{V}O_{2max}$ est supérieure à 65 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ (Dempsey et al. 1984) mais aussi chez le sportif vétéran

(Préfaut et al. 1994). Le vieillissement pulmonaire pourrait donc devenir un facteur limitant la performance chez le *Master* athlète d'endurance.

I.4.C.b.5 Synthèse

Le vieillissement pulmonaire se manifeste par une dégradation globale de la fonction respiratoire très variable selon l'individu. La diminution de la compliance pulmonaire, de la compliance thoracique et la réduction de volume des muscles respiratoires rendent compte de la réduction de la capacité ventilatoire au cours du vieillissement. On constate une augmentation du volume aérien non mobilisable en fin d'expiration et une réduction du calibre des bronches distales qui diminue les débits expiratoires (VEMS). La fonction respiratoire d'échanges gazeux est dépendante de la mécanique ventilatoire. La capacité de diffusion de l'oxygène et la pression partielle en oxygène du sang artériel (PaO_2) diminuent progressivement avec l'âge. Le taux de déclin de la capacité de diffusion pulmonaire varie de 4 à 8% par décennie (surtout à partir de 40 ans). Si chez le sujet jeune et sain, la fonction ventilatoire n'apparait pas comme un facteur limitant, elle pourrait le devenir chez le Master athlète d'endurance. La part du coût énergétique de la ventilation chez le Master athlète ou de son évolution avec l'âge n'a pas encore fait l'objet d'étude.

I.4.C.c Fonction cardiaque et Master athlète

I.4.C.c.1 Généralités

La baisse du débit cardique maximal est la principale conséquence fonctionnelle du vieillissement (McElvaney et al. 1989). Chez le sujet sain, le débit cardiaque au repos ou pour un exercice donné de faible intensité est identique à 20 ans et à 80 ans (Rodeheffer et al. 1984). Le maintien du débit cardiaque au repos ou à l'exercice sous maximal n'empêche pas sa diminution avec l'âge (Figure 22) à l'exercice maximal (Lakatta 1993).

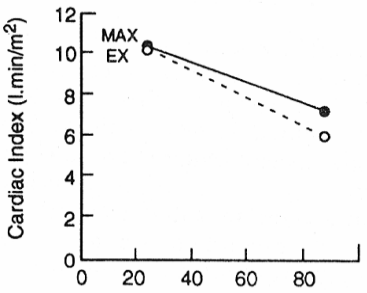


Figure 22: Evolution du débit cardiaque maximal (indexé à la surface corporelle) en fonction de l'âge. —: hommes, - - : femmes (Lakatta 1993).

La cause en serait la diminution du volume d'éjection systolique, mais surtout la baisse de la fréquence cardiaque à l'effort.

I.4.C.c.2 Diminution de la fréquence cardiaque maximale

La diminution de FC_{max} avec l'âge a été largement observée chez les *Masters* athlètes d'endurance, hommes et femmes (Fuchi et al. 1989 ; Fritzgerald et al. 1997; Tanaka et Seals 1997 ; Wilson et Tanaka 2000 ; Hawkins et al. 2001 ; Brown et al. 2007). La FC_{max} est inversement liée à l'âge chez les hommes et les femmes, sans différence observée entre les sexes.

Wilson et Tanaka (2000) ont utilisé une méta-analyse pour décrire des baisses liées à l'âge de FC_{max} chez les hommes sédentaires (n = 6231), actifs (n = 5261), et entraînés en endurance (n = 1961) (i.e. un niveau d'entraînement supérieur à trois fois par semaine pendant plus d'un an) sans observer de différence entre les populations (Figure 23).

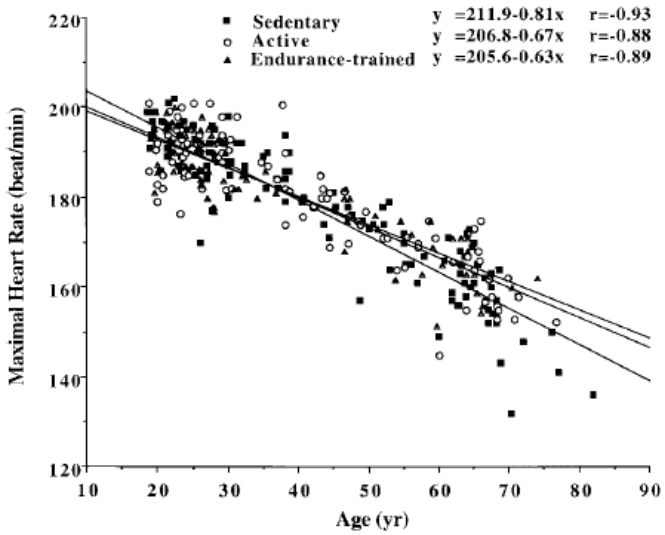


Figure 23 : Relation entre FC_{max} et l'âge chez des sujets entraînés, actifs et sédentaires (Wilson et Tanaka, 2000)

Dans une autre étude longitudinale, portant sur plus de 25 ans, Kasch et al. (1993) ont étudié 12 hommes âgés (44-79 ans) pratiquant des activités physiques (marche, jogging, vélo, natation) en moyenne 4,6 fois par semaine pendant 66 min à 81% de la FC de réserve. Au cours des 25 ans, une baisse significative de FC_{max} (15 bpm) et du volume d'éjection systolique (13 mL) ont été observés (Kasch et al. 1993).

Selon Tanaka et al. (2001), FC_{max} déclinerait de ~ 0,7 bpm par an à partir de l'âge adulte, autant chez des personnes sédentaires, qu'actives ou entraînées en endurance (Tanaka et al. 2001). Cette régression est différente de l'équation traditionnelle « Formule d'Astrand » (1960) d'estimation de la fréquence cardiaque maximale en fonction de l'âge FC_{max} (estimée) = 220 – âge ou d'autres études qui prévoient un déclin de 1 $bpm.an^{-1}$ après l'âge de 10 ans (Kavanagh et Shephard 1990; Pollock et al. 1997; Katzel et al. 2001; Pimentel et al. 2003).

Le déclin de FC_{max} d'un individu semble indépendant de la pratique d'une l'activité physique. La diminution de FC_{max} s'explique par la modification des mécanismes de couplage excitation/contraction subissant avec l'âge un ralentissement des mouvements du calcium. Il en résulte un allongement de la contraction et de la relaxation. Cette diminution serait liée à deux facteurs : un temps de contraction plus lent, dû au changement des isoformes de la myosine; et une augmentation de la durée de la phase de relaxation parallèlement à la diminution du calcium ATPase dans le réticulum sarcoplasmique (Tate et al. 1994).

I.4.C.c.3 Volume maximal d'éjection systolique

La majorité des études rapportent un déclin du volume maximal d'éjection systolique (VES_{max}) avec l'âge aussi bien chez des personnes sédentaires qu'entraînées en endurance et dans les mêmes proportions pour les hommes et les femmes (Rivera et al. 1989; Ogawa et al. 1992; Wiebe et al. 1999; Hagmar et al. 2005). Une réduction de VES_{max} a pu être observée chez les *Masters* athlètes d'endurance (Ogawa et al. 1992; Wiebe et al. 1999).

Ogawa et al. (1992) ont étudié en fonction de l'âge le débit cardiaque et la FC au cours de deux tests sur tapis roulant (sous maximal et maximal) effectués par 2 groupes d'hommes et de femmes entraînés en endurance. Une baisse significative liée à l'âge de VES_{max} chez les sujets entraînés hommes et femmes a été observée. Un déclin avec l'âge de FC et de VES_{max} a également été observé à l'effort maximal chez 23 femmes entraînées en endurance âgées de 20 à 63 ans (Wiebe et al. 1999). Par ailleurs, la diminution de VES_{max} chez *Masters* athlètes d'endurance pourrait être atténuée par l'entraînement (Lakatta 1993).

I.4.C.c.4 Volume sanguin

L'entraînement en endurance engendre une hypervolémie (20-25%) (Convertino 1991; Convertino et Ludwig 2000). Cette hypervolémie permet une meilleure stabilité cardiovasculaire au cours de l'exercice et lors des changements de posture (Convertino 2007). Des corrélations élevées ont été observées entre la $\dot{V}O_{2max}$ et le volume sanguin chez des jeunes (Convertino 1991) et des *Masters* athlètes masculins (Hagberg et al. 1998) et féminins (Stevenson et al. 1994), tous étant entraînés en endurance et présentant des valeurs élevées de $\dot{V}O_{2max}$ (Convertino et Ludwig 2000). La majorité des études transversales portant sur l'effet du vieillissement sur le volume sanguin conclue à une diminution chez des sujets sains (Convertino et Ludwig 2000 ; Davy et Seals 1994). Cependant, Hagberg et al. (1998) ont montré que, comparativement aux sédentaires, les *Masters* athlètes présentant des valeurs $\dot{V}O_{2max}$ significativement plus élevées, se caractérisent également par des valeurs plus grandes de volume plasmatique (46 vs 38 $mL.kg^{-1}$), de globules rouges (30 vs 26 $mL.kg^{-1}$) et de sang total (76 vs 64 $mL.kg^{-1}$). Par ailleurs, pour l'ensemble du groupe, il est noté une corrélation significative entre les volumes de plasma, de globules rouges, de sang total et de $\dot{V}O_{2max}$. Les valeurs de VES_{max} sont également corrélées avec les variables du volume sanguin.

Synthèse

L'analyse des études transversales et longitudinales suggèrent que la diminution de FC_{max} contribue principalement à la baisse du débit sanguin et donc de $\dot{V}O_{2max}$ chez les Masters athlètes d'endurance. L'incidence des diminutions de VES_{max} et du volume sanguin ne peut cependant pas être écartée.

I.4.C.d Facteurs périphériques et Master athlète

Alors que les facteurs centraux concernent le fonctionnement du système cardiaque, les facteurs périphériques sont liés au système d'extraction et d'utilisation de l'oxygène au niveau des muscles actifs. Selon l'équation de Fick (1870) [$\dot{V}O_{2max} = \dot{Q}c_{max}$ x $DavO_{2max}$], $\dot{V}O_{2max}$ est le produit de facteurs centraux mais aussi de la différence artério-veineuse en O_2 (i.e. facteurs périphériques). La différence artério-veineuse en O_2 (notée, $DavO_2$) reflète la capacité des muscles squelettiques actifs et des muscles respiratoires d'extraire et de consommer l'O_2 provenant du sang artériel afin de produire de l'énergie (i.e. ATP) nécessaire à leur contraction (Tanaka et Seals 2008). La diminution liée à l'âge de la différence artério veineuse en oxygène est rapportée dans différentes études (Rivera et al. 1989; Tanaka et Seals 2003) et semble étroitement liée à :

- des facteurs vasculaires : la capillarité musculaire ;

- des facteurs musculaires comme : la masse musculaire ou la quantité de mitochondries présentes au niveau musculaire, dont l'activité dépend aussi d'enzymes oxydatives (oxydases et déshydrogenases).

Les données de la littérature indiquent une diminution prononcée de la $DavO_2$ avec l'âge chez des personnes sédentaires, concomitante avec une diminution de la densité du réseau de capillaires et de l'activité des enzymes mitochondriales (Coggan et al. 1992). Une faible réduction de 8-10% de $DavO_2$ a également été enregistrée sur une période de ~30 ans chez des *Masters* athlètes (Hagberg et al. 1985; Saltin 1986; Rivera et al. 1989; Tanaka et Seals 2003). Face à ce constat, plusieurs études ont tenté de comprendre si le déclin de $DavO_2$ avec l'âge était plutôt lié à une altération de la capacité d'extraction de l'O_2 par les muscles ou plutôt lié à une limitation dans la fourniture en O_2 (Saltin 1986; Coggan et al. 1992; Proctor et al. 1998; Betik et Hepple 2008).

I.4.C.d.1 Facteurs vasculaires

De nombreux facteurs pourraient altérer la fourniture en O_2 des muscles actifs, tels que le déclin du débit cardiaque (McElvaney et al. 1989) et une réduction de la conductance vasculaire (Proctor et al. 1998; Lawrenson et al. 2003 ; Wilson et al. 2010). Avec l'âge, l'aorte et les gros vaisseaux deviennent plus rigides à cause de l'accumulation de tissu collagène associée à une diminution de la densité des fibres élastiques dans la couche moyenne du vaisseau. Ces changements de structure affectent la fonction cardiaque en altérant l'impédance d'éjection ventriculaire gauche. Cette augmentation de la rigidité constitue l'un des facteurs qui limitent $\dot{V}O_{2max}$. L'entraînement en endurance permet de réduire cette augmentation des résistances périphériques (Wilson et al. 2010).

I.4.C.d.2 Facteurs musculaires

Un déclin de $DavO_2$ pourrait être engendré par une perte de masse musculaire liée à l'âge (Fleg et Lakatta 1988), ou encore par des modifications du fonctionnement musculaire. Le déclin de la puissance maximale aérobie et de $DavO_2$ pourrait être expliqué par la réduction de la masse musculaire squelettique. Fleg et Lakatta (1988) ont mesuré pendant 24 h l'excrétion urinaire de la créatinine (un indice de masse musculaire) chez 184 sujets âgés de 22-87 ans à partir d'une étude longitudinale sur le vieillissement. Une corrélation positive significative entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'excrétion de la créatinine chez les hommes et les femmes a été observée. Si l'on corrige la $\dot{V}O_{2max}$ par le taux d'excrétion de créatine (qui reflète la masse musculaire), on atténue très nettement sa régression en fonction de l'âge montrant ainsi la relation le déclin de $\dot{V}O_{2max}$ et l'amyotrophie induite par le vieillissement. Le vieillissement normal est fortement caractérisé par une atrophie musculaire due à une diminution en taille et en nombre de fibres musculaires, en particulier de fibres de type II (Lexell 1995 ; Brunner et al. 2007). Par ailleurs, la capacité d'extraction de l'O_2 par les muscles actifs serait similaire entre jeunes et *Masters* (Saltin 1986). D'autres études ont enregistré un même niveau d'activité des enzymes oxydatives au niveau des muscles actifs, ainsi qu'un réseau de capillaires comparable (exprimées par la surface occupée ou par fibre) entre athlètes jeunes et *Masters* (Coggan et al. 1992; Proctor et al. 1998). Le muscle squelettique présente des possibilités de plasticité structurale et fonctionnelle sous l'effet de l'entrainement en endurance capables d'atténuer la diminution de la masse musculaire, le déclin de $DavO_2$ et donc de $\dot{V}O_{2max.}$

I.4.C.e Caractéristiques anthropométriques et Master athlète

Le vieillissement s'accompagne d'une augmentation de la proportion de tissu adipeux chez les sujets sédentaires, passant de 12% entre 20 et 25 ans, à 25% à 75 ans. Chez la femme, les valeurs correspondantes sont comprises entre 20 et 30%. Cette augmentation se traduit par une accumulation de masse grasse préférentiellement au niveau de la racine des membres et du tronc, surtout au niveau de l'abdomen et par une augmentation de la masse corporelle. Les modifications de la composition corporelle sont impliquées dans le déclin des performances d'autant qu'une part de l'énergie mécanique est utilisée pour vaincre la gravité en course à pied ou en cyclisme (selon le profil du parcours). Ces modifications de la composition corporelle sont dues pour une grande part à la réduction de l'activité physique et à une évolution du comportement alimentaire. Pour comparer les caractéristiques anthropométriques des *Masters* athlètes d'endurance à des jeunes, Wilson et Tanaka (2000) ont rassemblé les données de 242 études, analysant 538 groupes de personnes, et 13828 personnes d'âge et d'activité différents (Tableau 4). Ils ne présentent pas ou très peu de modifications de masse corporelle.

	Groupes d'âge, ans					
	20–29	**30–39**	**40–49**	**50–59**	**60–69**	**>70**
			Sujets sédentaires			
Nb de groupes	76	31	22	26	50	9
Age (ans)	24 ± 3	34 ± 3	45 ± 3	55 ± 3	65 ± 2	74 ± 4
Taille (cm)	176 ± 5	177 ± 4	174 ± 5	176 ± 2	173 ± 5	172 ± 3
Masse (kg)	73,7 ± 8,1	77,8 ± 6,1	78,0 ± 7,7	81,1 ± 5,8	78,5 ± 7,0	75,0 ± 4,9
Masse grasse (%)	17 ± 4	20 ± 3	20 ± 3	22 ± 4	23 ± 5	25 ± 0
			Sujets actifs			
Nb de groupes	80	18	17	16	25	3
Age (ans)	24 ± 3	34 ± 4	45 ± 3	56 ± 3	65 ± 3	73 ± 3
Taille (cm)	176 ± 5	174 ± 6	177 ± 3	176 ± 4	175 ± 3	174 ± 1
Masse (kg)	73,2 ± 5,4	76,8 ± 6,9	78,5 ± 4,4	76,5 ± 3,6	75,9 ± 3,9	74,4 ± 2,5
Masse grasse (%)	15 ± 3	18 ± 4	21 ± 5	21 ± 4	21 ± 4	30 ± 0
			Sujets entraînés en endurance			
Nb de groupes	93	16	14	14	25	3
Age (ans)	25 ± 3	34 ± 2	46 ± 2	56 ± 3	64 ± 2	72 ± 2
Taille (cm)	178 ± 3	176 ± 5	171 ± 7	171 ± 7	171 ± 6	168 ± 9
Masse (kg)	69,8 ± 4,5	67,9 ± 5,0	65,8 ± 7,9	65,4 ± 6,1	66,7 ± 6,8	62,4 ± 5,0
Masse grasse (%)	10 ± 3	12 ± 2	13 ± 2	13 ± 3	14 ± 3	14 ± 2

Tableau 4 : Caractéristiques anthropométriques (moyennes ± écartype) d'athlètes masters entraînés en endurance, comparés à des jeunes. Données moyennes provenant de 242 études, analysant 538 groupes de personnes, et 13828 personnes d'âge et d'activité différents. (D'après Wilson et Tanaka, 2000).

Les modifications de la masse corporelle ou de la masse maigre sont donc impliquées dans le déclin de la puissance maximale aérobie lorsque $\dot{V}O_{2max}$ est rapporté à la masse corporelle ou à la masse maigre. Lorsque $\dot{V}O_{2max}$ est rapporté à la masse maigre, sa diminution avec l'âge est réduite de trois quarts ; par ailleurs la différence entre les sexes disparaît. Ceci met en évidence les liens qui existent entre $\dot{V}O_{2max}$ et l'aptitude du muscle à consommer l'oxygène. Ce n'est pas tant l'effet de l'âge sur la masse, mais plutôt sur la composition corporelle qui contribue au déclin de $\dot{V}O_{2max}$.

I.4.D **Synthèse**

Chez les Masters athlètes d'endurance, hommes ou femmes, la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ liée à l'âge contribue au déclin de la performance en endurance.

Comme chez l'athlète extrême, le Master athlète pourrait sujet à une limitation ventilatoire (HIE). Cependant, la diminution de $\dot{V}O_{2max}$ avec l'âge semble liée à une diminution de FC_{max} plutôt qu'à des changements de VES_{max} ou du volume sanguin.

La baisse de $\dot{V}O_{2max}$ observée dépend à la fois du volume et de l'intensité de l'entraînement des sujets, de la tranche d'âge et de l'hétérogénéité du groupe étudié. Toutefois, le déclin avec l'âge des performances en endurance semble légèrement moins important que la baisse de $\dot{V}O_{2max}$. Cela laisse à penser que d'autres facteurs physiologiques importants contribuent au déclin de la performance d'endurance comme l'endurance aérobie ou le coût énergétique de la locomotion. Par ailleurs, chez des athlètes de même $\dot{V}O_{2max}$, une variabilité des performances est observée, elle s'explique par une variabilité inter-individuelle d'autres facteurs tels que l'endurance aérobie ou l'efficience énergétique.

I.5 Endurance aérobie et vieillissement

I.5.A **Définition**

Une puissance maximale aérobie élevée ($\dot{V}O_{2max}$) permet la réalisation d'un effort très intense mais de durée relativement brève de 2 à 8 minutes maximum (Astrand et Saltin 1961). La performance d'endurance ne dépend pas uniquement de $\dot{V}O_{2max}$, mais aussi du niveau d'intensité que l'athlète peut maintenir pendant une durée plus importante, de 30 minutes à plusieurs heures. L'endurance aérobie ($F\dot{V}O_{2max}$) se définit comme l'aptitude de l'athlète à utiliser un $\%\dot{V}O_{2max}$ pendant une longue durée (Mercier et al. 1984 ; Péronnet et Thibault 1984). Si cette notion d'endurance aérobie est aisément définissable, son évaluation précise reste complexe et plusieurs méthodes sont proposées pour l'estimer.

I.5.B **Détermination de l'endurance aérobie**

Dans une revue de littérature, Bosquet et al. (2000) présentent les méthodes de détermination de l'endurance aérobie. Les méthodes directes mesurent essentiellement la durée de maintien d'effort (i.e., le temps « limite » d'un exercice réalisé à un $\%\dot{V}O_{2max}$). Un manque de reproductibilité des résultats est constaté, probablement lié à des facteurs psychologiques tels que la motivation, la monotonie et la lassitude (Jeukendrup et al. 1996). Néanmoins, de nombreux travaux ont étudié l'évolution de la fraction d'utilisation de $\dot{V}O_{2max}$ avec le temps. Plusieurs modèles (Figure 24) ont été définis mettant en mis en évidence une relation curvilinéaire pour les efforts de courte et moyenne durée, et une relation linéaire pour les efforts de longue durée.

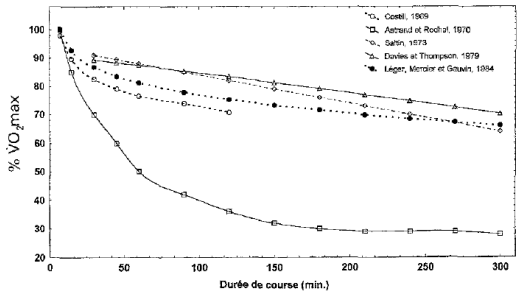


Figure 24 : Diminution de la fraction d'utilisation de $\dot{V}O_{2max}$ avec le temps : comparaison des différents modèles (d'après Léger et al. 1986).

Les méthodes de mesure indirecte de l'endurance aérobie utilisent la relation qui existe entre l'endurance et certaines variables biologiques telles que la lactatémie, la fréquence cardiaque et des paramètres ventilatoires. Cette relation est utilise les notions de seuils.

I.5.C **Notion de seuils**

Wasserman et al. (1967) ont théorisé ce concept de seuil en décrivant deux cassures sur la courbe de la ventilation en fonction de la charge. Depuis, la littérature foisonne de termes décrivant ce phénomène. La terminologie de l'endurance aérobie dans la littérature prête donc à confusion.

Dans notre étude, la terminologie retenue pour la détermination des seuils est celle adoptée par la Société Française de Médecine du Sport en 2000 (Vallier et al. 2000). Les méthodes utilisant la lactatémie ou la ventilation sont les méthodes de référence pour la détermination de plages d'intensités utiles à la programmation de l'entrainement physique personnalisé. Les plus courantes permettent de déterminer deux seuils lactiques et/ou deux seuils ventilatoires.

Les seuils ventilatoires.

L'étude de la ventilation lors d'exercices à charge croissante permet d'observer deux « cassures » (Figure 25) dans la courbe d'évolution du débit ventilatoire ($\dot{V}E$) dans le temps (Wasserman et Mcllroy 1964). La première cassure appelée « seuil anaérobie » par Wasserman et McIlroy (1964) est nommée actuellement « premier seuil ventilatoire » et s'observe entre 50 et 60% $\dot{V}O_{2max}$. L'explication classique de cette cassure est la suivante : dans le sang, le tamponnement des ions H^+ par le bicarbonate entraine une augmentation de la production de CO_2 qui induit une stimulation de la ventilation. La deuxième cassure, située le plus souvent entre 80 et 90 % $\dot{V}O_{2max}$, est appelée « seuil de décompensation de l'acidose métabolique » ou « deuxième seuil ventilatoire ». Cette deuxième cassure dans la courbe d'évolution de $\dot{V}E$ s'explique par une acidose sanguine (diminution du pH), pour laquelle le pouvoir tampon du bicarbonate devient alors insuffisant. Cependant, ces hypothèses restent débattues et l'explication des cassures de la courbe de ventilation est sans doute multifactorielle (Vallier et al. 2000).

La terminologie préconisée par la Société Française de Médecine du Sport pour désigner les seuils ventilatoires est la suivante (Vallier et al. 2000) : seuil ventilatoire 1 (SV1) pour la première cassure et seuil ventilatoire 2 (SV2) pour la deuxième.

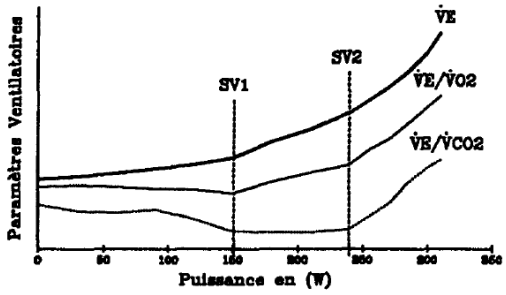


Figure 25 : Définitions graphiques des seuils ventilatoires (Vallier et al. 2000)

Les seuils lactiques

L'étude de la lactatémie en fonction de la puissance développée lors d'un exercice musculaire à charge croissante (Figure 26) permet de distinguer 3 parties de courbes (Kindermann et al. 1979 ; Morton et al. 1994). La première serait quasiment horizontale; la lactatémie restant stable. Cette stabilité de la lactatémie est en fait la résultante entre le débit d'apparition et de disparition des ions lactates dans le sang (élimination, utilisation, etc.) (Brooks 1985). La deuxième partie de la courbe serait en pente légèrement croissante, et est décrite comme une zone mixte de transition aérobie-anaérobie. La troisième partie correspond à une augmentation brutale de la lactatémie, la courbe prenant un aspect exponentiel. La participation du métabolisme anaérobie devient prépondérante. Cette description de la courbe de lactatémie n'est pas consensuelle (Heck et al. 1985 ; Hugbson et al. 1987).

La terminologie préconisée par la Société Française de Médecine du Sport pour désigner les seuils lactiques est la suivante (Vallier et al. 2000) : seuil lactique 1 (SL1) pour la première cassure et seuil lactique 2 (SL2) pour la deuxième rupture de pente lorsqu'elle existe.

Statistiquement, sur une grande population, SL1 est proche de la valeur de lactatémie de 2 $mmol.L^{-1}$, et SL2 est proche de 4 $mmol.L^{-1}$ (Morton et al. 1994). Ces valeurs fixes de la concentration de lactate dans le sang ont été retenues pour déterminer SL1 et SL2 (Sjödin et Jacobs 1981).

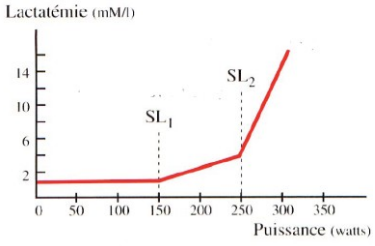


Figure 26 : Evolution de la lactatémie en fonction de la puissance (après Kindermann et al. 1979)

Chez les jeunes adultes entrainés, F$\dot{V}O_{2max}$ et la vitesse de course correspondant à SL2 sont considérés comme les meilleurs indicateurs pour prédire la performance sur des épreuves de course à pied du 2 miles au marathon (Hagberg et Coyle 1983; Allen et al. 1985; Joyner 1993; Bassett et Howley 2000; Nicholson et Sleivert 2001), alors que la puissance de sortie à SL2 se révèle le meilleur indicateur de la performance sur des épreuves de contre-la-montre en cyclisme (Nichols et al. 1997). Cependant, le concept de « seuils » et les interprétations proposées font l'objet de critiques méthodologiques (a) et physiologiques (b) :

- (a) Les choix méthodologiques de détermination des seuils (choix du protocole de test, de l'ergomètre, du site de pré1èvement sanguin, de la technique de détermination graphique ou numérique, etc.) peuvent modifier la valeur des seuils. Aussi leur détermination est sujette à interprétation ou arbitraire.

- (b) Le SL2 n'est pas en rapport avec l'hypoxie cellulaire. Il n'y a pas de vrai seuil mais une évolution progressive de la contribution du métabolisme anaérobie.

I.5.D **Effet du vieillissement sur l'endurance aérobie**

Le vieillissement s'accompagne de modifications physiologiques pouvant influencer l'endurance aérobie : d'une part une diminution des capacités du système cardiovasculaire ; d'autre part une augmentation progressive du pourcentage de fibres lentes au sein des muscles. Les études concernant l'évolution de l'endurance aérobie en fonction de l'âge sont peu nombreuses. Dans une revue relativement ancienne, Préfaut et Masse-Biron (1989) rapportent que chez le sujet sain, $\dot{V}O_2$ au seuil ventilatoire diminuerait quatre fois moins vite que le $\dot{V}O_{2max}$. Quelques travaux ont étudié l'endurance aérobie chez le *Master* athlète. La vitesse de course ou la puissance de sortie à SL2 chez les *Masters* athlètes diminuent avec l'âge (Iwaoka et al. 1988 ; Maffulli et al. 1994 ; Evans et al. 1995, Wiswell et al. 2000). Néanmoins, $\dot{V}O_2$ à SL2 exprimé en %$\dot{V}O_{2max}$ augmenterait pour les hommes (Allen et al. 1985; Coggan et al. 1990 ; Wiswell et al. 2000 ; Peiffer et al. 2008) ou les femmes (Evans et al. 1995 ; Wiswell et al. 2000).

Allen et al (1985) ont observé que des *Masters* athlètes masculins (56 ± 5 ans) ayant un $\dot{V}O_{2max}$ significativement plus faible (- 9%) que des jeunes (25 ± 3 ans), ont réalisé des performances comparables sur 10 km de course à pied. Alors que le coût énergétique n'était pas significativement différent entre les groupes, les *Masters* athlètes avaient atteint un niveau

de 2,5 mmol.L^{-1} de lactate sanguin pendant l'état stable de l'effort à une F$\dot{V}O_{2max}$ plus élevée que les jeunes (92 vs 89%).

Cette augmentation de F$\dot{V}O_{2max}$ à SL2 chez des *Masters* athlètes pourrait être liée à une plus grande activité des enzymes SDH et ß–HAD et une diminution de l'activité de LDH (Coggan et al. 1990). Une évolution différente du système de transport de l'oxygène et des voies métaboliques impliquées dans la fourniture d'énergie a également été évoquée.

Dans une étude longitudinale, Wiswell et al. (2000) rapportent une augmentation significative du seuil lactique en %$\dot{V}O_{2max}$ avec l'âge chez des coureurs d'endurance, hommes et femmes. Plus récemment, Peiffer et al. (2008) a constaté une augmentation des seuils ventilatoires en %$\dot{V}O_{2max}$ chez des *Masters* cyclistes.

Les *Masters* athlètes semblent compenser les effets de l'âge sur leur endurance aérobie par une augmentation de F$\dot{V}O_{2max}$ au seuil anaérobie induite l'augmentation des fibres lentes et par un déplacement du seuil anaérobie vers la droite permettant de maintenir une bonne aptitude aux efforts en endurance malgré une diminution de $\dot{V}O_{2max}$.

I.5.E **Synthèse**

Pour nous renseigner sur la capacité d'endurance de moyenne ou de longue durée des Masters athlètes, il n'existe pas à notre connaissance de modèle décrivant l'évolution de F $\dot{V}O_{2max}$ avec le temps. Les mécanismes régissant la valeur des seuils chez les Masters athlètes sont encore mal connus. Les données disponibles indiquent qu'il y a une réduction $\dot{V}O_2$, de la vitesse ou de la puissance au seuil anaérobie. Cette diminution contribuerait donc à une réduction de la performance en endurance chez le Master athlète. Par contre, il est signalé que F$\dot{V}O_{2max}$ mobilisable lors d'un exercice ne semble pas diminuer avec l'âge chez les Masters athlètes et pourrait même augmenter. La diminution de l'endurance aérobie avec l'âge ne serait qu'un facteur secondaire (par rapport à $\dot{V}O_{2max}$) contribuant au déclin des performances liée à l'âge.

I.6 Coût énergétique de la locomotion et vieillissement

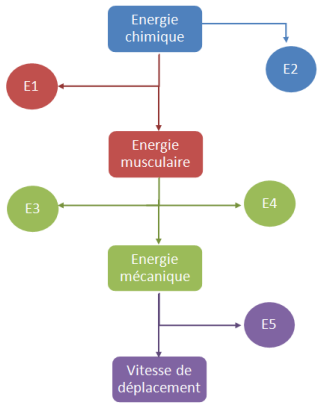
I.6.A Notion de coût énergétique

I.6.A.a Généralités

La réalisation de performances lors d'un exercice est dépendante de la contribution de facteurs physiologiques participant activement à l'élaboration et à l'efficence du mouvement. Dans la littérature plusieurs termes sont utilisés pour décrire l'efficience selon que la dépense énergétique est rapportée ou non au travail utile. Dans le premier cas, il s'agit de coût ou de rendement énergétique, dans le deuxième d'économie. Parmi ceux-ci, le coût énergétique (CE) est un facteur de la performance surtout pour les épreuves d'endurance (Conley et Krahenbuhl 1980 ; Allen et al. 1985 ; Morgan et al. 1989 ; Coyle 1995 ; Hausswirth et Brisswalter 1999). Dans leur ouvrage, Brisswalter et Hausswirth (2003) font la synthèse des connaissances actuelles issues de la recherche autour des notions de performance et d'énergie sans toutefois prendre en compte les effets du vieillissement.

I.6.A.b Représentation schématique des transformations d'énergie

Le rapport entre le travail mécanique produit et l'énergie métabolique consommée est un rendement. Ce rendement dépend de multiples facteurs aussi bien mécaniques que physiologiques. Leur identification peut être abordée à partir de la représentation schématique de transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique proposée par Van Ingen Schenau et Cavanagh (1990) (Figure 27). Cette représentation est très utile dans l'étude du coût énergétique de la locomotion pour une compréhension des processus de transformation de nature différente.



Les valeurs E1, E2, E3, E4, E5 représentent des étapes de perte d'énergie dans ce processus de transformation :

(E1) l'énergie est dissipée sous forme de chaleur ; (E2) l'énergie nécessaire au fonctionnement des organes qui ne sont pas directement sollicités dans le mouvement ;

(E3) l'énergie musculaire dissipée sous forme de chaleur dans les processus de friction à l'intérieur de l'organisme ;

(E4) l'énergie utilisée pour lutter contre la gravité ;

(E5) l'énergie dissipée dans les phénomènes de friction lors du déplacement.

Figure 27 : Représentation schématique de la transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique nécessaire au déplacement (d'après Van Ingen Schenau et Cavanagh 1990)

I.6.A.c Coût énergétique de la locomotion

Le CE de la locomotion est la quantité d'énergie métabolique dépensée par unité de distance (di Prampero 1986). Il se décrit comme le rapport entre le débit d'énergie consommé par unité de temps ($\dot{E}$) et la vitesse de déplacement (v) lors d'un déplacement selon la formule suivante :

$$CE = \dot{E} \, . \, v^{-1}$$

Dans la littérature, CE est calculé à partir de différentes équations selon les unités de mesure ou les méthodes employées. Nous citerons l'équation proposée par Rieu et al (1989) :

$$CE = \frac{dépense\ énergétique\ \left(\dot{V}O_2\right)}{\text{vitesse de déplacement, V}} \times 60$$

CE, en ml d'O_2.kg^{-1}.km^{-1}, $\dot{V}O_2$ en ml d'O_2.min^{-1}.kg^{-1}, et V en $km.h^{-1}$

CE peut aussi être exprimé en $J.m^{-1}.kg^{-1}$ en prenant en compte l'équivalent énergétique du litre d'oxygène (EO_2) exprimé en $kJ.L^{-1}$ dont la valeur dépend du substrat utilisé comme source d'énergie.

Pour être valide, le calcul de CE repose sur des mesures obtenues dans des conditions métaboliques stables, sous maximales, où $\dot{V}O_2$ est représentative de la dépense d'énergie par unité de temps. La quantité de gaz échangé est convertie en équivalent en énergie en Joules. Cette énergie en Joules peut être calculée à partir des mesures de la consommation d'oxygène et de la production de gaz carbonique réalisées pendant le déplacement. La mesure de la dépense d'énergie en Joules suppose de connaître au préalable l'équivalent énergétique ou coefficient thermique de l'oxygène. Le coefficient thermique de l'oxygène correspond à la quantité de chaleur que dégage un litre ou un gramme d'oxygène. Ce coefficient énergétique dépend du substrat utilisé.

Pour des intensités d'effort supérieures, où les métabolismes aérobies et anaérobies sont sollicités, le coût énergétique peut être estimé à partir du calcul des équivalents énergétiques de l'oxygène (EO_2) et du lactate (E_{la} = 3 $mlO_2.mmol.l^{-1}$, d'après di Prampero 1981). En effet, il est classiquement admis que la participation du métabolisme anaérobie (en plus de celle du métabolisme aérobie) peut être estimée à partir de l'élévation de la consommation de lactate en prenant en compte uniquement l'équivalent du lactate énergétique du lactate sanguin.

Dans le calcul de CE, l'énergie métabolique dépensée représente non seulement l'énergie métabolique nécessaire à la réalisation du travail utile, mais également d'autres sources de

dépenses énergétiques qui ne contribuent pas directement à la réalisation de ce travail. Ainsi sont prises en compte l'énergie de gesticulation correspondant au travail interne (Francescato et al. 1995), la dépense énergétique liée au recrutement des muscles permettant le maintien de la posture, ou encore le coût en oxygène des muscles assurant les fonctions cardiaque et respiratoire. Dans le calcul du CE, la valeur du dénominateur est donc surestimée et l'efficience globale du sujet est sous-estimée (Sidossis et al. 1992). Cette principale limite a amené les physiologistes à considérer d'autres indices représentatifs de l'efficience.

I.6.A.d Coût énergétique net

La dépense énergétique de repos peut être déduite de la valeur de $\dot{V}O_2$ afin d'évaluer exclusivement la dépense énergétique correspondant au travail externe fourni (Stainsby et al. 1980). Par la mesure de $\dot{V}O_2$ de repos et à l'exercice en état stable, di Prampero (1986) détermine indirectement la quantité d'énergie produite et consommée par les tissus. Il s'agit du CE_{net} (di Prampero 1986) :

$$CE_{net} = \frac{\left(\dot{V}O_2 - \dot{V}O_2\ de\ repos\right)}{\text{vitesse de déplacement, V}}$$

CE_{net}, en ml d'O_2.kg^{-1}.m^{-1}, $\dot{V}O_2$ en ml d'O_2.min^{-1}.kg^{-1}, et V en m.s^{-1}

La validée de cette notion de CE_{net} dépend de la détermination de l'énergie de repos. Sa mesure doit être effectuée dans des conditions rigoureuses : le sujet doit être en état de post absorption (ne pas avoir mangé au cours des 12 heures précédant la mesure pour limiter le métabolisme splanchnique qui est maximal une heure après le repas) et être inactif avant la mesure. La mesure est effectuée sur une période de 10 minutes. Les valeurs communes varient entre 160 et 290 mLO_2.min^{-1}. Le métabolisme de base des femmes est inférieur de 5 à 10% de celui des hommes. Cependant, l'estimation d'une valeur de $\dot{V}O_2$ de repos dans des conditions expérimentales a révélé une forte variabilité inter et intra-individuelle. Ce manque de reproductibilité amène donc certains auteurs à utiliser la valeur de $\dot{V}O_2$ de repos théorique de 0,083 mLO_2.kg^{-1}.s^{-1} calculée par MedbØ et al. (1988).

I.6.A.e Indices d'efficience énergétique

Trois autres indices d'efficience énergétique sont couramment utilisés dans la littérature pour évaluer le rendement de l'activité cyclisme : le « *Gross efficiency* » (GE), le « *work efficiency* » (WE) et « *delta efficiency* » (DE) (Stainsby et al. 1980 ; Ettema et Loras 2009).

L'indice le plus global du rendement de l'activité est l'efficience brute ou « *Gross efficiency* » (GE). GE est défini comme le ratio entre le travail utile produit (mesuré par l'ergomètre) et la dépense d'énergie métabolique totale nécessaire à la réalisation de ce travail (notée E1 et représentant l'équivalent énergétique du litre d'oxygène consommé en fonction du quotient respiratoire QR).

$$GE\ (\%) = \frac{Travail\ utile\ produit\ (Joules)}{Energie\ métabolique\ totale\ dépensée\ (E1, Joules)}$$

La valeur d'énergie métabolique prise en considération dans le calcul de GE ne prend donc pas en compte l'énergie de gesticulation, correspondant au travail interne nécessaire pour déplacer les segments corporels au cours d'un cycle de pédalage.

Le WE se définit comme le ratio entre le travail utile produit et la différence entre l'énergie métabolique totale dépensée (E1) et l'énergie métabolique nécessaire au pédalage à vide (E3) :

$$\text{WE}\ (\%) = \frac{Travail\ utile\ produit\ (joules)}{E1 - E3} \times 100$$

$E1$: Energie métabolique dépensée à l'exercice (en joules),

$E3$: Energie métabolique dépensée pour le pédalage à vide (en joules).

Le DE représente le ratio entre l'équivalent énergétique de la variation de travail utile produit entre deux instants et l'équivalent énergétique de la variation d'énergie métabolique dépensée entre ces deux instants. Comparativement aux autres indices de l'efficience énergétique précédemment évoqués, ce paramètre est considéré comme la meilleure estimation de l'efficience musculaire (Coyle 1995). Ce calcul réduirait l'influence des processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la réalisation du travail mécanique (Sidossis et al. 1992).

$$DE\ (\%) = \frac{\Delta\ W}{\Delta\ E} \times 100\ = \frac{\Delta\ Travail\ utile\ produit}{\Delta\ Energie\ métabolique\ dépensée}$$

Stainsby et al. (1980) soulignent qu'aucun de ces indices de rendement énergétique (CE, CE_{net}, WE, DE) ne représente précisément la variation de l'efficience au cours de l'exercice. D'une part, il apparaît que la mesure du travail utile produit représente une sous-estimation du travail mécanique total réalisé, parce qu'elle ne prend pas en compte le travail interne dont l'évaluation nécessite une analyse cinématique afin d'estimer les variations d'énergie cinétique et potentielle liées au déplacement du centre de masse (Neptune et van den Bogert 1998). D'autre part, la soustraction d'une valeur d'énergie métabolique de base (dépense énergétique de repos, dépense énergétique liée au pédalage à vide pour NE et WE respectivement)

nécessite que celle-ci soit constante tout au long de l'exercice. Or, l'intervention de certains processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la production du travail utile au cours de l'exercice peut modifier ces valeurs de base entre le début et la fin de l'exercice. Ces principaux mécanismes sont le métabolisme splanchnique, l'augmentation de la température corporelle, le coût de la ventilation, ou encore la modification du niveau de catécholamines circulantes.

I.6.A.f Coût énergétique et performance

Il existe des variabilités interindividuelles considérables de CE pour des exercices d'intensités sous maximales chez des individus de même aptitude aérobie ou de même niveau de performance. Horowitz et al. (1994) ont montré que des cyclistes élites réalisant un exercice à la même puissance consommaient plus ou moins d'oxygène. Les cyclistes les plus efficients avaient un pourcentage plus élevé de fibres de type I dans le vaste latéral, suggérant que le patron de recrutement des unités motrices au cours de l'exercice soit important dans la détermination du CE. Pour la course à pied, Conley et Krahenduhl (1980) comme Morgan et al. (1989) ont reporté que la performance sur 10 km était étroitement liée au CE chez un groupe de sujets très entraînés présentant des $\dot{V}O_{2max}$ similaires. Le CE apparaît comme un facteur déterminant de la performance qui permet de maintenir une vitesse de course plus élevée (Morgan et al. 1989). Un meilleur coût énergétique constitue un avantage dans les épreuves d'endurance. Par ailleurs, à haut niveau de « faible » $\dot{V}O_{2max}$ seraient compensés par des coûts énergétiques exceptionnellement faibles (Morgan et al. 1989). Une relation inverse entre $\dot{V}O_{2max}$ et coût énergétique a été reportée chez un groupe de coureurs très entraînés (Morgan et Daniels 1994).

I.6.B **Effet du vieillissement sur le métabolisme de repos**

Un effet de l'âge a été observé sur le métabolisme de repos (Poehlman et al. 1994). L'augmentation de la masse grasse et la diminution de la masse maigre expliquerait la diminution du métabolisme de base de 2 à 3% par décennie. En revanche, les valeurs du métabolisme de base de jeunes hommes et d'autres d'âge moyen, également bien entraînés, sont semblables. Cependant, Pratley et al. (1994) ont observé une augmentation de 8% du métabolisme de repos chez des hommes de 50 à 65 ans dont la masse maigre s'est accrue significativement par un programme de musculation intense. De telles observations indiquent

que la pratique régulière d'exercices d'endurance et de force peut contrer la baisse du métabolisme généralement associée à l'âge.

I.6.C **Effet du vieillissement sur l'efficience de la locomotion en triathlon**

Dans les principales études relatives au déclin des performances avec l'âge chez les Masters athlètes, l'efficience énergétique n'est pas retenue comme facteur déterminant (Allen et al. 1985; Evans et al. 1995; Peiffer et al. 2008; Tanaka et Seals 2003, 2008; Reaburn et Dascombe 2008).

I.6.C.a Natation

L'effet de l'âge sur le coût énergétique de la natation a été essentiellement étudié dans la littérature pour caractériser les différences entre les sexes ou l'impact du passage à l'âge adulte (Chatard et al. 1985 ; Poujade et al. 2002 ; Kjendlie et al. 2004; Ratel et Poujade 2009). Comme indiqué dans la littérature, les femmes ont un CE moins important que les hommes (Chatard et al. 1990; Zamparo et al. 2000a; Zamparo et al. 2000b). Leur meilleure économie de nage est attribuée à de moindres résistances hydrodynamiques dues à une plus petite taille, un pourcentage de masse grasse plus important et une position plus horizontale que les hommes liée à une répartition de cette masse grasse supplémentaire au niveau des membres inférieurs. Lors du passage à l'âge adulte, les modifications anthropométriques tendent à augmenter le CE (Poujade et al. 2002; Kjendlie et al. 2004, Zamparo 2006).

A notre connaissance, une seule étude s'est intéressée aux *Masters* nageurs (Zamparo 2006). Pour étudier l'effet de l'âge sur l'efficience en natation, Zamparo 2006 a évalué l'efficience de la propulsion en crawl (η_p) chez 63 hommes et femmes âgés de 9 à 59 ans. η_p a été calculé en utilisant son modèle (Zamparo et al. 2005) et représente un rendement.

Aucune de différence entre les hommes et les femmes d'un même groupe d'âge n'a été observée. Cependant, l'efficience de la propulsion en crawl varie en fonction de l'âge (Figure 28) : 0,31 avant la puberté, entre 0,38-0,40 autour de 20 ans et environ 0,25 pour les nageurs de plus de 40 ans. Comme le coût énergétique de la natation dépend de la technique de nage et des résistances hydrodynamiques, ce résultat suggère une augmentation du coût énergétique de la natation chez les *Masters* nageurs.

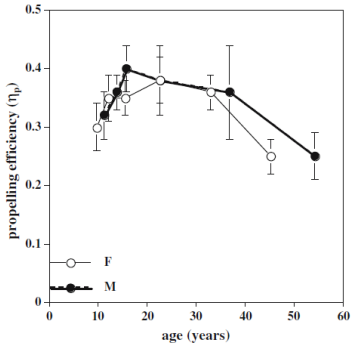


Figure 28 : Efficience de la propulsion en crawl (η_p) en fonction de l'âge chez les hommes (●) et les femmes (○) d'après Zamparo 2006.

I.6.C.b Cyclisme

Récemment, Peiffer et al. (2008) ont comparé les caractéristiques physiologiques de *Masters* cyclistes compétitifs dans trois tranches d'âge (35-44 ans, 45-54 ans et plus de 55 ans). Dans cette étude, CE de production de puissance mécanique (Ec = W/$\dot{V}O_2$ en $W.L^{-1}$ d'$O_2.min^{-1}$) a été mesuré pour chaque groupe de sujet. Peiffer et al. (2008) n'ont rapporté aucun effet de l'âge sur l'efficience de cyclistes de 35 à 73 ans. Cependant, CE a été mesuré et calculé pour une puissance mécanique constante et identique pour chaque groupe, sans prendre en compte l'équivalent énergétique de l'oxygène consommé pour calculer un rendement énergétique (paramètre plus facilement comparable) ou la cadence de pédalage. Dans ce cadre, la principale hypothèse explicative avancée serait un maintien de la typologie musculaire avec l'âge grâce à l'entraînement régulier en endurance, permettant de préserver l'efficience de la locomotion avec l'âge. Les données de la littérature indiquent une corrélation positive entre l'efficience de la locomotion et le pourcentage de fibres de type I (Horowitz et al. 1994; Mogensen et al. 2006). Les effets concomitants de l'entraînement sportif et du vieillissement pourraient induire une prédominance progressive de fibres lentes au détriment des fibres rapides. Ce changement permettrait à l'organisme d'acquérir des fibres plus résistantes à la fatigue, possédant un métabolisme énergétique plus riche et plus aérobie, et utilisant un appareil contractile capable de développer la même force mais plus lentement, donc de façon plus économique d'un point de vue métabolique (Sargeant 2007). A l'inverse, Bell et Ferguson (2009) ont enregistré une différence significative d'efficience entre des cyclistes féminines jeunes et *Masters* (24 ± 3 ans ; 70 ± 4 ans) à des intensités d'exercice relatives similaires. Très récemment, Sacchetti et al. (2011) ont mesuré le rendement énergétique sur ergocycle pour deux groupes de 8 cyclistes (24 ± 5 ans ; 64 ± 4 ans) performants et entrainés (Figure 29). Le rendement a été mesuré à deux intensités relatives sous maximales (40% et 60% PMA) et pour différentes cadences de pédalage (40 à 120 rpm). Un rendement plus

faible des *Masters* cyclistes a été observé pour une cadence de 100 rpm (18,3 ± 0,6% vs. 21,2 ± 1,9%). Par ailleurs, la cadence de pédalage la plus efficiente serait également plus faible chez les *Masters* que chez les jeunes (40-60 vs. 60-80). Il convient de souligner que Sacchetti et al. (2011) ont mesuré un rendement brut et n'ont pas modélisé le déclin du rendement avec l'âge. Ces résultats sont en accord avec un travail de Louis et al. (2011) réalisé chez des athlètes.

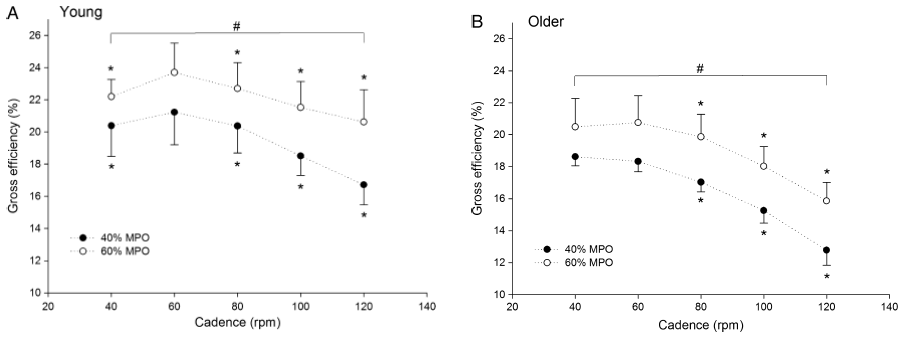
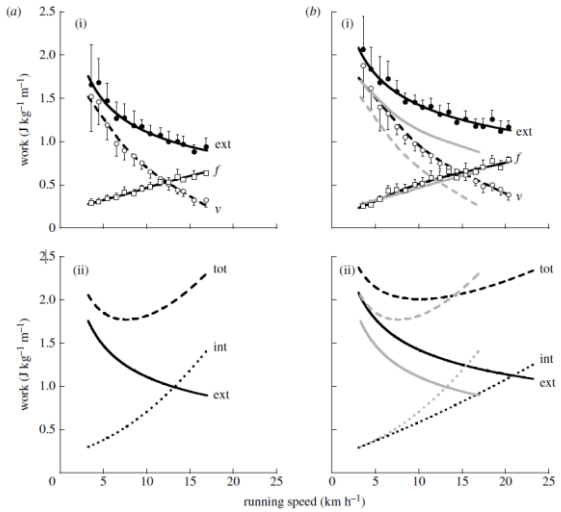


Figure 29 : Rendement énergétique jeunes (A) et masters (B) cylistes à 40% et 60% de PMA et à différentes cadences de pédalage (Sacchetti et al. 2011). ***Valeurs moyennes ± SD ; *P<0.05 40 vs 60 rpm; # P<0.05 Y vs O***

Selon ces dernières études, la réduction de l'efficience avec l'âge serait principalement liée à une réduction de la capacité de production de force induisant une augmentation du nombre d'unités motrices récrutées et donc la demande métabolique afin de maintenir l'intensité (Hoff et al. 2002). Dans ce cadre, Sunde et al. (2009) et Louis et al. (2011) ont pu montrer une corrélation significative entre la capacité de production de force maximale et l'efficience de la locomotion respectivement chez de jeunes cyclistes et des athlètes.

I.6.C.c Course à pied

L'efficience énergétique des *Masters* athlètes a fait l'objet d'un certain nombre d'études (Allen et al. 1985 ; Wells et al. 1992 ; Evans et al. 1995 ; Cavagna et al. 2008). Selon Allen et al. (1985), aucune différence d'économie de course n'a été observée entre des coureurs à pied de 10km jeunes et *Masters* (25 ± 3 ans vs. 56 ± 5 ans). Chez des athlètes féminines, aucune corrélation entre l'efficience de la locomotion (10km course à pied) et l'âge n'a également été rapportée (Wells et al. 1992 ; Evans et al. 1995). Cavagna et al. (2008) ont récemment observé les conséquences mécaniques de la diminution de force avec l'âge sur la course à pied (73,6 ± 5,5 ans vs. 20,8 ± 1,6 ans). Le travail mécanique fourni à différentes vitesses de course a été évalué et il apparaît que l'énergie externe dépensée est inférieure chez les sujets âgés du fait d'une dépense énergétique gravitationnelle moindre. De même, l'énergie totale dépensée est inférieure chez les sujets âgés pour les faibles vitesses mais elle augmente avec la vitesse à cause d'une dépense énergétique interne plus importante (Figure 30).



(a(i),b(i)) Energie externe fournie par mètre (●) est représentée avec ses deux composantes : énergie gravitationnelle (○) et énergie cinétique (□)
(a(ii),b(ii)) Energie mécanique totale par mètre (- - -) est représentée avec ses deux composantes : énergie externe (——) et énergie interne (•••).

Figure 30 : Comparaison des dépenses énergétiques mécaniques (a) sujets âgés vs. (b) sujets jeunes pour la course à pied à différentes vitesses d'après Cavagna et al. (2008)

Bien que les sujets de cette étude ne soient pas des *Masters* athlètes, ce résultat suggère qu'avec l'âge, les adaptations du schéma locomoteur tendraient à réduire le coût énergétique mécanique de la course à pied à faible vitesse essentiellement par une réduction de la dépense énergétique gravitationnelle.

I.6.D **Effet de l'entraînement sur l'efficience énergétique**

De nos jours, aucun consensus concernant les effets de l'entraînement en endurance sur l'efficience énergétique ne se dégage véritablement (Marsh et al. 2000; Green et al. 2000 ; Moseley et al. 2004; Woo et al. 2006; Hopker et al. 2009a ; Hopker et al. 2009b ; Santalla et al. 2009 ; Hopker et al. 2010). La durée insuffisante des études (6 à 12 semaines d'entraînement) pour provoquer des résultats durables chez des sujets déjà entraînés pourrait expliquer ces résultats contradictoires. De façon très spéculative, le CE semble dépendant du volume total d'entraînement réalisé en endurance car les meilleures valeurs d'économie de course s'observent chez les sujets les plus expérimentés et ayant réalisé les kilométrages hebdomadaires les plus importants. Par ailleurs, les vitesses les plus économiques correspondent aux vitesses habituelles d'entraînement. Très peu d'études rapportent un changement de l'économie sur de longues périodes d'entraînements. Le suivi d'une athlète de haut niveau pendant 5 ans montre une amélioration de l'économie de course après chaque année d'entraînement (diminution de 53,0 ml.min^{-1}.kg^{-1} en 1992 à 47,6 ml.min^{-1}.kg^{-1} en 1995 à 16 km.h^{-1} ; Jones 1998). Pour des durées d'entraînement plus courtes, Franch et al. (1998) rapportent une réduction significative suite à six semaines d'entraînement à haute intensité

courues sous la forme d'intervalles training longs. Par ailleurs, la diminution de $\dot{V}O_2$ pour des exercices sous-maximaux était corrélée avec la réduction de $\dot{V}E$. La diminution du CE avec l'entraînement en endurance pourrait résulter d'une augmentation de la capacité oxydative musculaire et de changements associés du patron de recrutement des unités motrices (Coyle et al. 1992), d'une réduction de FC et du VE pour une même intensité d'exercice (Franch et al. 1998), et d'une amélioration de la technique (Williams et Cavanagh 1987; Wakeling et al. 2010). Ces améliorations peuvent être partiellement atténuées par une utilisation plus importante des lipides comme substrat après l'entraînement du fait de la plus grande quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation des lipides pour produire de l'ATP par rapport aux glucides. Le fait que l'amélioration de l'économie de course soit également liée à l'élasticité musculaire est particulièrement intéressant. Des observations récentes suggèrent que le coût en oxygène d'une course à 16 $km.h^{-1}$ soit négativement corrélé à la flexibilité des membres inférieurs, i.e. les coureurs les plus 'raides' sont les plus économiques (Gleim et al. 1990; Craib et al. 1996). Dans ce contexte, la raideur musculaire et tendineuse permet de stocker plus facilement l'énergie élastique au cours des phases excentriques des phases d'étirement-contraction et cette énergie stockée peut-être libérée au cours des phases concentriques de l'action, ce qui contribuerait à diminuer le coût en oxygène de l'exercice (Heise et Martin 1998). Alternativement, un manque de flexibilité dans le tronc et les hanches peut stabiliser le bassin au cours des phases de position (d'équilibre) et limite l'utilisation d'une activité musculaire stabilisatrice (Craib et al. 1996).

Il a été suggéré qu'une augmentation de la force maximale des jambes par un entraînement en résistance puisse augmenter l'économie et la performance en endurance en réduisant la part de la force maximale utilisée pour chaque contraction et en retardant l'utilisation des fibres de type II (Hickson et al. 1988). Cependant, les programmes de musculation classiques (charges lourdes à de faibles vitesses) ont été inefficaces pour améliorer l'endurance, sauf exceptions. Une récente étude montre qu'un entraînement en force explosive, à base de sprints, de sauts, et de musculation avec des charges de 0 à 40% de la force maximale pour une répétition au maximum de la vitesse, pouvait augmenter l'économie de course et la performance à une course de 5 km (Paavolainen et al. 1999). Les auteurs proposent que l'amélioration du contrôle neuromusculaire à la suite de l'entraînement puisse améliorer l'économie de course en permettant une régulation plus adéquate de la raideur musculaire et une meilleure utilisation de l'élasticité musculaire. Il est également possible que l'entraînement en force

utilisant des contractions à vitesses maximales puisse améliorer l'économie de course en permettant un meilleur recrutement des unités motrices et en réduisant les contractions des groupes musculaires antagonistes. Une étude a montré qu'un entraînement en force explosive améliorait l'économie de déplacement des skieurs de fond (Hoff et al. 1999). Par ailleurs, Sunde et al. (2010) et Louis et al. (2011) ont montré une corrélation positive entre la force maximale et le rendement énergétique.

Synthèse

Les effets de l'entraînement sur l'efficience énergétique n'ont été étudiés que pour la course à pied. La principale difficulté méthodologique réside dans la mise en place d'une procédure d'entraînement adaptée visant à améliorer le coût énergétique en agissant sur l'ensemble des processus énergétiques et biomécaniques mis en jeu. Aujourd'hui le travail d'identification de l'ensemble des facteurs qui déterminent le coût énergétique est complexe. La grande diversité des procédures d'entrainement induit un biais méthodologique pour étudier ses effets sur l'efficience énergétique. Il apparaît difficile de s'en affranchir.

I.6.E **Synthèse**

De manière paradoxale, alors que l'efficience de la locomotion est considérée comme un des facteurs essentiels de la performance en endurance, très peu d'études l'ont évaluée chez les *Masters* athlètes. L'effet de l'âge sur l'efficience énergétique en natation n'a pas encore été étudié. L'efficience énergétique en course à pied ou en cyclisme ne semble pas changer avec l'âge chez le *Master* athlète. Le coût énergétique de la locomotion ne contribuerait pas de manière significative au déclin des performances avec l'âge. Les effets concomitants de l'entraînement sportif et du vieillissement induisent une prédominance progressive des fibres lentes plus économiques. L'âge pourrait aussi conduire à l'adaptation naturelle d'un schéma locomoteur plus économique comme une réduction de la cadence de pédalage en cyclisme ou une diminution de la composante gravitationnelle de l'énergie en course à pied.

Cependant, une réduction de l'efficience avec l'âge a été observée très récemment pour le cyclisme. Elle serait principalement liée à une réduction de la capacité de production de force. Actuellement, aucun consensus concernant l'effet de l'âge sur l'efficience de la locomotion ne se dégage. Les résultats contradictoires enregistrés pourraient être liés à la diversité des protocoles de mesure de l'efficience mais aussi aux méthodes de calcul utilisées.

Chapitre II

Chapitre II. Matériels et méthodes

II.1 Hypothèses de travail et arbre de recherches

II.1.A Introduction

L'ensemble des travaux évoqués dans la précédente revue de littérature montre que le modèle du *Master* athlète est fréquemment utilisé pour étudier les effets du vieillissement chez l'homme. Deux types de méthodologies sont utilisés :

- les études transversales comparent des individus de classes d'âge différentes et sont faciles à réaliser. Mais, elles prennent en compte non seulement les effets du vieillissement mais aussi ceux des maladies, des différences d'entrainement, de mode de vie, d'alimentation, de générations,…;

- les études longitudinales étudient le vieillissement d'un groupe d'individus pendant une période de temps assez longue et sont plus difficiles à réaliser dans le cadre d'un travail de thèse en raison de leur durée.

Notre travail expérimental a nécessité de sélectionner avec soin les personnes étudiées en écartant les malades ou en surpoids et en sélectionnant des sujets ayant une pratique sportive comparable. Nous avons pu bénéficier d'un contexte local favorable pour effectuer le recrutement de sujets car notre région se prête bien à la pratique du triathlon et du cyclisme et que les *Masters* constituent une part importante des pratiquants.

II.1.B Un travail expérimental en trois parties

Dans notre travail expérimental, nous pouvons distinguer trois parties.

La première partie « descriptive » qui avait pour objet d'étudier le déclin des performances avec l'âge en triathlon, sur distance olympique et sur *Ironman*, chez les hommes et chez les femmes, pour la performance totale et pour chaque mode de locomotion (Figure 31).

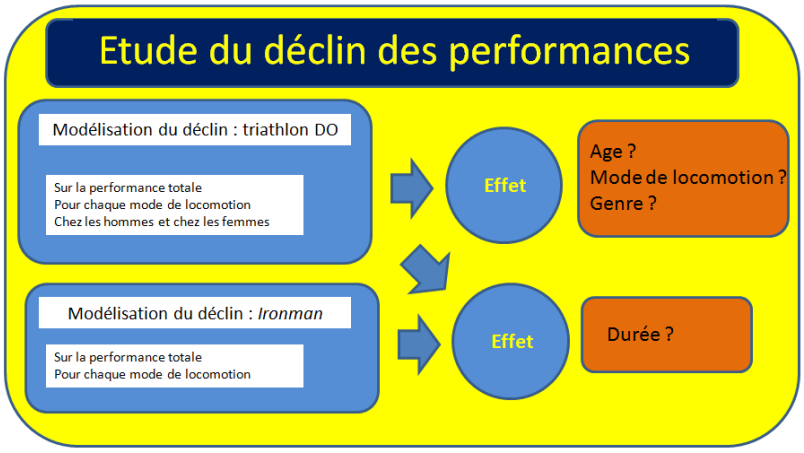


Figure 31 : Etude du déclin de la performance avec l'âge en triathlon

Dans la seconde partie de notre travail expérimental, nous avons tenté de caractériser le *Master* triathlète en laboratoire et en situation de compétition (Figure 32). Le cadre de l'expérimentation s'est limité au triathlon distance olympique et au *Master* triathlète « homme » pour restreindre le domaine d'investigation initialement trop large. L'expérimentation en laboratoire proposait d'étudier le *Master* triathlète (facteurs physiologiques de la performance) et d'investiguer l'impact de la réalisation d'un triathlon distance olympique (réponse 24 heures après) sur les paramètres mesurés. En situation de compétition, la réponse cardiaque lors d'un triathlon distance olympique a été observée pour investiguer l'effet de l'âge sur l'intensité de l'effort.

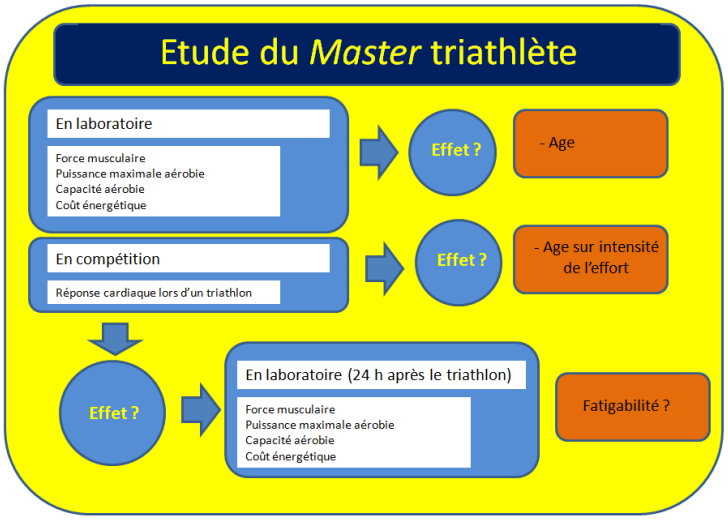


Figure 32: Etude du *Master* triathlète « homme »

Enfin, la dernière partie de notre travail s'est inscrit dans la continuité des études précédentes puisque nous avons approfondi un axe de recherche plus restreint et particulièrement intéressant. Il s'agissait de vérifier, s'il existe un déclin de l'efficience énergétique avec l'âge pour les modes de locomotion du triathlon ? Le travail expérimental a privilégié le volet « cyclisme » dont la contribution à la performance totale en triathlon est plus importante

(Bentley et al. 2002). Le volet « course à pied » du travail expérimental n'est pas achevé. Le mode de locomotion natation n'a pas été retenu compte tenu de l'ampleur du travail. Il pourra être investigué ultérieurement en fonction des résultats. Pour disposer d'éléments susceptibles d'appuyer des hypothèses explicatives, les effets du vieillissement sur la composition corporelle et la puissance maximale de pédalage des sujets ont été investigués (Figure 33).

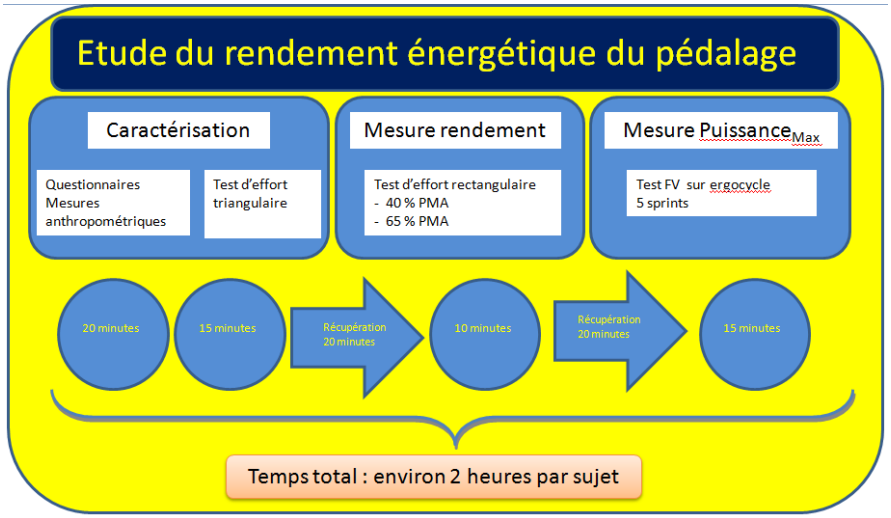


Figure 33 : Etude de l'effet de l'âge sur l'efficience énergétique

II.1.C Arbre de recherches du travail expérimental

L'ensemble du travail expérimental réalisé s'est inscrit dans une suite logique avec un souci de cohérence méthodologique qui peut être illustré par un arbre de recherches synthétique (Tableau 5).

Etude 1 : Effet du vieillissement sur la performance en triathlon	**Etude 2 : Caractérisation du *Master* triathlète « homme ».**	**Etude 3 : Evolution avec l'âge l'efficience énergétique chez des *Masters* cyclistes et triathlètes**
Sur la performance totale et pour chaque mode de locomotion : **Spécificité du triathlon par rapport aux autres activités de locomotion uni modale ?**	En laboratoire : Facteurs de la performance : - Force musculaire - Puissance maximale aérobie - Capacité aérobie - Coût énergétique **Effet de l'âge?**	En laboratoire
Chez les hommes et chez les femmes : **Effet du genre ?**	Effets 24 heures après un triathlon distance olympique **Fatigabilité du *Master* triathlète ?**	Mesure de la composition corporelle Mesure puissance maximale sur ergocycle Caractérisation physiologique ~~Mesure du coût énergétique de la natation~~ Mesure du rendement énergétique sur ergocycle Mesure du coût énergétique de la course à pied sur tapis roulant **Evolution avec l'âge ?**
Sur triathlon **distance Olympique et Ironman : Effet** de la durée ?	En situation de compétition sur triathlon distance olympique : Réponse cardiaque (intensité de l'effort): - sur l'ensemble de l'épreuve - pour chaque mode de locomotion **Effet de l'âge ?**	

Tableau 5 : Arbre de recherches du travail expérimental

II.2 Etude 1 : Effet de l'âge sur les performances en triathlon

II.2.A Recueil des données

Les résultats des épreuves du championnat du monde en groupe d'âge sont disponibles sur Internet (triathlon distance olympique et *Ironman* références respectives : www.triathlon.org et http://ironmanworldchampionship.com). Le parcours de l'épreuve distance olympique et *Ironman* comprend respectivement 1500 et 3800 m de natation, 40 et 180 km de cyclisme et 10 et 42,2 km de course à pied.

Les performances par tranche d'âge de cinq ans peuvent être extraites aisément. Les résultats prennent en compte les groupes d'âge définis par l'Union Internationale de Triathlon (ITU) qui distingue les catégories d'âge par tranche de 5 années. Outre la performance réalisée lors de l'épreuve complète, les chronométreurs officiels fournissent aussi les performances chronométriques réalisées à la seconde près lors des parcours natation, vélo et course à pied.

II.2.B Méthode de calcul et de modélisation du déclin des performances

Les dix meilleures performances par tranche d'âge de cinq ans sont moyennées. Le déclin des performances est calculé sous la forme d'un ratio entre la meilleure performance de la population totale et la performance du groupe d'âge selon la méthodologie proposée par Baker et al. (2003). A partir de ces données, le meilleur ajustement est calculé par la méthode des moindres carrés en prenant en compte l'équation de décroissance exponentielle :

$$Y = 1 - Exp\ ((T - T_0)/\tau)$$

où, Y représente la performance sous la forme du ratio, τ une constante de temps représentative du déclin des performances et T_0 l'âge théorique pour lequel la performance s'annule.

Cette méthode de calcul et de modélisation est appliquée :

- A la performance totale et à la performance réalisée dans chaque mode de locomotion ;
- Chez les hommes et chez les femmes ;
- Sur triathlon distance olympique et *Ironman*.

II.3 Etude 2 : Modèle du « *Master* triathlète »

II.3.A Caractérisation générale des sujets

II.3.A.a Méthode d'évaluation du niveau de pratique et d'entraînement

Le niveau d'entraînement et de pratique sportive de chaque sujet a été évalué par questionnaire afin de s'assurer de l'homogénéité de la population recrutée. Un questionnaire complémentaire « mode de vie – santé » a permis de s'assurer que l'ensemble des sujets était en bonne santé (joint en annexe I).

II.3.A.b Mesures anthropométriques

Les paramètres anthropométriques classiques de taille et de masse corporelle sont mesurés à l'aide d'une toise et d'un pèse personne. L'indice de masse corporelle (IMC) est calculé en divisant la masse par la taille au carré. Cet indice permet d'estimer la corpulence d'une personne, mais ne rend pas compte de la spécificité des tissus présents (masse grasse et masse maigre).

Pour l'étude 3, un complément de mesures anthropométriques a été réalisé. Il comprenait :

- Une mesure des quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, supra-illiaque et sous-scapulaire) est réalisée, à l'aide d'une pince à plis de Harpenden ® sur l'hémicorps droit de chaque sujet, afin d'estimer la densité corporelle (Durnin et Womersley, 1974) et le pourcentage de masse grasse (Siri 1956).
- Une mesure des quatre plis, cinq circonférences, de la longueur et du diamètre intercondylien du genou de la jambe droite est effectuée pour estimer :
    - Le volume de la jambe par la méthode de Jones et Pearson (1969) ;
    - Le volume osseux de la jambe selon la formule de Shephard et al. (1988) ;
    - Le volume de masse grasse et le volume musculaire de la jambe à partir de la formule de Jones et Pearson (1969).

Un descriptif de la méthode de mesure des plis et des calculs utilisés figure en annexe II.

II.3.B Mesures des performances musculaires

II.3.B.a Méthode de mesure de la force maximale volontaire isométrique

Après une séance d'échauffement et une période de récupération, les paramètres mécaniques de force maximale volontaire isométrique ont été recueillis (étude 2) en utilisant un dynamomètre Biodex (Type: Biodex system 3: Biodex medical, Shirley, NY. Etats Unis).

Lors des expérimentations, les sujets étaient confortablement assis avec les jambes fléchies (flexion du genou : 90°, 0° étant considéré comme l'extension complète). Les mouvements du haut du corps étaient bloqués par deux sangles placées en croix sur la poitrine et par une sangle au niveau de l'abdomen. L'axe du genou était aligné avec l'axe de rotation du bras de l'ergomètre et la cheville solidement attachée à son extrémité sur le bras de l'ergomètre. Lors des sessions test, il était demandé aux sujets de réaliser une contraction maximale volontaire (CMV) des muscles extenseurs du genou (0 $rad.s^{-1}$) d'une durée de 5 secondes suivie d'une période de récupération d'une minute. De même, une contraction identique des muscles fléchisseurs du genou était demandée. Trois essais pour chaque contraction étaient réalisés et la meilleure performance définissait la CMV (en Newton).

II.3.B.b Méthode de mesure de la puissance maximale de pédalage

Après 20 min de récupération à l'issue du test rectangle (étude 3), les sujets ont réalisé 5 sprints de 10 secondes sur ergocycle SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf, Allemagne), entrecoupés de 3 min de récupération selon la méthode proposée par Arsac et al. (1996). Les charges de friction différentes étaient appliquées en fonction des cinq cadences maximales programmées. Les manivelles de l'ergocycle sont équipées de jauges de contraintes permettant de mesurer le moment de force généré sur l'axe des manivelles. La cadence de pédalage et les moments de forces sont mesurés et enregistrés tous les 2° pour chaque révolution par l'unité de contrôle. Lors du pédalage, la puissance de sortie est continuellement calculée puis enregistrée grâce à la formule suivante :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Moment de force (N.m)} \times \text{Vitesse angulaire } (rad.s^{-1})$$

Sur l'ergomètre SRM, l'application d'une force sur les manivelles entraîne une déformation des bandes de jauges de contraintes fixées entre les quatre bras d'aluminium du pédalier. Ces bandes envoient un signal proportionnel à la contrainte subie qui est converti en fréquence-voltage par les éléments électroniques du pédalier. La fréquence, qui est donc proportionnelle aux forces résultantes appliquées sur les manivelles et à la cadence de pédalage, est transmise

par induction à une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz à un capteur fixé dans la boîte du pédalier. Avant chaque épreuve, le pédalier était calibré en effectuant deux tours de manivelles à vide (i.e. sans qu'aucune tension ne soit exercée sur la chaîne) selon les recommandations du constructeur.

Pendant le test, le capteur SRM a enregistré de manière continue la puissance développée et la cadence de pédalage moyennées sur 2 Hz. La force, la cadence et la puissance mesurées à partir du dynamomètre SRM représentaient les valeurs réelles de couple (FSRM, N.m), de vitesse de pédalage (rpm) et de puissance (PSRM, W) appliqués par le sujet sur le pédalier au cours du sprint. Les sujets ont réalisé le test sur l'ergocycle équipé de leurs pédales avec leurs chaussures équipées de cales pieds. L'ergocycle était préalablement réglé en fonction de la morphologie des sujets et des données de posture relevées sur leur vélo de compétition. La position de départ du sujet était standardisée assise. Le sujet devait conserver la position assise durant toute la durée du sprint et était vigoureusement encouragé.

Les valeurs maximales théoriques de vitesse V_0 et de force F_0 pour chaque sprint ont été obtenues par extrapolation de la régression linéaire entre la vitesse de pédalage (V, rpm) et la force F mesurées en continu durant les phases d'accélération (Figure 34). V_0 et F_0 ont la dimension respectivement d'une fréquence maximale de pédalage et d'un couple maximal (Vandewalle et al. 1987).

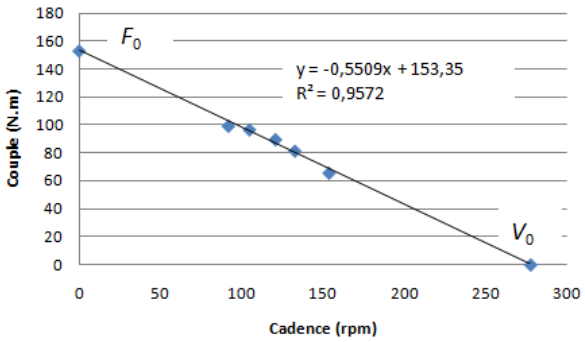


Figure 34 : Détermination maximales théoriques de vitesse V_0 et de force F_0 (d'après Vandewalle et al. 1987)

La puissance maximale P_{max} est obtenue pour un pic de vitesse égal à 0,5 V_0 et une force égale à 0,5 F_0.

$$P_{max} = 0{,}25 \times V_0 \times P_0$$

La puissance maximale développée correspond aussi au sommet de la courbe de la relation polynomiale du deuxième degré entre la puissance et la vitesse (Jones et Passfield 1998; Hintzy et al. 1999; Vandewalle et al. 1987) (Figure 35). La valeur de vitesse correspondante à P_{max} représentait la vitesse optimale de pédalage (V_{Opt}, rpm).

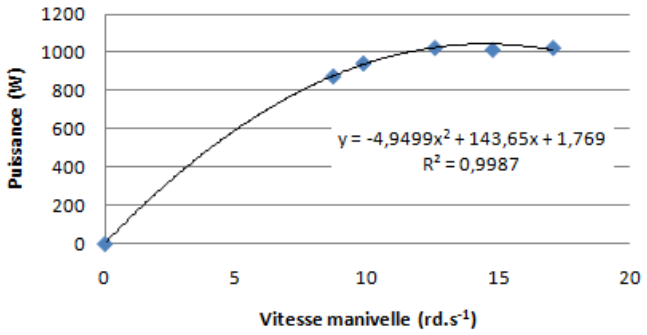


Figure 35 : Détermination P_{max} à partir de la relation polynomiale du deuxième degré entre la puissance et la vitesse (d'après Hintzy et al. 1999)

II.3.C **Mesures de la puissance maximale aérobie**

II.3.C.a Procédure expérimentale

La puissance maximale aérobie des sujets a été mesurée lors d'un test triangulaire sur tapis roulant (pour l'étude 2) et sur ergocycle (pour l'étude 3) pour déterminer $\dot{V}O_{2max}$.

L'analyseur télémétrique de type Oxycon (Oxycon Beta, Jaeger, Germany) a été utilisé pour le test d'effort incrémental sur tapis roulant (EF 1800, Medical Development, France). Les sujets ont effectué 6 minutes de course à 9 $km.h^{-1}$ (± 1 $km.h^{-1}$ en fonction de leur niveau d'entraînement et de leur âge) sur le tapis roulant à une inclinaison nulle. Ensuite, la vitesse de course a été augmentée 1 $km.h^{-1}$ par minute jusqu'à l'arrêt volontaire de l'effort.

De même, l'analyseur télémétrique de type $K4b_2$ ($K4b_2$, Cosmed, Rome) a été utilisé pour le test triangulaire sur ergocycle (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf). Les sujets ont effectué 6 minutes de pédalage à 100 W (ou 75 W pour les *Masters* athlètes de plus de 50 ans) à une fréquence de pédalage librement choisie. Ensuite, la puissance demandée a été augmentée de 25 W par minute jusqu'à l'arrêt volontaire de l'effort. L'ergomètre SRM permet au sujet de maintenir une puissance indépendamment de la cadence de pédalage adoptée, en ajustant automatiquement le couple à la vitesse angulaire grâce à une unité de contrôle. Les sujets ont réalisé le test sur l'ergocycle équipé de leurs chaussures et pédales automatiques. L'ergocycle était préalablement réglé en fonction de la morphologie des sujets et des données de posture relevées sur leur vélo de compétition. La position de départ du sujet était standardisée assise. Le sujet devait conserver cette position durant toute la durée du test. Pendant le test, le capteur SRM a enregistré de manière continue la puissance développée et la cadence de pédalage moyennées sur 5 secondes.

II.3.C.b Méthode de réalisation du test triangulaire

Le test triangulaire a permis de déterminer $\dot{V}O_{2max}$ et les seuils ventilatoires. Pendant l'épreuve, les données d'échanges gazeux ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$) et de volume d'air expiré ($\dot{V}E$) ont été mesurées à chaque cycle respiratoire et moyennées sur 5 secondes en utilisant un analyseur télémétrique. L'analyseur de gaz a été calibré avant et après chaque test en fonction des concentrations d'air ambiant et en utilisant un gaz étalon contenu dans une bouteille. De même, le débitmètre a été calibré avant et après chaque test en utilisant une seringue d'étalonnage de 3 litres.

Chaque sujet a été encouragé à poursuivre l'exercice malgré la fatigue. Immédiatement après l'arrêt de l'effort, le sujet a quantifié l'effort perçu sur l'échelle de Borg (CR16).

La fréquence cardiaque a été enregistrée de manière continue en utilisant un cardio fréquence mètre de type Polar (RS800sd, Polar Electro Kempele, Finland) disposant d'un capteur de cadence (pour le test sur tapis roulant uniquement).

II.3.C.c Détermination de $\dot{V}O_2max$

Les critères d'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ sont un plateau de $\dot{V}O_2$ malgré une augmentation de la charge de travail et ceux retenus par Howley et al. (1995) comme facteurs secondaires : un quotient respiratoire supérieur ou égal à 1,1 et une fréquence cardiaque supérieure à 90%FC_{max} théorique. Les quatre dernières plus hautes valeurs de $\dot{V}O_2$ sont ensuite moyennées afin de déterminer $\dot{V}O_{2max}$.

II.3.C.d Détermination de vitesse maximale aérobie et de la puissance maximale aérobie

La vitesse maximale aérobie (VMA) sur tapis roulant correspond la vitesse du dernier palier terminé, majorée en fonction de la durée passée au dernier palier inachevé. La puissance maximale aérobie (PMA) sur ergocycle correspond à la moyenne la plus élevée de quatre valeurs consécutives.

II.3.D **Détermination de l'endurance aérobie**

II.3.D.a Détermination des seuils ventilatoires

Les seuils ventilatoires 1 (SV1) et 2 (SV2) sont déterminés à partir du test triangulaire selon la méthode décrite par Beaver et al. (1986). Le SV1 correspond au point d'inflexion de la cinétique de l'équivalent respiratoire pour l'O_2 ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) sans augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$). Ce point d'inflexion est aussi associé à la rupture de la pente d'augmentation de $\dot{V}E$ en fonction de l'intensité de l'exercice. La détermination de SV2 correspond au point d'inflexion de la cinétique de l'équivalent respiratoire pour l'O_2 ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) avec une augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$). La détermination des seuils ventilatoires a été réalisée par deux expérimentateurs indépendamment et les résultats ont été comparés à posteriori. En cas de désaccord, l'avis d'un troisième expérimentateur a été demandé.

II.3.D.b Détermination des vitesses et des puissances associées aux seuils ventilatoires

Les vitesses et puissances associées à SV1 et SV2 (respectivement V_{SV1}, V_{SV2}, P_{SV1} et P_{SV2}) déterminées sur tapis roulant et ergocycle correspondent à la moyenne des quatre valeurs autour de SV1 et SV2.

II.3.E **Mesures de la réponse cardiaque pendant un triathlon**

L'enregistrement précis de la fréquence cardiaque à l'aide d'un cardio fréquence mètre individuel, confortable et étanche (pour la partie natation) est une technique largement répandue de nos jours afin de quantifier les réponses cardiaques en situation d'exercice (Leger et Thivierge, 1988; MacFarlane et al. 1989). De nombreuses données sont disponibles, notamment pour des triathlètes « élite » (Vleck et al. 2006; Vleck et al. 2008 ; Bernard et al. 2009; Le Meur et al, 2009) lors de compétitions internationales où le « *drafting* » est autorisé sur le parcours cycliste. Dans le cadre de notre travail expérimental, les sujets ont réalisés un triathlon officiel distance olympique sans « drafting » au cours duquel leur FC était enregistrée en continu sur l'ensemble de la compétition (Team system, Polar Electro Kempele, Finland). Les données enregistrées étaient moyennées toutes les 5 secondes.

S'agissant d'une compétition officielle, les sujets étaient motivés pour donner leur maximum sur l'épreuve et réaliser une performance. Les performances chronométriques ont enregistrées

par la société de chronométrage officiel de l'épreuve au moyen d'un système à puces électroniques. Les performances ont été obtenues pour chaque discipline et synchronisées avec les enregistrements de FC pour chaque sujet.

II.4 Etude 3 : Effet de l'âge sur l'efficience énergétique

II.4.A **Procédure expérimentale**

Une mesure du rendement énergétique sur ergocycle a été effectuée dans le cadre d'une session en laboratoire de deux heures environ pour chaque sujet. Outre la mesure du rendement, les sessions de tests comprenaient (tableau 6) :

- la caractérisation des sujets :
  - la réponse à un questionnaire « mode de vie, santé et pratique sportive »,
  - des mesures anthropométriques (comprenant pesée et mesure des plis cutanés),
  - un échauffement général incluant la familiarisation avec l'ergomètre,
- la mesure du rendement énergétique;
- la mesure de la puissance maximale (test de force-vitesse).

Tableau 6 : Protocole de caractérisation et de mesure de l'efficience énergétique du pédalage en laboratoire chez des *Masters* cyclistes et triathlètes bien entrainés.

Accueil	
CARACTERISATION DES SUJETS	
Questionnaires (mode de vie, santé et entraînement)	10 minutes
Mesures anthropométriques (pesée + plis cutanés + jambe droite)	5 minutes
Echauffement général et apprentissage ergocycle	10 minutes
Récupération, équipement (masque K4, ceinture thoracique POLAR)	10 minutes
Test triangulaire :	20 minutes
Cyclisme : 6 minutes à 75-100W, puis +25W/min Cotation effort perçu (CR16, Borg) à l'arrêt de l'exercice. Détermination de $\dot{V}O_{2max}$, SV1 et SV2, et puissances associées (PMA, PSV1, PSV2)	
Dés équipement, récupération et équipement (masque K4, ceinture thoracique POLAR)	20 minutes
MESURE EFFICIENCE ENERGETIQUE	
Test rectangulaire :	10 minutes
Cyclisme : 3 minutes à 40% de PMA + 7 minutes à 65% de PMA, cadence (80-90 rpm). Cotation effort perçu (CR16, Borg) à 3, 7 et 10 minutes.	
Dés équipement (masque K4, ceinture thoracique POLAR) et récupération	20 minutes
MESURE PUISSANCE MAXIMALE	
Test force - vitesse :	
Réalisation de 5 sprints brefs sur ergocycle	25 minutes

II.4.B **Détermination du rendement énergétique du pédalage**

A l'issue du test triangulaire, deux expérimentateurs ont déterminé les valeurs de PMA conformément à la méthodologie décrite précédemment. Après 20 minutes de récupération, les sujets ont réalisé un test d'effort rectangulaire de 10 minutes sur l'ergocycle (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf). Les trois premières minutes de pédalage ont été effectuées à la puissance correspondante à 40% PMA. Ensuite, la puissance était augmentée à 65% PMA pendant les 7 minutes restantes. La puissance demandée était ajustée automatiquement par le système d'asservissement de l'électro frein du SRM et les sujets devaient maintenir une cadence de pédalage comprise entre 80 et 90 rpm. Pendant le test, le sujet a quantifié l'effort perçu sur l'échelle de Borg (CR16) à trois reprises : 3 minutes, 7 minutes et à l'arrêt du test.

Le rendement énergétique brut du pédalage exprimé en % a été calculé au cours des deux dernières minutes du test. Le travail utile a été calculé à partir des données de puissance et l'énergie métabolique à partir des mesures des paramètres ventilatoires. Les conditions métaboliques stables d'un exercice sous maximal (QR < 1) ont été vérifiées. La quantité de gaz échangé a été convertie en équivalent en énergie en Joules à partir de la table fournie par De Zuntz et Pflugers (1901).

Chapitre III

Chapitre III. Travail expérimental

III.1 Etude 1 : Effet de l'âge sur les performances en triathlon

III.1.A Effet de l'âge et du sexe sur les performances en triathlon distance olympique

Effet de l'âge et du sexe sur l'évolution des performances en triathlon olympique

Frédéric Sultana, Jeanick Brisswalter, Romuald Lepers, Christophe Hausswirth, Thierry Bernard.

Science & Sports.
2008;23:130-135.

ELSEVIER MASSON

Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Science & Sports 23 (2008) 130–135

SCIENCE & SPORTS

http://france.elsevier.com/direct/SCISPO/

Article original

Effet de l'âge et du sexe sur l'évolution des performances en triathlon olympique

Effects of age and gender on Olympic triathlon performances

F. Sultana [a], J. Brisswalter [a,*], R. Lepers [b], C. Hausswirth [c], T. Bernard [a]

[a] *Laboratoire ergonomie sportive et performance, université de Toulon-Var, avenue de l'Université, B.P. 132, 83957 La Garde cedex, France*
[b] *Inserm U887, motricité plasticité, université de Bourgogne, Dijon, France*
[c] *Mission recherche, institut national du sport et de l'éducation physique, Paris, France*

Disponible sur Internet le 4 mars 2008

Résumé

Objectifs. – Les performances lors d'épreuves de championnat du monde de triathlon olympique en groupes d'âge ont été analysées pour évaluer la diminution des performances en fonction de l'âge et du sexe.

Méthodes. – Les dix meilleures performances par tranche d'âge de cinq ans lors des deux dernières épreuves de championnat du monde en groupe d'âge ont été analysées selon le modèle de type exponentiel proposé par Baker et al. [Exp Aging Res 29 (2003) 47–65]. Les constantes du modèle exponentiel sont comparées entre la population masculine et féminine.

Résultats et discussion. – Le déclin de la performance sur une épreuve de triathlon suit le modèle exponentiel. L'analyse statistique montre une différence statistiquement significative entre la période de déclin de la performance chez les hommes et chez les femmes. Chez les hommes, le déclin devient significatif à partir de 45 ans alors que chez la femme, ce déclin intervient à partir de 40 ans. Dans les deux populations, un déclin plus prononcé est observé après 50 ans.

Conclusion. – Notre étude réalisée lors d'une activité multimodale confirme les résultats antérieurs réalisés sur des activités unimodales en indiquant une relation curvilinéaire entre la performance et l'âge. Néanmoins, le déclin plus tardif en triathlon suggère un effet du mode de locomotion. Par ailleurs, la différence entre les sexes est comparable à celle relevée en course à pied. Des études ultérieures explicatives sont nécessaires pour analyser ces observations.
© 2008 Publié par Elsevier Masson SAS.

Abstract

Aim. – Performances in Olympic triathlon Age Groups World Championships were analysed to evaluate the decline in maximal performance with increasing age in male and female triathletes.

Method. – Mean performance of top ten performers were analysed for each group of age during the last Age Groups World Championships events using the exponential model proposed by Baker et al. [Exp Aging Res 29 (2003) 47–65]. Constants of the exponential model were compared between men and women.

Results and discussion. – The decline in triathlon performance follows the exponential model. The statistical analysis shows a significant gender effect on the period of decrease in performance. In male subjects, performance loss does not appears before 45 years, whereas in female, it appears earlier (40 years). In both populations, significant decrease is observed after 50 years.

Conclusion. – Our study during a multimodal mode of locomotion activity is in agreement with previous results reported during an unimodal activity. However, triathlon performance decline appears later suggesting an effect of locomotion mode. In this study, gender effect is similar with those reported previously. Further explicative studies are necessary to analyse these observations.
© 2008 Publié par Elsevier Masson SAS.

Mots clés : Vieillissement ; Performance ; Sexe ; Triathlon

Keywords: Aging; Performance; Gender; Triathlon

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : brisswalter@univ-tln.fr (J. Brisswalter).

0765-1597/$ – see front matter © 2008 Publié par Elsevier Masson SAS.
doi:10.1016/j.scispo.2008.01.003

1. Introduction

Depuis une dizaine d'années, la participation des athlètes « masters » (i.e. supérieurs à 40 ans) a augmenté de façon considérable, notamment dans les épreuves de longue distance. En marathon, par exemple, les performances des masters s'améliorent de façon significative et permettent d'observer des performances inférieures à trois heures pour des athlètes de plus de 70 ans [29]. Depuis les premiers travaux de Hill [13], l'analyse des performances « record » a souvent été utilisée dans la littérature pour étudier les mécanismes d'adaptation physiologique lors de l'exercice et plus récemment, l'influence du processus de vieillissement sur ces mécanismes [2,26]. Ces études qui prennent en général comme exemple, la course à pied, montrent un faible déclin des performances dans la tranche d'âge 30 à 50 ans, suivi par une diminution plus prononcée des performances de 50 à 60 ans et une altération importante à partir de 70 ans. Dans la littérature scientifique, plusieurs méthodes et modélisations ont été utilisées pour décrire ce déclin. D'une part, pour les épreuves d'athlétisme (incluant les courses, les courses avec obstacles, les sauts, les lancers et la marche), de nombreux auteurs ont comparé différents modèles mathématiques pour décrire la relation entre l'âge et la performance [2,18,22,23,26]. Dans ce cadre, Baker et al. [2] ont exprimé la meilleure performance d'un groupe d'âge avec la meilleure performance des moins de 30 ans. Le déclin est alors représenté par un ratio qui décroît de manière exponentielle [$y = 1 - \exp(T - T_0)/\tau$] pour les épreuves de course et de façon linéaire [$y = \alpha(T - T'_0)$] pour les épreuves de saut, de marche ou de lancer. D'autre part, avec l'augmentation de la participation des athlètes « masters » dans certaines épreuves comme le marathon ou le semi-marathon, une approche quantitative permet d'identifier les ruptures dans l'évolution des performances. Récemment, Leyk et al. [16] ont analysé statistiquement les résultats de 65 semi-marathons et 69 marathons en utilisant la performance moyenne des dix premiers arrivants (Top 10) par tranche de dix ans. Bien qu'il ne s'agisse pas de performances « record », les résultats confirment les observations précédentes et indiquent un déclin des performances de 2,6 à 4,4 % par décade entre 50 et 70 ans [16]. Classiquement, le déclin des performances est mis en relation avec les modifications des systèmes cardiovasculaires et musculaires avec l'âge [29]. Avec le vieillissement, un cercle vicieux s'établit entre l'inactivité de l'individu, la perte de la masse musculaire, les troubles cardiovasculaires, la réduction des fonctions respiratoires et la sensation progressive d'une incapacité aux actes élémentaires d'une vie en société [3,19]. Dans une récente revue de questions sur le sujet, Tanaka et Seals [26] ont indiqué une distinction dans l'altération des performances en fonction de l'âge entre les hommes et les femmes et entre les modes de locomotion suggérant ainsi que le déclin des performances pouvait être spécifique au sexe des individus et aux caractéristiques de l'exercice physique.

Depuis une dizaine d'années, la pratique chez les « masters » est en pleine expansion dans des activités autres que la course à pied. En effet, lorsque l'on compare la participation de l'épreuve de triathlon support du championnat du monde en groupes d'âge sur une période de quatre ans, entre 2004 (Funchal, Madeira, Portugal) et 2007 (Hambourg, Allemagne), le nombre de triathlètes « masters » classés a augmenté d'un tiers (Fig. 1a et b). Cette augmentation de participation est par ailleurs plus importante pour les hommes (+37 %) que pour les femmes (+26 %). À notre connaissance, aucune étude n'a envisagé de décrire les conséquences du vieillissement sur la performance dans une épreuve de triathlon distance olympique qui consiste à enchaîner 1500 m de natation, 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied. L'objectif de cette étude est de décrire l'évolution des performances à partir de la modélisation proposée par Baker et al. [2] pour les hommes et les femmes lors d'une épreuve de championnat du monde.

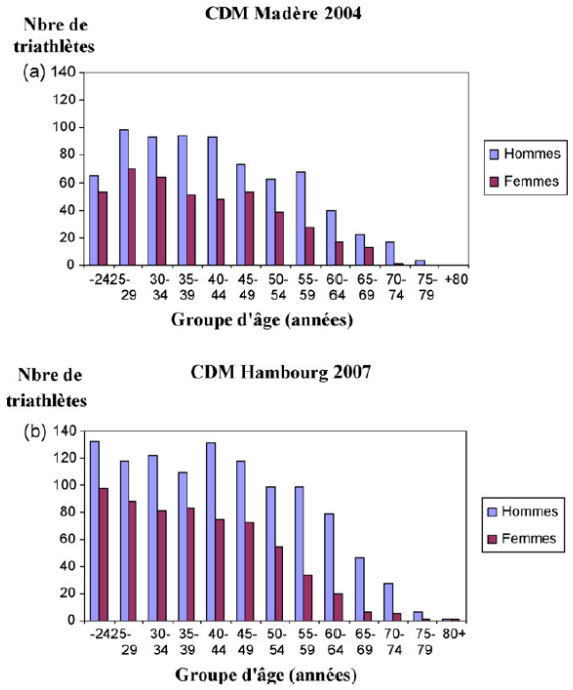


Fig. 1. (a et b) Participation en fonction des catégories d'âge au championnat du monde « groupe d'âge » à Madère 2004 (Fig. 1a) et à Hambourg 2007 (Fig. 1b).

2. Méthode

2.1. Épreuves support de l'étude

Le triathlon distance olympique du championnat du monde en « groupes d'âge » est choisi comme modèle d'étude. À l'occasion du championnat du monde « élite », l'épreuve « groupes d'âge » permet aux triathlètes de chaque nation de concourir pour un titre mondial dans sa catégorie d'âge. Le parcours de cette épreuve comprend 1500 m de natation, 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied. Les concurrents d'une même catégorie d'âge sont regroupés dans une même vague de départ pour effectuer ce parcours. Le triathlon, étant une épreuve individuelle sans aide extérieure, les 40 km de cyclisme sont réalisés dans des conditions proches d'un contre-la-montre individuel, sans *drafting* (i.e. bénéficier de l'aspiration du cycliste

qui précède). Afin de comparer des groupes d'âges de taille similaire, seuls les deux derniers championnats du monde : Lausanne (Suisse) 2006 et Hambourg (Allemagne) 2007 ont été considérés, car ils présentaient une participation significative des athlètes « masters » (cf. Fig. 1b). Les données chronométriques de ces deux épreuves sont disponibles (Référence : www.triathlon.org) et exploitables en l'absence de dysfonctionnement observable du système d'enregistrement des temps terminaux et intermédiaires.

2.2. Sujets

Les épreuves de Lausanne 2006 et Hambourg 2007 ont rassemblé respectivement, 1423 et 1710 triathlètes classés dans les résultats du championnat du monde en groupes d'âge. Les groupes d'âge sont définis par l'Union internationale de triathlon (ITU) et distinguent les catégories d'âge par tranche de cinq années. Dans notre étude, les groupes d'âge sont codifiés de la manière suivante : moins de 24 ans, 25–29 ans, 30–34 ans. . .

Les catégories d'âge en dessous de 50 ans étaient les plus représentées et comprenaient plus de 100 concurrents chez les hommes et 70 concurrents chez les femmes pour chaque épreuve. Au-delà de 50 ans, un déclin important de la population par tranche d'âge est enregistré, mais la proportion de « masters » représente plus de 50 % des hommes et plus de 40 % des femmes. Dans ce cadre, afin de comparer les groupes d'âge, les dix meilleures performances de chaque catégorie sont relevées et moyennées [16].

2.3. Calcul du déclin des performances

Le déclin des performances est calculé sous la forme d'un ratio entre la meilleure performance de la population totale et la performance du groupe d'âge selon la méthodologie proposée par Baker et al. [2]. À partir de ces données, le meilleur ajustement est calculé par la méthode des moindres carrés en prenant en compte l'équation de décroissance exponentielle.

$$y = 1 - \exp\frac{(T - T_0)}{\tau}$$

où, y représente la performance sous la forme du ratio, τ une constante de temps représentative du déclin des performances et T_0 l'âge théorique pour lequel la performance s'annule.

2.4. Analyse statistique des données

Les valeurs sont décrites selon la moyenne plus ou moins écart-type. L'effet de l'âge et du sexe sur la performance est analysé à partir d'une analyse de variance (Anova) à deux facteurs (âge versus sexe). Les différences entre deux groupes d'âge ou pour un même groupe d'âge entre les hommes et les femmes sont ensuite identifiées par le test post-hoc de Newman-Keuls. Le seuil de significativité est fixé à $p < 0{,}05$.

Tableau 1
Valeurs des paramètres T_0 et τ du déclin exponentiel de la performance selon le modèle de Baker et al. [2]

	Hommes			Femmes		
	ESS[a]	τ	T_0	ESS[a]	T	T_0
Natation	0,0067	16,93	90	0,0135	17,89	87
Cyclisme	0,0024	12,29	90	0,0018	14,03	89
Course à pied	0,0038	14,44	89	0,0102	15,85	86
Performance totale	0,0014	14,20	90	0,0051	15,41	87

[a]ESS : *error sum of squares*.

3. Résultats

3.1. Modélisation du déclin de la performance en triathlon olympique

Dans les deux groupes, la relation entre la performance et l'âge est modélisée selon une courbe exponentielle. Les valeurs des paramètres T_0 et τ minimisant les moindres carrés (*error sum of squares* [ESS]) sont présentées Tableau 1. Dans tous les cas, le modèle utilisé par Baker et al. [2] représente le meilleur ajustement des valeurs observées pour la performance totale (Fig. 2) dans les deux populations.

3.2. Différence homme–femme

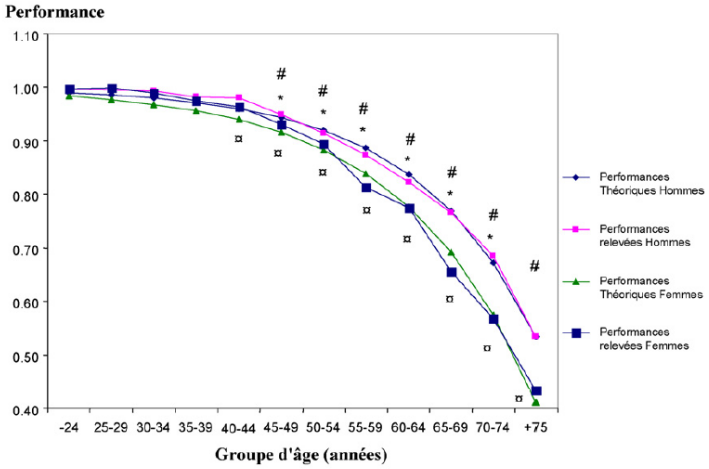
Les valeurs normalisées de performance en fonction de l'âge dans la population homme et femme sont présentées Tableau 2. Un effet significatif de l'âge sur la performance en triathlon est observé quel que soit le sexe (Fig. 2). Par ailleurs, un effet significatif d'interaction entre l'âge et le sexe est observé sur les valeurs de performance.

Dans la population masculine, on observe une stabilité de la performance en triathlon jusqu'à 45 ans suivie par une chute continue de la performance. Dans la population féminine, le déclin des performances est plus précoce et devient statistiquement significatif à partir de 40 ans. À partir de 45 ans, la performance (normalisée par rapport à la meilleure performance de la population) est significativement plus faible chez les femmes que chez les hommes. En revanche, lorsque l'on compare la performance chez les femmes et celle des hommes du groupe d'âge immédiatement supérieur, aucune différence significative n'est observée.

4. Discussion

Les résultats principaux de cette étude montrent les points suivants :

- pour une activité multidisciplinaire comme le triathlon alternant trois modes de locomotion un déclin curvilinéaire des performances en fonction de l'âge ;
- une différence significative entre les sexes avec un déclin de la performance plus précoce chez les femmes.



La meilleure performance correspond à une valeur de 1

*** Différence significative avec le groupe d'âge précédent chez les hommes**
¤ Différence significative avec le groupe d'âge précédent chez les femmes
 # Différence significative entre les hommes et les femmes pour un même groupe d'âge

Fig. 2. Déclin de la performance – comparaison des valeurs relevées et théoriques calculées.

Tableau 2
Valeurs des performances normalisées par rapport à la meilleure performance[a] en fonction de l'âge et du sexe

Âge (ans)	–24	25–29	30–34	35–39	40–44	45–49	50–54	55–59	60–64	65–69	70–74	+75
Hommes	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,94*	0,91*	0,87*	0,82*	0,76*	0,68*	0,53*
Femmes	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96*	0,93*	0,89*	0,81*	0,77*	0,65*	0,56*	0,43*

[a] La meilleure performance correspond à une valeur de 1.
* Différence significative avec le groupe d'âge précèdent.

4.1. Modélisation de l'évolution de la performance en fonction de l'âge

Dans notre étude, les résultats montrent que le déclin de la performance en triathlon en fonction de l'âge et pour chacun des modes de locomotion suit le modèle exponentiel utilisé pour les épreuves de course à pied [2]. Les valeurs relevées dans notre travail pour une durée d'exercice voisine de deux heures 30 minutes (i.e. triathlon versus marathon) montrent que la constante de temps caractérisant le déclin est plus faible dans notre étude que dans celle de Baker et al. [2] (Tableau 3). Plusieurs raisons méthodologiques peuvent expliquer ces différences. D'une part, pour le marathon, l'âge des sujets étudiés varie de 35 à 90 ans avec une chute importante des performances à partir de 70 ans alors que dans la présente étude, la population la plus âgée est celle du groupe 75 à 80 ans. D'autre part, à la différence de l'étude de Baker et al., les performances chronométriques utilisées dans notre étude correspondent à la meilleure performance de l'épreuve et non à une performance « record ». Notre mode d'échantillonnage a ainsi tendance à lisser les différences entre groupe d'âge et à diminuer la constante de temps. Néanmoins, il est intéressant de constater que le modèle exponentiel du déclin sur les épreuves d'endurance s'applique également au triathlon. Les spécificités de ces épreuves enchaînées et les conditions de course très variables (parcours, météo, tactique. . .) ne semblent ainsi pas avoir d'impact sur le modèle et la forme du déclin de la performance en fonction de l'âge.

Tableau 3
Comparaison des valeurs des paramètres τ et T_0 du modèle de déclin exponentiel de la performance en marathon[a] et en triathlon[b]

	Hommes		Femmes	
	τ	T_0	τ	T_0
Marathon	19,97	95	20,37	92
Triathlon distance olympique	14,20	90	15,41	87

[a] Selon les valeurs de l'étude de Baker et al. [2].
[b] Présente étude.

4.2. Évolution de la performance en fonction de l'âge sur une épreuve d'endurance

Dans notre travail, le déclin significatif des performances en triathlon intervient à partir de 45 ans chez les hommes et de 40 ans chez les femmes. Ces valeurs sont supérieures à celles relevées dans la littérature qui montre une chute significative de la performance en course à pied à partir de 35 ans [17,25]. Cette observation permet de suggérer que dans une activité

Tableau 4
Déclin de la performance (en %) par décade chez les hommes et les femmes

Âge (ans)	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80
Hommes	0	1,29	3,38	8,0	12,91	32,52
Femmes	0	2,52	4,43	12,95	20,27	36,96

« multivariée », la sollicitation physiologique propre à chaque mode de locomotion pourrait retarder le premier déclin significatif des performances en permettant à l'athlète une gestion plus équilibrée de ses capacités physiologiques. Néanmoins, lorsque l'on analyse le pourcentage de déclin par décade, nos résultats sont comparables à ceux des études précédentes et indiquent une chute importante à partir de 50 ans (Tableau 4). En effet, dans notre travail, la diminution de performance à partir de 50 ans est de 8 % par décade chez les hommes et 12 % par décade chez les femmes pour atteindre respectivement les valeurs de 32 et 36 % dans les populations féminines et masculines les plus âgées. En triathlon, la performance dépend de facteurs physiologiques classiquement décrits pour les épreuves de longue durée tels que la puissance maximale aérobie identifiée à partir des valeurs de VO_{2max}, la fraction d'utilisation de VO_{2max} (FVO_{2max}) et le coût énergétique du déplacement [11,21]. Tanaka et Seals [24,26] ont étudié les contributions de ces différents facteurs physiologiques pour expliquer le déclin de la performance lors d'une épreuve de course à pied de 10 km et de natation de 1500 m nage libre. Selon ces auteurs, le déclin de la performance avec l'âge est principalement lié en outre à la diminution des valeurs de VO_{2max} et dans une moindre mesure aux variations possibles des valeurs de FVO_{2max} ou de coût énergétique [25]. De nombreuses études descriptives se sont intéressées au déclin de la puissance maximale aérobie avec l'âge. L'une des principales limites méthodologiques dans l'interprétation des résultats est la difficulté de distinguer dans la diminution des valeurs de VO_{2max} la part de la diminution de l'activité physique avec l'âge et celle du vieillissement de l'organisme. Dans ce cadre, la littérature indique avec l'âge une diminution des valeurs de VO_{2max} en moyenne de 10 % par décade chez les hommes et chez les femmes de 45 à 70 ans [10,13,20,27,29], puis de 15 % par décade au-delà de 70 ans [29]. Le maintien d'une activité physique conséquente semble jouer un rôle sur ce déclin puisqu'une diminution plus importante de 15 % par décade est constatée pour une population sédentaire [27,29] alors que chez les hommes très entraînés, le déclin est de à 5 à 7 % par décade avant d'atteindre 70 ans [12,27,29]. Il est intéressant de noter que ces valeurs de diminution de la capacité maximale aérobie (en %) pour les hommes très entraînés sont supérieures au déclin de la performance en triathlon (Tableau 4) avant 60 ans et inférieures après. Cette observation suggère que d'autres facteurs de la performance en triathlon interviennent dans l'altération des performances avec l'âge.

Peu de travaux se sont intéressés aux variations de la fraction maximale de VO_{2max} pouvant être soutenue et les conclusions semblent contradictoires [1,4,8,9,17]. Allen et al. [1] ont observé lors d'une épreuve de 10 km de course à pied, que la valeur de 2,5 mM l^{-1} de lactatémie sanguine est atteinte par un groupe de coureurs « masters » à un pourcentage plus élevé de la valeur de VO_{2max} qu'un groupe de jeunes entraînés non élites. Ces auteurs suggèrent que malgré des valeurs plus faibles de VO_{2max}, les athlètes âgés étaient capables de performances similaires, car ils étaient capables de soutenir un plus fort pourcentage de VO_{2max}. À l'inverse, Evans et al. [8] ont observé une réduction des valeurs de seuil anaérobie avec l'âge indiquant que cette diminution est responsable au début du déclin des performances alors que celle de VO_{2max} serait responsable de ce déclin pour les populations les plus âgées. À notre connaissance, aucune étude n'a décrit de variation significative du coût énergétique avec l'âge [5,29,30]. Peu de travaux ont étudié ce facteur qui représente pour une part le rendement musculaire de l'athlète [10] et qui pourrait alors être responsable d'une diminution de la performance avec l'âge. En effet, de nombreux travaux ont montré une diminution des capacités de force musculaire avec l'âge associée à des modifications de la contractilité ou de l'excitabilité musculaire [7]. Cette altération des propriétés musculaires qui est liée aux modifications physiologiques induites par l'apparition d'une sarcopénie avec l'âge (i.e. réduction du nombre de fibres musculaires, perturbation du métabolisme des protéines, diminution de la capacité régénérative des fibres musculaires), se traduit par une diminution des performances musculaires et une fatigabilité plus importante que pour le sujet jeune [3,6,15,28]. Dans ce cadre, il serait intéressant d'étudier l'effet de cette altération musculaire sur le coût énergétique du déplacement et cela principalement dans les activités portées telle la course à pied. L'étude du triathlon, où trois modes de locomotion sont alternés, pourrait servir de cadre expérimental pour étudier les variations de performance dans chaque mode de locomotion. Même si de nombreux travaux se sont intéressés aux modifications des facteurs physiologiques de la performance de longue durée avec l'âge, ces études restent néanmoins très descriptives et des travaux ultérieurs explicatifs sont nécessaires pour interpréter le déclin de la performance avec l'âge [29].

4.3. Influence du sexe sur le déclin des performances

Un des résultats intéressants de notre travail est l'observation de la différence significative entre le déclin de la performance chez les hommes et les femmes. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures qui soulignent un déclin plus prononcé des performances observées chez les femmes comparé à celles des hommes notamment pour les activités de vitesse en natation ou en course à pied [2,26].

Ces résultats sur la performance sont cependant difficiles à relier avec les études qui ont comparé l'altération des capacités musculaires ou cardiorespiratoires avec l'âge. En effet, la plus grande partie des études de la diminution des capacités fonctionnelles avec l'âge entre hommes et femmes compare ces paramètres chez des sujets « en bonne santé » sans étudier l'influence d'une activité sportive régulière. Dans la littérature, des différences entre hommes et femmes sont classiquement observées chez des sujets « en bonne santé ». Par exemple, Hurley [14] rapporte un déclin plus précoce de la force concentrique chez les femmes alors que la force excentrique est préservée. Par ailleurs, le déclin observé de la valeur de VO_2max

chez les femmes est supérieur à 10 % par décade à celui observé chez les hommes [9,12].

Dans notre travail, il est intéressant de noter que les courbes de déclin hommes et femmes sont similaires, mais avec un décalage de cinq années. Cela peut suggérer que des différences sociales de pratiques avec une réduction plus précoce de la quantité d'entraînement chez les femmes pourraient être également à l'origine du décalage observé. L'augmentation de la participation féminine aux épreuves masters devrait dans ce cadre permettre une comparaison des capacités fonctionnelles selon le sexe pour des niveaux d'entraînement équivalent.

5. Conclusion

De nombreuses études récentes ont décrit l'évolution de la performance dans des activités de locomotion unimodale telle que la course à pied. La présente étude réalisée lors d'une activité multimodale confirme les résultats antérieurs en indiquant une relation curvilinéaire entre la performance et l'âge. Néanmoins, le déclin plus tardif en triathlon suggère un effet du mode de locomotion. Par ailleurs, la différence homme–femme est comparable à celle relevée en course à pied. Des études ultérieures explicatives sont nécessaires pour expliquer ces observations. Cette première étude descriptive sur le maintien de la performance en triathlon semble ouvrir de nouveaux axes de recherche dans une activité jeune comme le triathlon pour laquelle la participation aux compétitions « masters » est en pleine évolution.

Références

[1] Allen WK, Seals DR, Hurley BF, Ehsani AA, Hagberg JM. Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. J Appl Physiol 1985;58(4):1281–4.

[2] Baker AB, Tang YQ, Turner MJ. Percentage decline in masters superathlete track and field performance with aging. Exp Aging Res 2003;29:47–65.

[3] Butler-Browne G, Bigard AX. Caractéristiques du vieillissement musculaire et effets préventifs de l'exercice régulier. Sci Sports 2006;21:184–93.

[4] Coggan AR, Spina RJ, Rogers MA, King DS, Brown M, Nemeth PM, et al. Histochemical and enzymatic characteristics of skeletal muscle in master athletes. J Appl Physiol 1990;68(5):1896–901.

[5] Davies MJ, Dalsky GP. Economy of mobility in older adults. J Orthop Sports Phys Ther 1997;26(2):69–72.

[6] Deley G, Kervio G, Van Hoecke J, Verges B, Grassi B, Casillas JM. Effects of a one-year exercise training program in adults over 70 years old: a study with a control group. Aging Clin Exp Res 2007;19:310–5.

[7] Duchateau J, Klass M, Baudry S. Évolution et adaptation à l'entraînement du système neuromusculaire au cours du vieillissement. Sci Sports 2006;21:199–203.

[8] Evans SL, Davy KP, Stevenson ET, Seals DR. Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. J Appl Physiol 1995;78(5):1931–41.

[9] Fitzgerald MD, Tanaka H, Tran ZV, Seals DR. Age-related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary women: a meta-analysis. J Appl Physiol 1997;83(1):160–5.

[10] Hausswirth C, Brisswalter J. Le coût énergétique de la course de durée prolongée : étude des paramètres d'influence. Sci Sports 1999;14:59–70.

[11] Hausswirth C, Lehénaff D. Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. Sports Med 2001;31(9):679–89.

[12] 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.

[13] Hill AV. The physiological basis of athletic records. Sci Monthly 1925;21:409–28.

[14] Hurley BF. Age, gender, and muscular strength. J Gerontol A Biol Sci Med Sci 1995;50:41–4.

[15] Kohrt WM, Malley MT, Coggan AR, Spina RJ, Ogawa T, Ehsani AA, et al. Effects of gender, age, and fitness level on response of VO_{2max} to training in 60–71 yr olds. J Appl Physiol 1991;71(5):2004–11.

[16] Leyk D, Erley O, Ridder D, Leurs M, Rüther T, Wunderlich M, et al. Aged-related changes in marathon and half-marathon performances. Sports Med 2007;28:513–7.

[17] Massé-Biron J, Mercier J, Collomp K, Hardy JM, Préfaut C. Age and training effects on the lactate kinetics of master athletes during maximal exercise. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1992;65(4):311–5.

[18] Moore DH. A study of age group track and field records to relate age and running speed. Nature 1975;253:264–5.

[19] Poortmans JR. Vieillissement, exercice et médecine préventive. Sci Sports 2006;21:181–3.

[20] Rosen MJ, Sorkin JD, Goldberg AP, Hagberg JM, Katzel LI. Predictors of age-associated decline in maximal aerobic capacity: a comparison of four statistical models. J Appl Physiol 1998;84(6):2163–70.

[21] Sleivert GG, Rowlands DS. Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. Sports Med 1996;22(1):8–18.

[22] Stones MJ, Kozma A. Age by distance effects in running and swimming records: a note on methodology. Exp Aging Res 1986;12:203–6.

[23] Stones MJ, Kozma A. Age trends in maximal physical performance: comparison and evaluation of models. Exp Aging Res 1986;12:207–15.

[24] Tanaka H, Seals DR. Age and gender interactions in physiological functional capacity: insight from swimming performance. J Appl Physiol 1997;82(3):846–51.

[25] Tanaka H, Seals DR. Invited Rewiew: dynamic exercice performance in masters athletes: insight into effects of primary human aging on physiological functional capacity. J Appl Physiol 2003;95:2152–62.

[26] Tanaka H, Seals DR. Endurance exercise performance in masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. J Physiol 2007.

[27] Trappe SW, Costill DL, Vukovich MD, Jones J, Melham T. Aging among elite distance runners: a 22-year longitudinal study. J Appl Physiol 1996;80(1):285–90.

[28] Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR. Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. J Appl Physiol 1995;78(3):823–9.

[29] Trappe S. Marathon runners: how do they age ? Sport Med 2007;37:4–5.

[30] Watsford ML, Murphya AJ, Pinea MJ. The effects of ageing on respiratory muscle function and performance in older adults. J Sci Med Sport 2007;10:36–44.

III.1.B **Synthèse**

La participation des *Masters* athlètes (i.e. > 40 ans) augmente de façon considérable notamment dans les épreuves d'endurance. En marathon, par exemple, les performances des *Masters* s'améliorent. Des performances inférieures à 3 heures pour des athlètes de plus de 70 ans sont observées (Trappe 2007). Depuis les premiers travaux de Hill (1927), l'analyse des performances «record» a souvent été utilisée pour étudier les mécanismes d'adaptation physiologique lors de l'exercice et plus récemment l'influence du processus de vieillissement sur ces mécanismes (Tanaka et Seals 2008; Baker et al. 2003). Le déclin des performances avec l'âge n'a pas encore été étudié pour le triathlon alors que cette activité se développe. La participation des *Masters* triathlètes au championnat du Monde de triathlon en groupes d'âge a considérablement augmenté + 30% sur une période de 4 années 2004-2007.

Les performances lors d'épreuves de championnat du monde de triathlon en groupes d'âge olympique ont été analysées pour évaluer la diminution des performances en fonction de l'âge et du sexe. Au cours des épreuves de championnat du monde Lausanne (2006) et Hambourg (2007), le déclin des performances a été calculé sous la forme d'un ratio entre la meilleure performance de la population totale et la performance du groupe d'âge selon la méthodologie proposée par Baker et al. (2003). A partir de ces données, le meilleur ajustement est calculé par la méthode des moindres carrés en prenant en compte l'équation de décroissance exponentielle : $y = 1 - \exp (T-T_0)/\tau$ où, y représente la performance sous la forme du ratio, τ une constante de temps représentative du déclin des performances et T_0 l'âge théorique pour lequel la performance s'annule.

Le déclin de la performance en triathlon suit le modèle exponentiel proposé par Baker et al. (2003). L'analyse statistique montre une différence statistiquement significative ($p<.05$) entre les groupes d'âge du déclin de la performance chez les hommes et chez les femmes. Chez les hommes, le déclin devient significatif à partir de 45 ans alors que chez la femme, ce déclin intervient à partir de 40 ans. Dans les deux populations, un déclin plus prononcé est observé après 50 ans.

Notre étude réalisée lors d'une activité multimodale confirme les résultats antérieurs réalisés sur des activités unimodales (Baker et al. 2003; Tanaka et Seals 2008) en indiquant une relation curvilinéaire entre la performance et l'âge. Par ailleurs, la différence entre les sexes est comparable à celle relevée en course à pied.

III.1.C **Déclin de la performance avec l'âge sur triathlon distance olympique : Effet du mode de locomotion**

Age related decline in Olympic triathlon performance: Effect of locomotion mode

Thierry Bernard, Frédéric Sultana, Romuald Lepers, Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter.

Exp Aging Res.
2010;36(1):64-78.

Experimental Aging Research, 36: 64–78, 2010
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0361-073X print/1096-4657 online
DOI: 10.1080/03610730903418620

Routledge
Taylor & Francis Group

AGE-RELATED DECLINE IN OLYMPIC TRIATHLON PERFORMANCE: EFFECT OF LOCOMOTION MODE

Thierry Bernard
Frédéric Sultana

Handibio, Sport Ergonomy and Performance Laboratory, University of Toulon-Var, La Garde Cedex, France

Romuald Lepers

INSERM U887, University of Burgundy, Dijon, France

Christophe Hausswirth

National Sport and Physical Education Institute (INSEP), Paris, France

Jeanick Brisswalter

University of Nice Sophia Antipolis, Laboratory of Human Motricity, Education and Health, Nice, France

This study describes the decline in performance with age during Olympic triathlon Age Groups World Championships among the different locomotion modes. Mean performance of top 10 performers were analyzed for each group of age using the exponential model proposed by Baker, Tang,

Received 20 April 2008; accepted 26 July 2008.
Address correspondence to Dr. Jeanick Brisswalter, University of Nice Sophia Antipolis, Laboratory of Human Motricity, Education and Health, 261, Route de Grenoble, BP 3259, 06205, Nice Cedex 03, France. E-mail: brisswalter@unice.fr

and Turner (2003, Experimental Aging Research, 29, 47–65). Comparison in performance decline was done between locomotion modes. Decline in performance in triathlon as a function of age follows an exponential model. A significant interaction effect between age and locomotion mode was observed on performance values. In swimming, a significant decrease was observed close to 5% per year after 45 years. Decline in performance was less pronounced in cycling until 60 years. Analysis of the effect of age in the different locomotion modes of a triathlon could provide information for maintaining quality of life with aging.

In recent years there has been an increased interest in issues related to the enhancement of performance of master athletes (Tanaka & Seals, 2008). Many of the changes in physiological functional capacity related to aging have been found to be the result of long-standing sedentary lifestyle (Maharam, Bauman, Kalman, Skolnik, & Perle, 1999; Wright & Perricelli, 2008). This reduction in physical capacity with aging is related to reduction in physical activity as well as to changes in body composition or development of clinical diseases. Within this framework, studies on master athletes' performance have shown that master athletes are able to maintain their performance despite the structural changes in muscle classically described with aging. Over the last decade, the participation of master athletes has increased, especially in long distance events. In the marathon, for example, the performance of masters has significantly improved, with 70-year-old athletes running it in less than 3 h (e.g., Trappe, 2007). Since the early work of Hill (1925), the study of the performance record has often been used in the literature to study the mechanisms of physiological adaptation, and more recently the impact of the aging process on these mechanisms (Baker, Tang, & Turner, 2003; Balmer, Bird, & Davison, 2008; Tanaka & Seals, 2003, 2008; Wright & Perricelli, 2008). They have shown a small decline in performance between 30 and 50 years, followed by a more pronounced decline in performance from 50 to 60 years and a significant alteration from 70 years. In the literature, several methods and models have been used to describe the decline. On the one hand, for athletic events (including races, jumping, throwing, and walking), several authors have compared different mathematical models to describe the relationship between age and performance (Baker et al., 2003; Moore, 1975; Stones & Kozma, 1986; Tanaka & Seals, 2003, 2008). In this context, Baker et al. (2003) have normalized the best performance for each age group, with the best performance of athletes below

30 years. The decline is represented by a ratio that decreases exponentially [$Y = 1 - \exp(T - T_0)/\tau$] for running and linearly [$Y = \alpha(T - T_0)$] for jumping or walking. On the other hand, with the increased participation of masters athletes in long distance events such as the marathon or half marathon, quantitative approaches have identified a breaking point in the evolution of performance. Recently, Leyk et al. (2007) have statistically analyzed the results of 65 semimarathons and 69 marathons using the average performance from the first 10 athletes (TOP 10) for every 10-year age group. Even though not record performances, the results presented confirm previous observations and indicate a decline in performance of 2.6% to 4.4% per decade between 50 and 69 years (Leyk et al., 2007). Classically the decline in performance is related to changes in cardiovascular and muscular systems with age (e.g., Tanaka & Seals, 2008). With aging, a vicious circle is established between the reduction of activity, changes in body composition, and cardiovascular disorders or reduced respiratory function (Maharam et al., 1999). In recent reviews on this topic, Tanaka and Seals (2003, 2008) have observed that the alteration of performance with age was different between running and swimming and seems specific to the exercise task characteristics.

These studies have mainly considered single-sport performance such as running, and more recently cycling or swimming performance. During the last decade, triathlon, involving successive swimming, cycling, and running sessions, has become one the most popular multidisciplinary event. Studies focusing on factors affecting performance during a triathlon have clearly identified differences with single performance, indicating that the effect of previous locomotion mode on subsequent exercise was the main factor explaining changes in performance (Bentley, Millet, Vleck, & McNaughton, 2002; Bernard et al., 2007; Hausswirth & Lehénaff, 2001). Therefore the adaptation of triathletes must be considered as unique and relatively specific to the constraints activity (race profile, swim-cycle and cycle-run transitions, intensity, and exercise duration). Within this framework, the decline in performance could be different than those reported in single sports. Furthermore, these events have seen a significant increase in master participation. When comparing the participation of the Triathlon World Championship in age groups over a period of 4 years, between 2004 (Madeira) and 2007 (Hamburg), the number of masters triathletes "finishers" has increases by 30% (Figure 1). To our knowledge, no study has described the impact of aging on Olympic distance triathlon performance, which involves 1500-m swimming, 40-km cycling, and 10-km

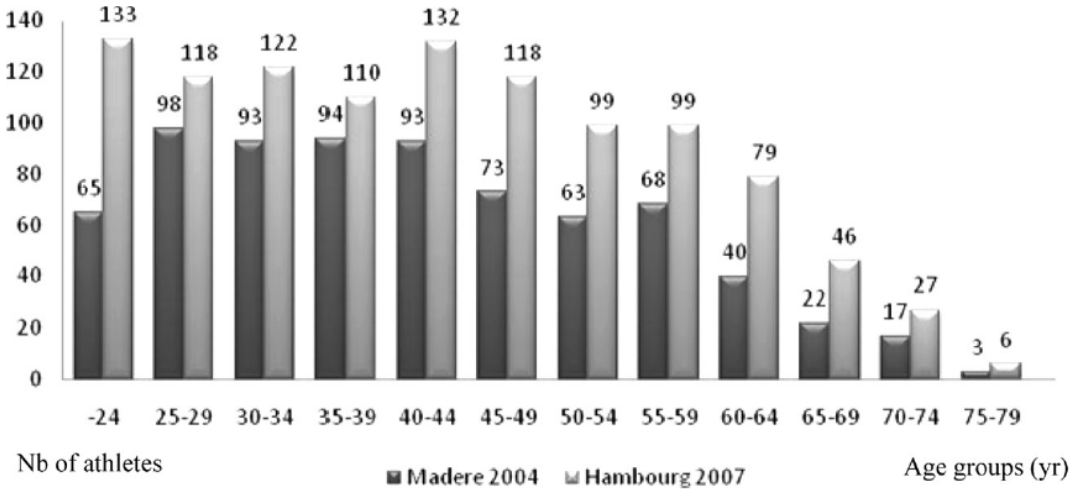


Figure 1. Participation of the Triathlon World Championship in age groups over a period of 4 years, between 2004 (dark bars, Madeira) and 2007 (grey bars, Hamburg).

running. The objective of this study was to describe the evolution of Olympic triathlon performance with age for each mode of locomotion and overall race. Similarly to Tanaka and Seals (2003, 2008), we hypothesize differences in decline of performance with age among the different locomotion modes.

METHODS

The Olympic triathlon world championship by "age groups" was chosen as a model for this study. During the world championship, each nation's "elite" athletes can compete for a world title in his/her age category. Competitors in the same age category are grouped in a single wave of departure. The race is an individual event; the 40-km cycling is performed without drafting (i.e., pedaling in the slipstream of the previous rider). Data were assessed only during the last two world championships, Lausanne 2006 and Hamburg 2007, because they presented a similar participation of masters' athletes.

Subjects

In these two world championships, 1710 male athletes were considered as finishers. The age groups are defined by the international

federation and distinguish the categories for each period of 5 years. In our study, age groups are codified in the following manner: ≤24 years, 25–29 years, 30–34 years.... The last group was 75–80 years.

The age categories below 50 years were the most represented, and included more than 100 competitors for each event. Beyond 50 years, a significant decline of the population by age group is recorded; however, the proportion of masters still represents more than 50% of men. Within this framework, in order to compare the age groups, the 10 best performers in each category are identified and overall performance as well as performance in each locomotion mode was recorded (Leyk et al., 2007).

Decline in Performance

The decline in performance is assessed by calculating a ratio between the best individual performance of the total population and the performance of each age group according to the methodology proposed by Baker et al. (2003). The best individual time in overall triathlon and for each locomotion mode was used to normalize the performance. A ratio equal to 1.00 represents the best performance. Based on these data, the best adjustment is calculated from the following exponential equation:

$$Y = 1 - \exp(T - T_0)/\tau$$

Where Y is the performance expressed as a ratio, τ a time constant representative of the decline of performance, T the age, and T_0 the age for which the theoretical performance equated with a performance of zero.

Statistical Analysis

Values were described mean ± SD. A first analysis of variance was conducted to identify an effect of age (independent variable) on overall performance. Then the effect of age and locomotion mode on performance was analyzed using a two-way analysis of variance with repeated measures (ANOVA2 R) (age versus locomotion mode) with performance scores as dependent variables. When F values were statistically significant, post hoc test of Newman-Keuls was conducted to identify differences between two age groups or for the

same age group between swimming cycling and running. The level of significance was set at $p < .05$.

RESULTS

Modeling the Decline in Performance in Olympic Triathlon

Times of each group for overall triathlon and for each locomotion mode are presented Table 1. In both groups, the relationship between performance and age is modeled according to an exponential curve. The parameter values T_0, τ, and the minimizing least squares parameter (ESS) are shown Table 2. The model used by Baker et al. (2003) not only represents the best fit of the observed values for the overall performance (Figure 2), but also for each mode of locomotion.

The values of performance decline (in percent of the best performance) as a function of age for each locomotion mode and overall triathlon are presented Table 3. A significant effect of age on performance is observed on the overall performance and whatever the locomotion mode. In addition, a significant interaction between age and locomotion mode was observed on performance values (Figure 3).

A significant difference was observed between swimming, running, and cycling. The decline in performance was more pronounced during swimming and running, whereas performance remains stable longer during cycling. In swimming, a significant decrease was observed after 40 years, with a decrease close to 5% per year after 45 years. In cycling, decline in performance was not significant until 55 years and less than 3% per year until 60 years. From 40 years old, performance in swimming was significantly lower than performance in running or cycling for all age group; furthermore, a significant difference between running and cycling was observed only after 55 years of age.

The relative contribution of each part on overall performance was independent of age until 70 years old. Cycling time represents $49.1\% \pm 2.3\%$ of overall performance time, whereas performance in swimming, running, and transition time represent, respectively, $17.9\% \pm 1\%$, $28.2\% \pm 1\%$, and $4.7\% \pm 0.5\%$. After 70 years of age, a slight but significant increase in the role of swimming and running time was observed, which represents, respectively, $19.5\% \pm 1.2\%$ and $31\% \pm 0.9\%$ of overall performance time.

Table 1. Times of each group for overall triathlon and for each locomotion mode

	Age groups (years)										
	≤24	25–29	30–34	35–39	40–44	45–49	50–54	55–59	60–64	65–69	70–74	75+
Overall triathlon	2 h 01 min ± 1 min 44 s	2 h 02 min ± 1 min 06 s	2 h 02 min ± 1 min 22 s	2 h 05 min ± 1 min 11 s	2 h 04 min ± 44 s	2 h 07 min ± 1 min 31 s	2 h 13 min ± 1 min 43 s	2 h 20 min ± 13 min 21 s	2 h 26 min ± 5 min 22 s	2 h 38 min ± 3 min 43 s	2 h 54 min ± 9 min 19 s	3 h 33 min ± 23 min 29 s
Swimming	20 min 08 s ± 1 min 10 s	21 min 40 s ± 56 s	20 min 48 s ± 1 min 12 s	22 min 28 s ± 1 min 32 s	22 min 14 s ± 37 s	22 min 27 s ± 46 s	24 min 42 s ± 1 min 16 s	26 min 14 s ± 1 min 59 s	26 min 48 s ± 2 min 06 s	28 min 39 s ± 3 min 15 s	34 min 39 s ± 3 min 50 s	41 min 09 s ± 6 min 13 s
Cycling	1 h 08 s ± 55 s	1 h 21 s ± 48 s	1 h 01 min ± 1 min 01 s	1 h 01 s ± 55 s	59 min 36 s ± 44 s	1 h 01 s ± 53 s	1 h 03 s ± 1 min 43 s	1 h 05 s ± 1 min 31 s	1 h 07 s ± 2 min 30 s	1 h 14 s ± 3 min 13 s	1 h 16 s ± 4 min 13 s	1 h 30 s ± 9 min 41 s
Running	34 min 54 s ± 1 min 06	34 min 52 s ± 1 min 20 s	34 min 55 s ± 1 min 17 s	35 min 15 s ± 1 min 19 s	36 min 19 s ± 40 s	37 min 21 s ± 54 s	38 min ± 1 min 28 s	40 min 51 s ± 1 min 24 s	44 min 08 s ± 2 min 39 s	46 min 59 s ± 2 min 30 s	52 min 36 s ± 3 min 35 s	1 h 08 min 54 s ± 12 min 57 s

Table 2. Modeling the decline in performance in Olympic Triathlon

	ESS	τ	$T_{0\ (yrs)}$
Swimming	0.0067	16.93	90
Cycling	0.0024	12.29	90
Running	0.0038	14.44	89
Overall performance	0.0014	14.20	89.8

Note. ESS represents the minimization least squares parameter (value of zero is the best adjustment), τ is a time constant representative of the decline of performance, and T_0 the age for which the theoretical performance equated with a performance of zero.

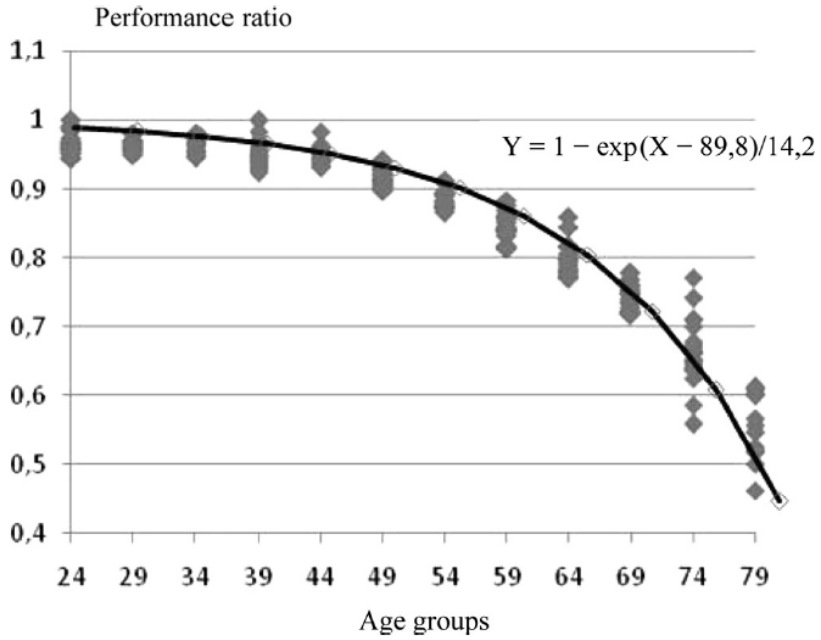


Figure 2. Overall performances in triathlon and predicted values calculated from the exponential model described by Baker et al. (2003). Performance ratio: A value of 1 represents the best performance.

Table 3. Decline in performance as a function of age expressed as percent of the best performance

	Age groups (years)											
	≤24	25–29	30–34	35–39	40–44	45–49	50–54	55–59	60–64	65–69	70–74	75+
Overall triathlon	1	0	1	2	2	5	9	13	18	23	32	47
Swimming	0	2	2	3	5*	9	14*	20*	22	25*	40*	52*
Cycling	2	0	1	1	1	2	4	8*	13*	20*	23	41*
Running	2	1	0	1	3	4	8*	13*	21*	26*	35*	49*

*A significant difference with the previous age group was observed ($p < .05$).

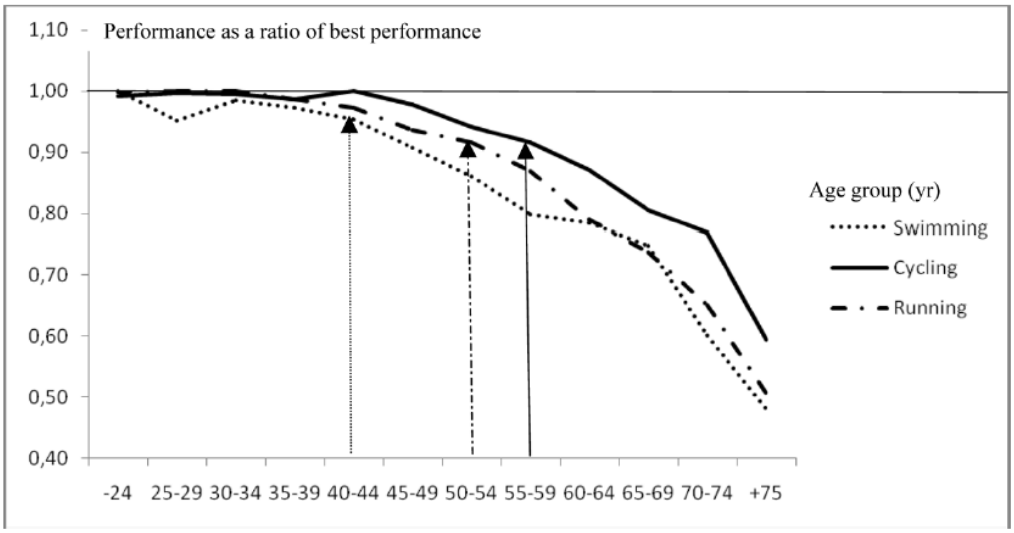


Figure 3. Decline in performance with age for each locomotion mode of the triathlon. Arrows indicate significant beginning of the decline in performance (i.e., significantly different from the previous age group, $p < .05$).

DISCUSSION

The main result of the present study indicated a significant effect of locomotion mode on decrease in performance with age in master athletes. Within this framework, decline in performance during cycling is less pronounced than during running and swimming.

In our study, the results show that the decline in performance in triathlon as a function of age (and for each mode of locomotion) follows the exponential model proposed by Baker et al. (2003) during athletics running events.

Decline in Performance With Age in Master Triathletes

In our work, the significant decline in performance with age for the triathlon begins at 45 years for masters subjects. These values are higher than those previously reported in the literature in single sport, which shows a significant decrease in running performance from 35 years (Leyk et al., 2007; Tanaka & Seals, 2003, 2008; Wright & Perricelli, 2008), suggesting that alternating different locomotion mode during the triathlon may help to delay the first significant decline in performance by allowing athletes to specifically manage their physiological capabilities. After 50 years of age, when looking at the percentage of decline per decade, our results are comparable to those of previous studies indicating a decrease in performance of

8%, to reach 32% after 70 years old. During triathlon, performance depends on classical endurance qualities (Bentley et al., 2002; Hausswirth & Lehénaff, 2001), such as the maximum aerobic capacity, the aerobic-anaerobic threshold, and the efficiency of each locomotion mode. In an Olympic triathlon, the distance in each locomotion mode is for swimming, 1.5 km; cycling, 40 km; and running, 10 km. In similar single-sport performance, Tanaka and Seals (2003, 2008) studied the contributions of these physiological factors to explain the decline in performance in endurance running (10 km) and swimming (1500-m swim free). According to these authors, the decline in performance with age is mainly linked to a decrease in maximum aerobic power ($VO_{2\ max}$) and secondly to a shift of the aerobic-anaerobic threshold towards lower intensities (aerobic capacity). With age, it has been reported in the scientific literature that $VO_{2\ max}$ values declined by 10% per decade from 45 to 70 years and 15% per decade beyond 70 years (Fitzgerald, Tanaka, Tran, & Seals, 1997; Hawkins & Wiswell, 2003; Rosen, Sorkin, Goldberg, Hagberg, & Katzel, 1998; Trappe, 2007). A larger decrease is observed for sedentary subjects (15% per decade), and it is suggested that regular endurance training can reduce this decline to 5% to 7% per decade before reaching 70 years (Hawkins & Wiswell, 2003; Trappe, 2007). It is interesting to observe that these values are higher than those reported in the present study before 70 years and lower after this age. This observation suggests that other factors specific to triathlon performance could explain the decline in performance in this sport. Among them, the specificity of decline for each locomotion mode could be partly responsible for this particular trend.

Decline of Performance With Age Among the Three Locomotion Modes

The major result of this study is that cycling leads to a less pronounced decline than the other locomotion modes, indicating that cycling seems to allow subjects to maintain performance despite classical metabolic changes reported with aging. Success in triathlon events is partly determined by the ability of an athlete to overcome difficulties in the change from one discipline to another. In the scientific literature on triathlon, differences between cycling and running has been widely studied, whereas less is known about differences between swimming and the two other locomotion modes.

Main differences between cycling and running are the change from a non–weight-bearing to a weight-bearing activity and differences in the coordination of leg muscles, with the shift from a predominantly

concentric type of muscle action in cycling to a stretch-shortening activity with eccentric contractions in running (Bijker, de Groot, & Hollander, 2002; Heiden & Burnett, 2003). In running, during the landing phase, the active muscles are stretched to decelerate the body mass, whereas during the push off phase, the active muscles are shortening (Bijker et al., 2002). As a result, efficiency during running is greater than during cycling, leading to lower energy expenditure. However, during running, stretch-shortening cycle exercise causes a greater impairment in muscle function, leading to a greater neuromuscular fatigue and structural muscular damage (Gauche et al., 2006; Hausswirth & Lehénaff, 2001). Thus one hypothesis that could explain the more pronounced decrease in performance during running, than during cycling, is that the impairment of muscle function and structure classically described with aging would lead to a greater neuromuscular fatigue during the running part of the triathlon (Place, Lepers, Deley, & Millet, 2004). Classically in the literature when muscle performance of young and old trained subjects are compared, a reduction in isometric muscle strength generally appears after the age of 60 years on quadriceps muscles (Porter et al., 1995) due mainly to a loss of muscle fibers, a change in size of numbers and proportions of muscle fiber type (Lexell, 1995; Porter et al., 1995), a reduction in muscle volume and cross-sectional area (Narici, Maganaris, Reeves, & Capodaglio, 2003), and an alteration in contractile properties (Kent-Braun, Ng, Doyle, & Towse, 2002). Therefore we suggest that the significant difference in performance decline between running and cycling after 55 years of age observed in our study could be attributed to a greater muscular fatigue during running where the alteration in muscular function described with aging is enhanced by muscular damage induced by the repeated stretch-shortening cycle and eccentric contractions. Further studies analysing, for example, long distance triathlon with a 42-km running part are necessary to validate this hypothesis.

One unexpected result of this study is that decline in performance is more pronounced in swimming than during the two other locomotion modes. To the best of our knowledge, change in swimming performance with age has been relatively little studied (Cooper, Powell, & Rasch, 2007; Donato et al., 2003; Fairbrother, 2007; Tanaka & Seals, 2003). Among these studies, Tanaka and Seals (2003) have compared swimming and running performances, indicating on the one hand that reduction in swimming performance was smaller than during running and on the other hand that the age at which the decline begin occurred later with swimming (70 years) compared with running (60 years). The authors indicated that the reasons for this

difference were unclear and the main hypothesis raised was that there is a lower incidence of orthopedic injuries during swimming than during running. Our results are not in agreement because decline in swimming performance was more pronounced than both in running and cycling. In earlier studies, Stones and Kosma (1980) have proposed an alternative hypothesis to explain difference in performance decline between sports based on difference in energy cost of locomotion between young and masters athletes. In competition events, the energy cost for a given power output is dependent on both the energy (ATP) needed to overcome the external resistance and the energy used in the production of external energy (internal energy). Consequently, the energy cost of locomotion could be improved by reducing as well external energy and/or internal energy or both (Di Prampero, 1981). On the one hand, our result could be explained by a more important difference in energy cost of locomotion during swimming between young and masters athletes than for the two other modes. Triathlon is a sport that has evolved considerably during the last decades and if we consider training history of these masters triathletes, the skill in swimming is lower than in running or cycling, (Hausswirth & Lehénaff, 2001). On the other hand, one of the main difference between energy cost of locomotion between a triathlon and single sports is the possibility for athletes to use drafting as well during swimming than during cycling or running. While swimming front crawl, the role of drafting, i.e., swimming directly behind or at the side of another swimmer, is important because all subjects are together at the beginning of the race, and this role is enhanced in triathlon by the possibility to wear a wet suit. Recent studies have indicated that drafting and wearing a wet suit allow the swimmer to reduce the energy cost of swimming propulsion for the same speed and increases performance during the subsequent cycling part (Delextrat et al., 2003). Actually, in an elite Olympic distance triathlon, the pacing strategies during the swimming part can influence the energy demands of this section as well as cycling and running strategies. Within this context, focusing on the relative importance of swimming in triathlon performance, recent authors identified that the relationship between overall triathlon performance and performance in swimming is weaker than with performance of the two others disciplines (Bentley et al., 2002). Therefore we could suggest that with decreasing functional capacities, one strategy adopted by masters athletes was to decrease energy cost by using drafting and reducing the speed when swimming in a pack in order to better prepare the cycling or the running part, which are more important for the overall performance.

Furthermore, when comparing aging studies, the use of cross-sectional data rather than longitudinal analysis has many inherent methodological problems that could explain the difference between these studies. Cross-sectional studies are dependent on the criteria used to select each group and among them are several sociological characteristics and training histories specific to each sport. Therefore to assess the potential confounding factor of training status or training pattern in each locomotion mode, further studies including quality of life and training questionnaires on a larger population are necessary to confirm and/or explain this result (Balmer et al., 2007; Tanaka & Seals, 2008; Wright & Perricelli, 2008).

In conclusion, overall triathlon performance times decline with advancing age in a curvilinear manner although the patter of decline is specific to each locomotion mode. Physical functional capacity and performance appear to be more resistant to biological aging in cycling than in the other two sports. As always, data from cross-sectional studies must be considered with caution, but further studies examining and comparing the effect of the aging process on factors affecting performance in the three locomotion modes of a triathlon will provide valuable information for understanding the way to maintain physical capacity and performance with aging.

REFERENCES

Baker, A. B., Tang, Y. Q., & Turner, M. J. (2003). Percentage decline in masters superathlete track and field performance with aging. *Experimental Aging Research*, *29*, 47–65.

Balmer, J., Bird, S., & Davison, R. (2008). Indoor 16.1-km time-trial performance in cyclists aged 25–63 years. *Journal of Sports Sciences*, *26*, 57–62.

Bentley, D. J., Millet, G. P., Vleck, V. E., & McNaughton, L. R. (2002). Specific aspects of contemporary triathlon: Implications for physiological analysis and performance. *Sports Medicine*, *32*, 345–359.

Bernard, T., Vercruyssen, F., Mazure, C., Gorce, P., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2007). Constant versus variable-intensity during cycling: Effects on subsequent running performance. *European Journal of Applied Physiology*, *99*, 103–111.

Bijker, K. E., de Groot, G., & Hollander, A. P. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *European Journal of Applied Physiology*, *87*, 556–561.

Cooper, L. W., Powell, A. P., & Rasch, J. (2007). Master's swimming: An example of successful aging in competitive sport. *Current Sports Medical Reports*, *6*, 392–396.

Di Prampero, P. E. (1981). Energetics of muscular exercise. *Review of Physiology, Biochemistery and Pharmacology*, *89*, 143–223.

Donato, A. J., Tench, K., Glueck, D. H., Seals, D. R., Eskurza, I., & Tanaka, H. (2003). Declines in physiological functional capacity with age: A longitudinal study in peak swimming performance. *Journal of Applied Physiology*, *94*, 764–769.

Fairbrother, J. T. (2007). Prediction of 1500-m freestyle swimming times for older masters all-American swimmers. *Experimental Aging Research*, *33*, 461–471.

Fitzgerald, M. D., Tanaka, H., Tran, Z. V., & Seals, D. R. (1997). Age-related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary women: A meta-analysis. *Journal of Applied Physiology*, *83*, 160–165.

Gauche, E., Lepers, R., Rabita, G., Leveque, J. M., Bishop, D., Brisswalter, J., & Hausswirth, C. (2006). Vitamin and mineral supplementation and neuromuscular recovery after a running race. *Medicine Science for Sports and Exercise*, *38*, 2110–2117.

Hausswirth, C., & Lehénaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Medicine*, *31*, 679–89.

Hawkins, S., & Wiswell, R. (2003). Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: Implications for exercise training. *Sports Medicine*, *33*, 877–888.

Heiden, T., & Burnett, A. (2003). The effect of cycling on muscle activation in the running leg of an Olympic distance triathlon. *Sports Biomechanics*, *2*, 35–49.

Hill, A. V. (1925). The physiological basis of athletic records. *Science Monthly*, *21*, 409–428.

Kent-Braun, J. A., Ng, A. V., Doyle, J. W., & Towse, T. F. (2002). Human skeletal muscle responses vary with age and gender during fatigue due to incremental isometric exercise. *Journal of Applied Physiology*, *93*, 1813–1823.

Lexell, J. (1995). Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *Journal of Gerontology Annals Biolological Science Medicine Science*, *5*, 11–16.

Leyk, D., Erley, O., Ridder, D., Leurs, M., Rüther, T., Wunderlich, M., Sievert, A., Baum, K., & Essfeld, D. (2007). Aged-related changes in marathon and half-marathon performances. *International Journal of Sports Medicine*, *28*, 513–517.

Maharam, L. G., Bauman, P. A., Kalman, D., Skolnik, H., & Perle, S. M. (1999). Masters athletes: Factors affecting performance. *Sports Medicine*, *28*, 273–285.

Moore, D. H. (1975). A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature*, *253*, 264–265.

Narici, M. V., Maganaris, C. N., Reeves, N. D., & Capodaglio, P. (2003). Effect of aging on human muscle architecture. *Journal of Applied Physiology*, *95*, 2229–2234.

Place, N., Lepers, R., Deley, G., & Millet, G. Y. (2004). Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. *Medicine Science for Sports and Exercise*, *36*, 1347–1356.

Porter, D. A., Costill, D. L., Zachwieja, J. J., Krzeminski, K., Fink, W. J., Wagner, E., & Folkers, K. (1995). The effect of oral coenzyme Q10 on the exercise tolerance of middle-aged, untrained men. *International Journal of Sports Medicine*, *16*, 421–427.

Rosen, M. J., Sorkin, J. D., Goldberg, A. P., Hagberg, J. M., & Katzel, L. I. (1998). Predictors of age-associated decline in maximal aerobic capacity: A comparison of four statistical models. *Journal of Applied Physiology*, *84*, 2163–2170.

Stones, M. J., & Kozma, A. (1986). Age by distance effects in running and swimming records: A note on methodology. *Experimental Aging Research*, *12*, 203–206.

Tanaka, H., & Seals, D. R. (2003). Invited Review: Dynamic exercise performance in masters athletes: Insight into effects of primary human aging on physiological functional capacity. *Journal of Applied Physiology*, *95*, 2152–2162.

Tanaka, H., & Seals, D. R. (2008). Endurance exercise performance in Masters athletes: Age-associated changes and underlying physiological mechanisms. *Journal of Physiology*, *586*, 55–63.

Trappe, S. (2007). Marathon runners: How do they age? *Sports Medicine*, *37*, 302–305.

Wright, V. J., & Perricelli, B. C. (2008). Age-related rates of decline in performance among elite senior athletes. *American Journal of Sports Medicine*, *36*, 443–450.

III.1.D **Synthèse**

Tanaka et Seals (2003, 2008) ont observé que le déclin des performances avec l'âge pour la course à pied et la natation sont différents. Ce résultat suggère que les effets du vieillissement sur la performance seraient spécifiques à l'activité. Un déclin significatif a été observé sur la performance totale en triathlon à partir de 45 ans chez les *Masters* triathlètes hommes (Sultana et al. 2008). Ce déclin étant plus tardif que celui observé en course à pied (significatif après 35 ans d'après Leyk et al. 2007 ou Tanaka et Seals 2003, 2008), l'hypothèse d'un effet du mode de locomotion est formulée. Si le déclin des performances avec l'âge a déjà été décrit pour chaque mode de locomotion pris séparément, il n'a pas encore été étudié pour le triathlon qui requiert des facteurs spécifiques de la performance et sollicite des adaptations différentes (Hausswirth et Lehénaff 2001 ; Bentley et al. 2002 ; Bernard et al. 2007). L'objectif de cette deuxième étude s'inscrivait donc dans la continuité de la première étude sur le triathlon distance olympique (Sultana et al. 2008). Il s'agissait d'étudier l'effet de l'âge pour chaque mode de locomotion du triathlon en utilisant la même méthodologie (Baker et al. 2003).

Sur deux épreuves du championnat du Monde en groupes d'âge (Lausanne 2006 et Hambourg 2007), les performances de 1710 triathlètes hommes ont été étudiées. Le déclin de la performance en triathlon et dans chaque mode de locomotion avec l'âge suit le modèle exponentiel proposé par Baker et al. (2003) pour les épreuves de course à pied. Une différence significative entre les modes de locomotion est observée. En natation, le déclin est significatif par rapport au groupe d'âge précédent après 40 ans, il est plus précoce qu'en course à pied (après 55 ans) ou qu'en cyclisme (après 60 ans). La contribution relative de chaque parcours sur la performance totale n'évolue pas jusqu'à 70 ans. Après 70 ans, la contribution de la natation et de la course à pied augmente de manière significative.

Pour les modes de locomotion pris séparément, le déclin des performances d'endurance est communément attribué en premier lieu à une diminution de la puissance maximale aérobie et dans une moindre mesure à une réduction de l'endurance aérobie lorsqu'elle est exprimée en vitesse ou en $\dot{V}O_2$. (Tanaka et Seals 2003, 2008). Le déclin plus tardif en triathlon en comparaison avec la course à pied suggère la contribution d'autres facteurs spécifiques comme le déclin de chaque mode de locomotion ou l'évolution de leur contribution respective.

Le déclin plus prononcé en natation lors d'une épreuve de triathlon n'est pas en accord avec les études de Tanaka et Seals (2003, 2008) qui ont mis en évidence un moindre déclin en natation qu'en course à pied en invoquant comme principale hypothèse explicative une moindre vulnérabilité aux blessures orthopédiques. Notre résultat pourrait être expliqué par un niveau d'expertise de la natation moindre chez les *Masters* triathlètes et/ou une stratégie de course consistant à utiliser le *drafting* en natation ou en nageant moins vite pour réduire le coût énergétique et privilégier les parcours cycliste et course à pied dont la contribution à la performance totale est plus importante (Bentley et al. 2002).

Le déclin plus prononcé en course à pied qu'en cyclisme pourrait être expliqué par une plus grande sensibilité à la fatigue neuromusculaire (Gauche et al. 2006) et aux dommages musculaires (Place et al. 2004) en fin d'épreuve.

III.1.E **Déclin des performances avec l'âge sur triathlon *Ironman***

Age-Related Changes in Triathlon Performances

Romuald Lepers, Frédéric Sultana, Thierry Bernard, Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter.

Int J Sports Med.
2009;30:1-6.

IJSM/1459/21.12.2009/Macmillan Training & Testing

Age-Related Changes in Triathlon Performances

Authors R. Lepers[1], F. Sultana[2], B. Thierry[2], C. Hausswirth[3], J. Brisswalter[4]

Affiliations [1] UFR STAPS – Université de Bourgogne, INSERM – U887 Motricité – Plasticité, DIJON, France
[2] University of Toulon-Var, Spor Ergonomic and performance, La Garde, France
[3] INSEP, Biomechanics and Physiology, Paris, France
[4] Université de Nice Sophia Antipolis, LAHMES, Nice, France

Key words
- master athletes
- endurance
- ageing

Abstract

The aim of this study was two-fold: i) to analyse age-related declines in swimming, cycling, and running performances for Olympic and Ironman triathlons, and ii) to compare age-related changes in these three disciplines between the Olympic and Ironman triathlons. Swimming, cycling, running and total time performances of the top 10 males between 20 and 70 years of age (in 5 years intervals) were analysed for two consecutive world championships (2006 and 2007) for Olympic and Ironman distances. There was a lesser age-related decline in cycling performance ($p<0.01$) compared with running and swimming after 55 years of age for Olympic distance and after 50 years of age for Ironman distance. With advancing age, the performance decline was less pronounced ($p<0.01$) for Olympic than for Ironman triathlon in cycling (>55 years) and running (>50 years), respectively. In contrast, an age-related decline in swimming performance seemed independent of triathlon distance. The age-related decline in triathlon performance is specific to the discipline, with cycling showing less declines in performance with age than swimming and running. The magnitude of the declines in cycling and running performance at Ironman distance is greater than at Olympic distance, suggesting that task duration exerts an important influence on the magnitude of the age-associated changes in triathlon performance.

Introduction

The age-related decline in endurance exercise performance is well documented. In general, peak endurance performance is maintained until ~35 years of age, followed by modest decreases until 50–60 years of age, and a progressively steeper decline thereafter [26]. However, most studies examining masters athletes have focused on running for different distances up to the marathon [28]. Fewer studies, however, have examined the age-related decline in performance of other modes of locomotion such as swimming and cycling. Donato et al. [8] for example, suggested that the rates of decline in swimming performance with age were greater in a long-duration (1500 m) than in short-duration (50 m) events, because of a relatively smaller loss of anaerobic muscular power with age compared with cardiovascular endurance. Similarly, few studies have examined the age-related decline in cycling. Balmer et al. [1,2] for example, examined the age-related decline in cycling performance for an indoor 16 km time-trial. Cycling may show differences in the age-related decline compared to running because of the contraction types involved. Cycling is a non-weight bearing activity that employs predominantly concentric muscle activation compared with the stretch-shortening activity and eccentric activations during running. As older adults show different rates of decline during fatiguing contractions that involve eccentric as opposed to concentric activations, this may explain differences in the rate of decline in cycling versus running [3].

Triathlon, involving successive swimming, cycling and running sessions, represents an interesting model to examine the age-related changes in endurance performance in different locomotion modes. Official competition in triathlon varies from short distance named "Olympic triathlon" (1.5 km swim, 40 km cycling, and 10 km running) to long distance named also "Ironman triathlon" (3.8 km swim, 180 km cycling, and 42.2 km running) [4,14].

Bernard et al. [5] recently showed that for Olympic triathlon, performance times in the three disciplines declined with advancing age in a

accepted after revision
December 04, 2009

Bibliography
DOI http://dx.doi.org/10.1055/s-0029-1243647
Int J Sports Med 2009; 30: 1–6 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0172-4622

Correspondence
Dr. Romuald Lepers
UFR STAPS – Université de Bourgogne
INSERM – U887 Motricité – Plasticité
21078 BP 27877 DIJON
France
Tel.: +33 (0)3-80-39-67-60
Fax: +33 (0)3-80-39-67-02
romuald.lepers@u-bourgogne.fr

curvilinear manner although the pattern of decline was specific for each locomotion mode. Cycling for example, demonstrated the least age-associated decline compared to running and swimming. This observation suggests that physiological functional capacity and performance appears to be more resistant to biological aging in cycling than the two other disciplines. During a longer event, the age-related differences between cycling, running and swimming maybe even greater because the physiological and mechanical stresses that occur during Ironman triathlon are much greater compared to those encountered during the Olympic distance triathlon. For example, during an Ironman triathlon, energy expenditure ranges from 8500–11000 kcal [13]. The number of impact forces during the Ironman marathon running are also much greater compared with a 10 km run. Because of the different physiological demands between Olympic and Ironman distance triathlons, the age-related declines in performance may differ between both distances. Therefore, the purpose of this study was: 1) to determine if there was a reduced rate of decline in cycling performance with advancing age compared to running and swimming for the Ironman triathlon, as has been previously shown for Olympic triathlon, and 2) to compare age-related changes in swimming, cycling, and running performances between the Olympic and Ironman distance triathlons.

Materials and Methods

Swimming, cycling, running and total time performances of the top 10 non-elite males of 11 age groups were analysed. The age groups distinguish the categories for each period of 5 years as follows with the corresponding associated code in brackets: 18–24 years (20), 25–29 years (25), 30–34 years (30), 35–39 years (35), 40–44 years (40), 45–49 years (45), 50–54 years (50), 55–59 years (55), 60–64 years (60), 65–69 years (65) and 70–74 years (70).

For the *Olympic triathlon*, the data set was obtained from the International Triathlon Union Web site: http.www.triathlon.org. Data were assessed for two consecutive world championships taking place in Lausanne (2006) and Hamburg (2007).

For the *Ironman triathlon*, the data set was obtained from World Triathlon Corporation Web site: http.www.ironmanlive.com. The world Ironman triathlon championship takes place every year in Kailua-Kona, Hawaii since 1981 [14]. Data were assessed for two consecutive Hawaii Ironman races in 2006 and 2007.

The mean time performance of the top 10 of the best performing age group for each individual discipline was very similar between 2006 and 2007 for both Olympic and Ironman triathlons (see results), so we pooled two years of data. For the Olympic and Ironman triathlons, the performances of 20 triathletes per age group (i.e. the top 10 of each age group in 2006 and in 2007) were considered. For each year and both distances, the swimming, cycling, running and overall time performances of each triathlete finishing in the top 10 of each age group was normalized to the mean time performance of the top 10 of the best performing age group. Thus, the age-related declines in performance were expressed using a ratio calculated between the individual and the mean time performances of the best performing age group for each mode of locomotion and total time.

Statistical analysis

Data are reported as means ± SD with the text and displayed as means±SE in the figures. Two-way ANOVAs with repeated-measures on locomotion mode were used to compare performance ratio between modes of locomotion across ages for Olympic and Ironman triathlons. For each mode of locomotion and total time performance, two way ANOVAs (age x distance) were used to compare performance ratios between Olympic versus Ironman triathlon across age. Post hoc analysis (Tukey) was used to test for differences within the ANOVAs when appropriate. A significance level of $P < 0.05$ was used to identify statistical significance.

Table 1 Swimming, cycling, running, and total performance times for the top 10 males in each age group at the world triathlon championships. For Olympic triathlon, data from Lausanne (2006) and Hamburg (2007) were averaged. For Ironman triathlon, data from Hawaii Ironman in 2006 and 2007 were averaged. Values are mean ± SD.

	Age groups (years)										
	18–24	**25–29**	**30–34**	**35–39**	**40–44**	**45–49**	**50–54**	**55–59**	**60–64**	**65–69**	**70–74**
olympic triathlon											
1.5 km swim (min:s)	20:20	21:45	21:02	21:24	21:44	22:50	24:07	25:58	26:25	27:44	34:00
	±1:19	±1:15	±1:11	±1:39	±0:51	±1:12	±1:29	±1:54	±2:09	±3:03	±5:14
40 km cycle (h:min:s)	1:02:13	1:01:54	1:01:57	1:02:31	1:01:43	1:03:07	1:05:33	1:07:18	1:10:53	1:16:40	1:21:12
	±2:03	±1:59	±1:33	±1:50	±2:24	±2:21	±2:34	±2:36	±3:46	±3:30	±7:11
10 km run (min:s)	35:56	35:11	35:48	36:20	36:50	38:16	39:08	41:13	45:24	48:34	55:13
	±1:44	±1:26	±1:29	±1:37	±1:02	±1:31	±1:50	±2:00	±2:42	±2:47	±7:29
total (h:min:s)	2:05:56	2:06:15	2:06:22	2:07:53	2:08:10	2:12:24	2:17:30	2:23:37	2:32:57	2:44:10	3:04:15
	±5:22	±4:21	±4:10	±3:30	±4:31	±5:30	±4:52	±4:39	±7:50	±6:56	±16:37
ironman triathlon											
3.8 km swim (h:min:s)	1:01:38	1:02:04	1:00:07	1:02:09	1:02:35	1:05:44	1:11:04	1:16:51	1:21:49	1:35:51	1:37:26
	±4:01	±5:22	±4:30	±4:05	±5:23	±5:00	±8:05	±10:35	±9:36	±10:46	±13:34
180 km cycle (h:min:s)	5:04:17	4:53:24	4:55:26	4:54:01	5:05:25	5:06:15	5:17:44	5:47:18	6:03:24	6:40:18	7:30:09
	±10:08	±7:32	±8:46	±6:04	±8:15	±11:11	±15:10	±16:37	±22:58	±32:02	±25:54
42 km run (h:min:s)	3:23:08	3:07:03	3:10:37	3:05:58	3:14:52	3:21:41	3:40:31	3:53:51	4:10:26	4:40:56	5:38:55
	±11:12	±6:43	±7:04	±6:06	±9:11	±9:13	±17:50	±15:38	±16:42	±23:51	±33:27
total (h:min:s)	9:35:26	9:08:22	9:11:57	9:07:53	9:29:23	9:40:27	10:16:40	11:07:21	11:46:38	13:09:27	15:02:17
	±11:41	±8:56	±7:36	±7:34	±10:04	±13:47	±21:33	±31:07	±28:47	±41:51	±56:58

Results

The mean time performances of the top 10 of the best performing age group for each discipline were very similar between 2006 and 2007 for both Olympic and Ironman triathlons. For Olympic triathlon, time performance (expressed as h:min:s) was : 0:20:42±0:01:24, 1:02:51±0:01:30, 0:35:55±0:01:19 in 2006 and 0:19:59±0:00:58, 1:00:21±0:00:34, 0:34:27±0:01:12 in 2007, for 1.5 km swimming, 40 km cycling and 10 km running, respectively. For Ironman triathlon, time performance (expressed as h:min:s) was: 1:00:58±0:04:44, 4:50:01±0:05:05, 3:04:54±0:05:50 in 2006 and 0:59:08±0:02:05, 4:56:47±0:07:52, 3:06:46±0:05:51 in 2007, for 3.8 km swimming, 180 km cycling and 42.2 km running, respectively.

Swimming, cycling, running and total time performances for each age group for both Olympic and Ironman triathlons are presented in **Table 1**. The relative contribution of each part of the overall performance remains constant across the ages for both distances. For Olympic triathlon, the 1.5 km swimming, 40 km cycling, and 10 km running represent on average 17.2±0.6, 47.6±1.6, 28.8±0.6 % of the total time, respectively. For Ironman triathlon, the 3.8 km swimming, 180 km cycling, and 42 km running represent on average 11.3±0.4, 52.3±1.3, 35.1±1.0 % of the total time, respectively.

For both Olympic and Ironman distances, the performance ratios for each mode of locomotion decreased in a curvilinear manner with advancing age (**Fig. 1A, B**). For both distances, there was an interaction of age and mode of locomotion ($p<0.001$). For Olympic distance, the performance ratio was significantly different ($p<0.01$) from the previous age group, from age group 40 for swimming, from age group 50 for running, and from age group 55 for cycling, respectively. Cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than swimming from age group 40 onwards, and from age group 45 cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than running. For Ironman distance, the performance ratio was significantly different ($p<0.01$) from the previous age group, from age group 45 for swimming and running, and from age group 50 for cycling. Cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than swimming from age group 45 onwards (except for age group 70), and from age group 50 cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than running.

Comparisons of age related declines in swimming, cycling, running and total performance for Olympic and Ironman triathlons are presented in **Fig. 2**. There was an interaction ($p<0.001$) of age and distance for cycling, running, and total event times, but not for swimming times. Age-related declines in performance were less ($p<0.01$) pronounced for Olympic compared with the Ironman distance for cycling, running and total time from the following age groups and above: 55, 50, and 55, respectively.

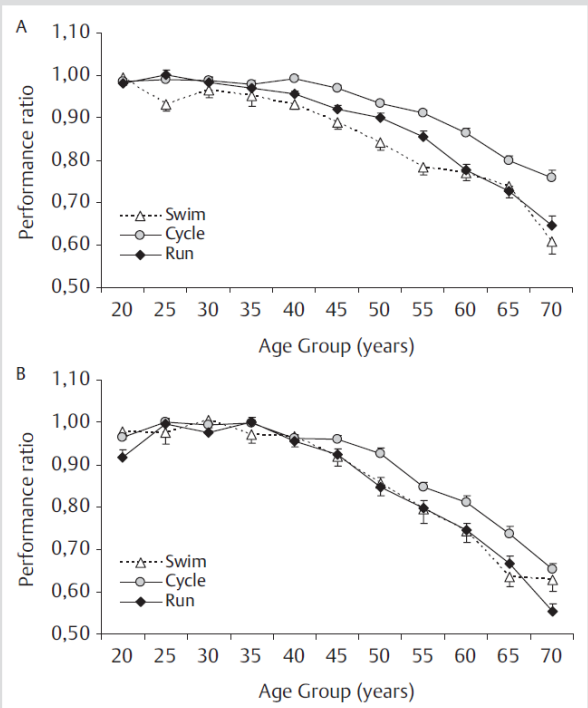


Fig. 1 Age-related declines in swimming, cycling and running performances for the Olympic (**Panel A**) and Ironman triathlons (**Panel B**), (mean ± SE). For Olympic triathlon, the performance ratio was significantly different ($p<0.01$) from the previous age group, from age group 40 for swimming, from age group 50 for running, and from age group 55 for cycling, respectively. Cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than swimming from age group 40 onwards, and from age group 45 cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than running. For Ironman triathlon, the performance ratio was significantly different ($p<0.01$) from the previous age group, from age group 45 for swimming and running, and from age group 50 for cycling. Cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than swimming from age group 45 onwards (except for age group 70), and from age group 50 cycling performance ratio remained significantly ($p<0.01$) greater than running.

Discussion

The main findings of the present study were i) a reduced age-related decline in cycling performance compared with running and swimming performances for both Olympic and Ironman distance triathlons, and ii) a smaller effect of age on cycling and running performances for Olympic than for Ironman distance triathlon, but a similar age-related decline in swimming performance for Olympic and Ironman distance triathlon.

Methodological considerations

With endurance events, the environment (temperature, humidity, precipitation) affects the outcome of the results. For Olympic triathlons taking place in Lausanne (2006) and Hamburg (2007), the temperature was around 20 °C and 15 °C, respectively, whereas during the Hawaii Ironman in 2006 and 2007, the temperature was around 30 °C. Thus, the hotter conditions for the Ironman triathlon may have more greatly affected performance than for the Olympic triathlon. However, by normalizing the individual time performance by the mean time performance of the top 10 of the best performing age groups for both distances, the influence of environment was minimized when comparing Olympic and Ironman triathlon performances. Moreover, the results showed that the mean time performances of the best performing age groups for each individual discipline were very similar between 2006 and 2007 for both Olympic and Ironman triathlons.

The present paper focuses on the performances of male triathletes only. Potential differences in age-related decline in endurance performance between male and female may also occur, so it could be interesting to verify if similar results are obtained for

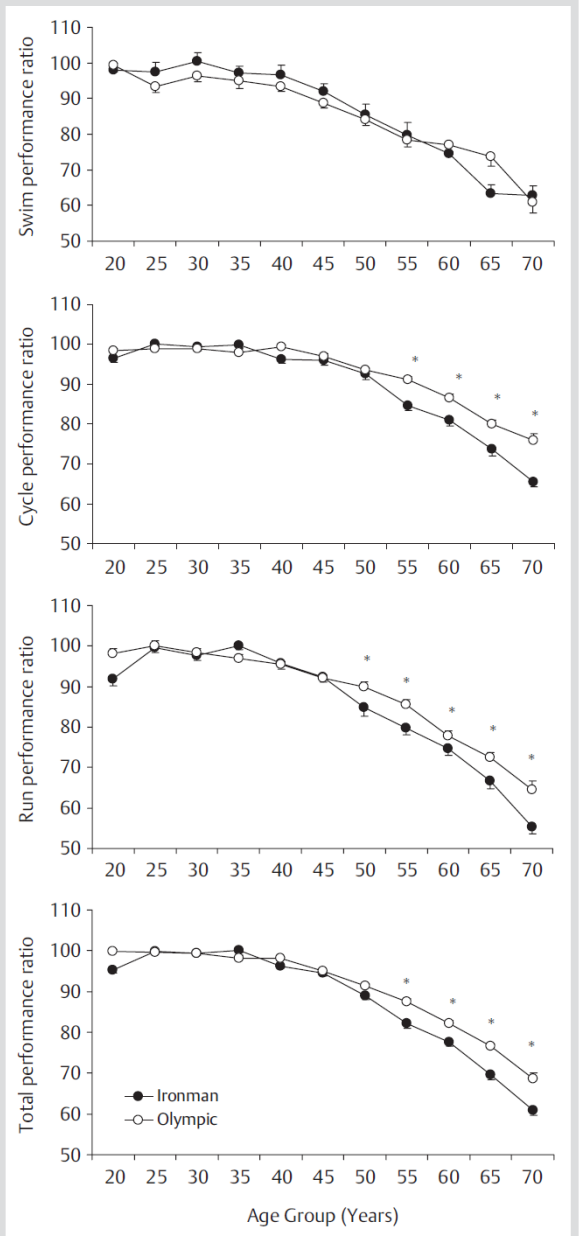


Fig. 2 Age-related declines in swimming, cycling, running and total performances for Olympic and Ironman triathlons (mean ± SE). There was no distance effect for swimming performance. However, age-related decline in cycling, running, and total performance was less pronounced for Olympic triathlon. *: $p<0.01$: Significantly different from Ironman triathlon for the same age group.

female triathletes. However, for Ironman triathlon, data for female triathletes older than 65 years of age are limited. Moreover, unpublished data from our laboratory suggest that similar findings are observed for female triathletes i.e. reduced age-related declines in cycling performance compared with running and swimming performances and a greater magnitude of age-related decline in cycling and running performance for the Ironman triathlon than for the Olympic triathlon.

The present data do not include performance of elite/professional triathletes. At the world Olympic triathlon championships, elite triathletes raced a different course with different rules (drafting allowed for the elite athletes and forbidden for the age groupers). At the world Ironman triathlon championships, elite triathletes raced the same course but started 15 min before the age groups (drafting forbidden for both the elite and age groups).

Age related differences in locomotion mode

For both Olympic and Ironman triathlons, there was a lesser age-related decline in cycling performance compared with running and swimming performances. Bernard et al. [5] had previously reported a less pronounced age-related decline in cycling performance than the other locomotion modes but for Olympic triathlon only. Thus, the question of whether there was a better maintenance of cycling performance or a greater decline in running and swimming performances with advancing age could be raised. One explanation for the different age-related declines in cycling and running may involve the mechanical power required by these disciplines. Mechanical power output in running depends on the velocity ($P=k.V$) while it depends on third power of velocity in cycling ($P=k.V^3$). If we assume that the changes in aerobic capacity (e.g. VO_{2max}) with age are directly related to the decline in mechanical power, a similar reduction in power output for running and cycling with advancing age would induce a lower reduction in cycling velocity than running velocity. This may explain, in part, why the magnitude of the decrease in cycling performance with age was less than that for running.

Running also involves stretch-shortening cycles (SSC) with eccentric muscle actions, while cycling is a non weight-bearing activity with dominant concentric muscle actions. Fast twitch fibres, however, atrophy more than slow twitch fibres with age [10]. Because fast twitch fibres seem more susceptible to damage than slow twitch fibres during SSC, the greater reduction in running performance compared with cycling could therefore be related to muscle typology changes with age [30]. However, the changes in muscle fibre type distribution i.e. the percentage of type I muscle fibres with advancing age seem less pronounced in well-trained masters athletes compared to untrained older adults [29]. Moreover, in terms of muscle damage, although some animal studies have shown that recovery from eccentric exercise-induced muscle damage is lessened in older subjects compared with the young, the results from humans studies are not as clear [7]. Results might differ among muscle age groups but there is no evidence that the muscles of older triathletes would be more susceptible to muscle damage than muscles of young triathletes.

Findings for competitive long-distance runners indicate that the decline in running times parallel the age-related reductions in maximal oxygen uptake and in lactate threshold [11,20]. The contributions of these respective physiological factors to age-related declines in cycling performance, however, are unknown at present. Indeed, very few studies are available on the effect of age on cycling performance. Balmer et al. [1,2] recently characterized the decline in maximal oxygen consumption and maximal aerobic power with age in cycling. However, the relative intensity expressed as a percentage of maximal heart rate or maximal oxygen uptake as well as economy was not affected by age during a ~20 min time trial. Thus, it is tempting to speculate that the lesser decline in cycling performance with advancing age could be due to a lesser reduction in lactate threshold and/or economy compared with running.

An alternative explanation for the smaller age-related decline performance in cycling compared to running is the maintenance of a relative greater exercise training "stimulus" in cycling. It has been shown that an overall reduction in the exercise training "stimulus" occurs with advancing age [21,26]. In running, the decline in exercise performance with age has been partly attributed to an increased incidence of orthopedic injuries, which would limit running training volume of many older athletes [20,12]. It is possible that cycling performance was influenced to a much lesser extent by this factor. Moreover, it has been shown that protein synthesis rate is decreased in older subjects compared with young subjects that could limit the running training volume in older triathletes where muscle damage occurs [27]. With advancing age triathletes would tend to spend more training time on cycling than running, as a consequence of changes in physical factors (e.g. increased prevalence of injuries). Unfortunately, change in training volume in the three disciplines with age was unknown in the present study. Further prospective studies would be necessary to quantify the changes in training volume in triathletes with age because training history is an important aspect of performance status at an older age.

For both Olympic and Ironman triathlons, swimming and running performances decline in a similar manner until 65–70 years. This result differs from those of Tanaka and Seals [25] who found a smaller reduction in swimming than in running performances with advancing age. These authors suggested that the two hypotheses to explain this task-specific difference were a greater dependence on biomechanical techniques for swimming than for running, and a greater prevalence of orthopaedic injuries during running with advancing age, which could limit the training volume compared with swimming [9]. However, Tanaka and Seals [25] analysed the changes in swimming performance with advancing age for distance ≤1500 m in swimming pool conditions that differ greatly from open-water conditions in triathlon. Open-water conditions might include currents and waves especially in the ocean (3.8 km swim at Hawaii Ironman); moreover in triathlon, the swimming start is a mass start, a stressful situation in which triathletes may become disturbed, especially when they are not very good swimmers. In addition, triathletes may not swim at the maximal speeds because they have to cycle and run following the swim. All these factors might explain a greater reduction in swimming performances with advancing age in triathlon compared to conventional swimming in the pool and therefore the absence of differences between changes in running and swimming performance with advancing age in triathlon.

Task duration and age-related changes in performance

Age-related changes in swimming performance were not influenced by task duration; the magnitudes of decreases in swimming performance were similar for Olympic versus Ironman triathlon. Swimming is the first discipline during a triathlon, so triathletes perform it without suffering from accumulated fatigue in contrast to the cycling and running disciplines. On average, swimming performance declines by ~15% at 50 years old, and reaches ~38% by 70 years of age. Previous studies showed no effect of task duration for shorter swimming distance events. For example, Tanaka & Seals [24] found no significant differences in the magnitude of performance decline with age (~32% at 70 yrs age) among distance events ranging from 100–1500 m in pool. The lower performance decline observed by these authors for the same age (70 yrs old) compared with triathlon data might be due to the differences between the water conditions: calm in swimming pool versus stochastic in open water for triathlon.

In contrast to swimming, the magnitude of the declines in cycling and running performances with advancing age at Olympic triathlon was less pronounced than at Ironman triathlon. It is not clear why task duration in triathlon exerts an influence on age-related declines in cycling and running performance. For the 70–74 yrs age group, the finish time was ~3 h for the Olympic triathlon versus ~15 h for Ironman triathlon. Certainly the Ironman triathlon induces greater neuromuscular fatigue in cycling and running compared with Olympic triathlon [15,18]. Furthermore, muscle damage during 10 km run of Olympic distance is limited compared to that occurring during the Ironman marathon [17,23]. Endurance exercise increases the use of endogenous fuels to provide energy for working muscles. However, resting muscle glycogen concentration is diminished in older humans [6], and hepatic gluconeogenic and glyconeogenic capabilities have been found to decline with age [19]. Older subjects oxidize more glucose and less fat during moderate intensity exercise [16]. This shift in substrate use is presumably caused by age-related changes in skeletal muscle, including decreased skeletal muscle respiratory capacity. Similarly, Sial et al. [22] found that compared with young adults, fat oxidation was lower in older adults during endurance exercise performed at either the same absolute or relative intensity. Changes in substrates availability and utilisation with advancing age could explain in part the task duration effect on triathlon performances at least in cycling and running.

Conclusion

This cross-sectional study found that the age related declines in cycling performance are less than in swimming and running at both Olympic and Ironman triathlons. These findings indicate that age related declines in endurance performance are specific to the ocomotor task although the cause for the task-specificity is not clear. In contrast to swimming, the magnitudes of age-related declines in cycling and running performance for the Ironman triathlon are greater than for the Olympic triathlon, suggesting that task duration exerts an important influence on the age-associated changes in triathlon performance. Further studies examining the changes in training volume and physiological characteristics of older triathletes are required to better understand the age-associated changes in triathlon performance and will provide valuable information for understanding the way to maintain physical capacity and performance with advanced age.

References

1 *Balmer J, Bird S, Davison R.* Indoor 16.1 km time-trial performance in cyclists aged 25–63 years. J Sports Sci 2008; 26: 57–62
2 *Balmer J, Bird S, Davison R, Lucia A.* Effect of age on 16.1 km time-trial performance. J Sports Sci 2008; 26: 197–206
3 *Baudry S, Klass M, Pasquet B, Duchateau J.* Age-related fatigability of the ankle dorsiflexor muscles during concentric and eccentric contractions. Eur J Appl Physiol 2007; 100: 515–525
4 *Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR.* Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance. Sports Med 2002; 32: 345–359
5 *Bernard T, Sultana F, Lepers R, Hausswirth C, Brisswalter J.* Age related decline in Olympic triathlon performance: effect of locomotion mode. Exp J Gerontol (in press)

6 *Cartee GD*. Aging skeletal muscle: response to exercise. Exerc Sport Sci Rev 1994; 22: 91–120
7 *Chapman DW, Newton M, McGuigan MR, Nosaka K*. Comparison between old and young men for responses to fast velocity maximal lengthening contractions of the elbow flexors. Eur J Appl Physiol 2008; 104: 531–539
8 *Donato AJ, Tench K, Glueck DH, Seals DR, Eskurza I, Tanaka H*. Declines in physiological functional capacity with age: a longitudinal study in peak swimming performance. J Appl Physiol 2003; 94: 764–769
9 *Egermann M, Brocai D, Lill CA, Schmitt H*. Analysis of injuries in long-distance triathletes. Int J Sports Med 2003; 24: 271–276
10 *Faulkner JA, Davis CS, Mendias CL, Brooks SV*. The aging of elite male athletes: age-related changes in performance and skeletal muscle structure and function. Clin J Sport Med 2008; 18: 501–507
11 *Fuchi T, Iwaoka K, Higuchi M, Kobayashi S*. Cardiovascular changes associated with decreased aerobic capacity and aging in long-distance runners. Eur J Appl Physiol 1989; 58: 884–889
12 *Kallinen M, Markku A*. Aging, physical activity and sports injuries. An overview of common sports injuries in the elderly. Sports Med 1995; 20: 41–52
13 *Kreider RB*. Physiological considerations of ultraendurance performance. Int J Sport Nutr 1991; 1: 3–27
14 *Lepers R*. Analysis of Hawaii ironman performances in elite triathletes from 1981–2007. Med Sci Sports Exerc 2008; 40: 1828–1834
15 *Lepers R, Maffiuletti NA, Rochette L, Brugniaux J, Millet GY*. Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. J Appl Physiol 2002; 92: 1487–1493
16 *Mittendorfer B, Klein S*. Effect of aging on glucose and lipid metabolism during endurance exercise. Int J Sport Nutr Exerc Metab 2001; 11: S86–91
17 *Neubauer O, König D, Wagner KH*. Recovery after an Ironman triathlon: sustained inflammatory responses and muscular stress. Eur J Appl Physiol 2008; 104: 417–426
18 *Place N, Lepers R, Deley G, Millet GY*. Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. Med Sci Sports Exerc 2004; 36: 1347–1356
19 *Podolin DA, Pagliassotti MJ, Gleeson TT, Mazzeo RS*. Influence of endurance training on the age-related decline in hepatic glyconeogenesis. Mech Ageing Dev 1994; 75: 81–93
20 *Pollock ML, Foster C, Knapp D, Rod JL, Schmidt DH*. Effect of age and training on aerobic capacity and body composition of master athletes. J Appl Physiol 1987; 62: 725–731
21 *Pollock ML, Mengelkoch LJ, Graves JE, Lowenthal DT, Limacher MC, Foster C, Wilmore JH*. Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. J Appl Physiol 1997; 82: 1508–1516
22 *Sial S, Coggan AR, Hickner RC, Klein S*. Training-induced alterations in fat and carbohydrate metabolism during exercise in elderly subjects. Am J Physiol 1998; 274: E785–790
23 *Suzuki K, Peake J, Nosaka K, Okutsu M, Abbiss CR, Surriano R, Bishop D, Quod MJ, Lee H, Martin DT, Laursen PB*. Changes in markers of muscle damage, inflammation and HSP70 after an Ironman Triathlon race. Eur J Appl Physiol 2006; 98: 525–534
24 *Tanaka H, Seals DR*. Age and gender interactions in physiological functional capacity: insight from swimming performance. J Appl Physiol 1997; 82: 846–885
25 *Tanaka H, Seals DR*. Invited Review: Dynamic exercise performance in masters athletes: insight into effects of primary human aging on physiological functional capacity. J Appl Physiol 2003; 95: 2152–2162
26 *Tanaka H, Seals DR*. Endurance exercise performance in Masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. J Physiol 2008; 586: 55–63
27 *Toth MJ, Matthews DE, Tracy RP, Previs MJ*. Age-related differences in skeletal muscle protein synthesis: relation to markers of immune activation. Am J Physiol 2005; 288: E883–E891
28 *Trappe S*. Marathon runners: how do they age? Sports Med 2007; 37: 302–305
29 *Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR*. Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. J Appl Physiol 1995; 78: 823–829
30 *Vijayan K, Thompson JL, Norenberg KM, Fitts RH, Riley DA*. Fiber-type susceptibility to eccentric contraction-induced damage of hindlimb-unloaded rat AL muscles. J Appl Physiol 2001; 90: 770–776

III.1.F **Synthèse**

Compte tenu des spécificités des épreuves de triathlon distance olympique (1,5 km de natation, 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied) et *Ironman* (3,8 km de natation, 180 km de cyclisme et 42,2 km de course à pied), les sollicitations physiologiques sont différentes (Kreider 1991). Le déclin des performances avec l'âge pourrait donc différer selon le format de l'épreuve de triathlon. Dans la continuité des deux premières études relatives au déclin des performances en triathlon, l'objectif de celle-ci était double : analyser le déclin des performances avec l'âge sur triathlon *Ironman* ainsi que pour chaque mode de locomotion et comparer les résultats avec les résultats observés sur triathlon distance olympique (i.e. comparer l'effet de l'âge sur les performances sur triathlon distance olympique vs. *Ironman*).

Le travail effectué dans la précédente étude Bernard et al. 2010 pour le triathlon distance Olympique a été repris et complété pour le triathlon *Ironman* en traitant et analysant les données des championnats du Monde 2006 et 2007 sur cette distance selon la même méthode (Baker et al. 2003).

Le déclin des performances sur *Ironman* exprimé sous la forme d'un ratio entre la meilleure performance de la population totale et la performance du groupe d'âge selon la méthodologie proposée par Baker et al. (2003) décroît de manière curvilinéaire avec l'âge et devient significatif par rapport au groupe d'âge précédent à partir de 45 ans. Il est plus prononcé sur *Ironman* que sur distance olympique. Sur les deux types d'épreuves, la contribution de chaque mode de locomotion sur la performance totale n'évolue pas avec l'âge (17,2 ± 0,6 ; 47,6 ± 1,6 ; 28,8 ± 0,6 % du temps total respectivement en natation, en cyclisme et en cours à pied pour le triathlon distance olympique ; 11,3 ± 0,4 ; 52,3 ± 1,3 ; 35,1 ± 1,0 % pour l'*Ironman*).

Pour chaque mode de locomotion, le ratio des performances sur *Ironman* décroît également de manière curvilinéaire avec l'âge. Comparé aux autres modes de locomotion, un moindre déclin des performances en cyclisme est observé sur *Ironman.* Cependant, il devient significatif par rapport au groupe d'âge précédent après 50 ans alors que ce n'était le cas qu'après 55 ans sur distance olympique. Comme pour la natation, le déclin en course à pied devient significatif par rapport au groupe d'âge précédent à 45 ans alors que ce n'était le cas qu'après 50 ans sur distance olympique.

La comparaison du déclin entre l'épreuve distance olympique et *Ironman* montre que le déclin est moins prononcé sur distance olympique ($p<0,01$) pour la performance totale, en

cyclisme et en course à pied respectivement pour les groupes d'âge au dessus de 55 ans et 50 ans. Le déclin de la performance en natation semble indépendant du format de l'épreuve distance olympique ou *Ironman*.

L'amplitude des déclins observés en cyclisme et en course à pied est plus grande sur *Ironman.* Cette dernière observation suggère que la durée de la tâche pourrait être un facteur important de l'évolution des performances avec l'âge en triathlon.

III.2 Etude 2 : Modèle du « *Master* triathlète »

III.2.A **Réponse cardio-ventilatoire et musculaire avant et après un triathlon**

Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes

Frédéric Sultana, Chris R Abbiss, Julien Louis, Thierry Bernard, Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter.

Eur J Appl Physiol.
(on press).

Eur J Appl Physiol
DOI 10.1007/s00421-011-2115-9

ORIGINAL ARTICLE

Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes

Frédéric Sultana · Chris R. Abbiss · Julien Louis · Thierry Bernard · Christophe Hausswirth · Jeanick Brisswalter

Received: 19 May 2011 / Accepted: 2 August 2011
© Springer-Verlag 2011

Abstract The aim of the present study was to compare the maximal isometric torque and cardio-respiratory parameters in well-trained young and master triathletes prior to and following an Olympic distance triathlon. One day before and 24 h following the event, participants performed three maximum voluntary isometric knee extensions and flexions and an incremental running test on a treadmill to determine the maximal isometric torque, maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$), speed at $\dot{V}O_{2max}$ (vVO_2max), speed at ventilatory thresholds (VT1 and VT2) and submaximal running economy. Prior to the event $\dot{V}O_{2max}$, vVO_2max, speed at ventilatory thresholds and running economy were significantly lower in master athletes, but maximal voluntary torque was similar between the groups. 24 h following the race, a similar significant decrease in $\dot{V}O_{2max}$ (−3.1% in masters, and −6.2% in young, $p < 0.05$), and vVO_2max (−9.5% in masters, and −5.6% in young, $p < 0.05$) was observed in both the groups. The speed at VT2 significantly decreased only in master athletes (−8.3%, $p < 0.05$), while no change was recorded in maximal voluntary torque or submaximal running economy following the event. The results indicate that for well-trained subjects, the overall relative exercise intensity during an Olympic distance triathlon and the fatigue 24 h following the event seem to be independent of age.

Keywords Ageing · Muscular performance · Maximal oxygen consumption · Ventilatory threshold · Master athlete · Triathlon

Communicated by David C. Poole.

F. Sultana · T. Bernard
LAHMESS, University of South France Toulon-Var, Toulon, France

C. R. Abbiss
School of Exercise, Biomedical and Health Sciences, Edith Cowan University, Joondalup, Australia

C. R. Abbiss
Department of Physiology, Australian Institute of Sport, Belconnen, ACT, Australia

C. R. Abbiss
Division of Materials Science and Engineering, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Belmont, VIC, Australia

J. Louis · J. Brisswalter (✉)
Laboratory of Human Motricity, Education Sport and Health, University of Nice Sophia Antipolis, 261, Route de Grenoble BP 3259, 06205 Nice Cedex 03, Nice, France
e-mail: brisswalter@unice.fr

C. Hausswirth
Institut National du Sport de L'Expertise et de la Performance (INSEP), Paris, France

Published online: 19 August 2011

Introduction

Master athletes are individuals that, despite ageing, maintain a high degree of physical fitness through regular participation in training and competition (Tanaka and Seals 2008). Since master athletes remain physically active as they age, observing such individuals can give a better insight into age-induced changes in physiology and adaptability. Competitors are traditionally classified as master athletes beyond 35 years of age, which is the age at which a first decline in peak endurance performance is observed (Bernard et al. 2010; Lepers et al. 2010; Tanaka and Seals 2008). In a recent review it has been suggested

that reductions in maximal oxygen uptake $\left(\dot{V}O_{2\,max}\right)$ and the fractional utilisation of $\dot{V}O_{2max}$ are the main factors responsible of the decrease in endurance performance observed in master athletes (Tanaka and Seals 2008). Despite exhibiting decreases in maximal oxygen uptake, and associated structural changes in skeletal muscle, several studies have shown that master endurance athletes are able to maintain a high level of performance, when compared with untrained subjects (Bernard et al. 2010; Trappe et al. 1996). However, even if the decline in performance is attenuated in masters, there is a common belief among the athletes and coaches that older athletes need longer recovery time between training sessions and following competition. The only few data available concerning the recovery in masters have been recorded during the ultra endurance events. For example, Easthope et al. (2010) have shown that fatigue and muscle damage (assessed by changes in maximal isometric torque and plasmatic concentration of creatine kinase) recorded immediately (1 h) following an ultra-endurance running event was similar between master and young athletes, yet the rate of return to baseline values was slowed in masters. Furthermore, Fell et al. (2008) have reported greater sensations of muscle pain or fatigue in well-trained elderly people within the days following exercise when compared with young subjects, signifying that muscle damage could be greater in masters and/or recovery mechanisms could be altered with ageing. Observing mechanisms of fatigue between young and master athletes following the exercise can enable scientists to develop effective recovery strategies, beneficial for maintaining the performance.

Over the last decade the participation of athletes in structured master level sport has dramatically increased, especially in long distance endurance events. For example, the number of master athletes competing in Triathlon World Championship has increased by 30% over a period of 4 years, between 2004 and 2007 (Bernard et al. 2010). Despite the increasing participation of master athletes in endurance triathlon events, no study has, to the best of our knowledge, examined the influence of age on muscle function and classical determinants of endurance performance following a triathlon. Only one study has investigated the physiological responses 24 h after an Olympic distance triathlon performed by young adults (Le Gallais et al. 1999). In this study, the authors showed that oxygen uptake $\left(\dot{V}O_2\right)$ at ventilatory threshold and $\dot{V}O_{2max}$ were not influenced by fatigue within the day following completion of the event, when compared with the pre-triathlon exercise values (Le Gallais et al. 1999)

Within this framework, the purpose of the present study was to compare the main physiological factors involved in endurance performance, namely maximal torque production capacity, maximal oxygen consumption, ventilatory thresholds and submaximal running economy, between young and master participants prior to and following an Olympic distance triathlon. We hypothesized that the recovery in these parameters following the competition of triathlon would be attenuated in master athletes when compared with young athletes.

Methods

Participants

Nineteen endurance-trained male triathletes (10 masters, age: 40–70 years, and 9 young, age: 20–35 years) volunteered to participate in this study. The characteristics of the participants are shown in Table 1. All the subjects were recruited from triathlon clubs and were actively participating in triathlon racing at the time of testing. All participants had previously competed in triathlon events (at least 5 per year) and were free from present or past neuromuscular and metabolic diseases. At the time of testing all participants were also free from injury. Training volume in 3 months preceding the event was not different between the young and master triathletes (15.4 ± 2.3 vs. 13.6 ± 1.7 h week^{-1}, respectively for young and masters, $p > 0.05$). All subjects were volunteers and were informed about the study protocol, and the risks of tests and investigations. The study was approved by the local Ethics Committee (St Germain en Laye, France) before its initiation.

Experimental procedure

One day before and 24 h following an Olympic distance triathlon race, participants performed maximum voluntary isometric knee extension and knee flexion exercises, and an incremental continuous running test on a treadmill, to determine $\dot{V}O_{2\,max}$, ventilatory thresholds and the energy cost of running (described below). Participants were asked to avoid strenuous exercise in the 24 h preceding testing sessions.

Maximal isometric contraction

Maximal voluntary contraction torque (MVC) of the knee extensors (KE) and flexors (KF) of the right leg were recorded using an isometric dynamometer (Biodex system 3: Biodex medical, Shirley, NY, USA). Subjects were comfortably seated and the dynamometer arm was securely strapped around the right ankle. The knee angle was fixed at 90° (0° = full knee extension). Extraneous movement of

Table 1 Physiological characteristics and training volume of master and young triathletes

	Young (20–39 years)		Master (≥40 years)	
	Mean	SD	Mean	SD
N	9		10	
Age (years)	28.4	6.1	52.4#	10.0
Height (cm)	180.8	2.3	178.1	8.4
Body mass (kg)	73.0	5.5	74.3	8.8
Weekly swimming training time (h week^{-1})	3.7	2.1	2.8	1.9
Weekly cycling training time (h week^{-1})	8.3	2.1	7.4	3.3
Weekly running training time (h week^{-1})	3.4	1.0	3.4	1.3

Significant difference between young and masters ($p < 0.05$)

the upper body was limited by two harnesses placed across the chest and a harness across the abdomen. For each testing session the subjects were asked to perform three maximal isometric (0 rad s^{-1}) knee extension contractions followed by three knee flexion contractions. All contractions were for a period of 5 s with a rest period of 1 min given between all the contractions. The subjects were strongly encouraged during all MVCs. The best performance during the three trials was selected as the maximal isometric voluntary contraction torque (MVC, in N.m).

Incremental exercise test

Participants performed an incremental running test to exhaustion on motorized treadmill (EF 1800, Medical Development, France), according to the criteria described by Howley et al. (1995). Briefly, participants ran for 6 min at 9 ± 1 km h^{-1} (to take into account fitness and age) and 0% grade, after which the velocity of running was increased by 1 km h^{-1} every 1 min until the subject reached volitional exhaustion. Each subject was verbally encouraged to continue exercising until fatigue. Throughout the exercise, gas exchange data $(\dot{V}O_2, \dot{V}CO_2)$ and expired ventilation $(\dot{V}E)$ were measured breath-by-breath and averaged over each 5 s interval using an automated breath-by-breath system (Oxycon Beta, Jaeger, Germany). Gas and flow analyzers were calibrated before and after each session using gases of known concentration and a 3 L syringe (Hans Rudolph, Kansas City, MO). Analyzers variation never exceeded 0.02% for CO_2 and 0.01% for O_2.

$\dot{V}O_{2\,max}$ was determined as the average of the four highest consecutive $\dot{V}O_2$ values recorded. The criteria used to ensure participants reached $\dot{V}O_{2max}$ were a plateau in $\dot{V}O_2$ despite an increase in power output, a RER above 1.1, and a heart rate (HR) above 90% of the predicted maximal heart rate (Howley et al. 1995). In this study, the lack of a plateau in VO_2 was observed in one young and one master subject during pre-testing, and one young and two master athletes during post-testing. The velocity necessary to elicit $\dot{V}O_{2max}$ (vVO_2max) was defined as the treadmill velocity corresponding to the beginning of the plateau in $\dot{V}O_{2max}$. The first and the second ventilatory thresholds (VT1 and VT2, respectively) were determined according to the criteria previously described by Peiffer et al. (2008) VT1 was defined as an increase in the ventilatory equivalent for oxygen $(\dot{V}E/\dot{V}O_2)$ with no concomitant increase in the ventilatory equivalent for carbon dioxide $(\dot{V}E/\dot{V}CO_2)$ and the departure from linearity of $\dot{V}E$. VT2 was established using the criteria of an increase in both $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ and $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$. Visual determination was performed by two investigators in a blinded manner. If there was disagreement, the opinion of a third investigator was sought. Oxygen consumption during the final 2 min of the initial 6 min at 9 ± 1 km h^{-1} was used to provide an indication of running economy (ml kg^{-1} min^{-1}). This speed represents 79.9 + 4.4% VT1 in young subjects and 83.3 + 5.2% VT1 in masters, without any significant difference between the groups. Heart rate was continuously recorded throughout the incremental exercise test using a portable heart rate monitor (RS800sd, Polar Electro Kempele, Finland).

Race conditions

The Olympic distance triathlon event consists of a 1.5 km swim, followed by a 43 km cycle and a 10 km run. Swimming took place in the Mediterranean Sea with a water temperature of 21°C. The use of wetsuits and drafting were authorized during the swim. During the cycling, participants were required to climb uphill to an altitude of 550 m and drafting was forbidden. The run part of the event involved two laps of a hilly (overall elevation: 180 m) course. During the race, weather conditions were constant with mean temperature and wind speeds of 22.4 ± 0.3°C and 23.4 ± 0.2 km h^{-1}, respectively. Prior to and immediately following the race, body mass of the triathletes (in race clothes) was recorded. Heart rate was continuously monitored throughout the entire competition using a Polar heart monitor (Team system, Polar Electro Kempele, Finland). At the end of the race, subjects completed a questionnaire to assess the volume of fluid

ingested during the triathlon and the overall rating of perceived exertion (RPE) was recorded using the Borg 6–20 scale (Borg 1982). All race times were measured electronically by the event's official race timing system.

Statistical analysis

All data are presented as means ± SD. Each dependant variable was compared using a two-way (group vs. time point) ANOVA with repeated measures. Newman-Keuls post-hoc tests were used to determine between means differences if the analysis of variance revealed a significant main effect for the period or interaction of group × time point. Correlations between dependent variables were conducted using the Pearson's Correlation test. Statistical tests were conducted using Statistica version 7.0 (Statsoft, France). Significance was accepted when $p < 0.05$.

Results

Maximal voluntary torque and cardio-respiratory responses

Maximal voluntary torque and cardio-respiratory parameters measured before the race are presented in Table 2. A main effect of age was found for all cardio-respiratory parameters. $\dot{V}O_{2max}$, velocity at $\dot{V}O_{2max}$ (vVO_2max), speed at VT1 and VT2 were significantly lower (−15.5, −15.1, −14.9, −16.3%, respectively) and running economy was significantly higher (+5.2%) for masters, when compared with young participants. No significant differences in maximum voluntary torque for KF and KE exercises were observed between the groups.

Triathlon performance

All participants were able to complete the triathlon. The triathlon was covered by the overall winner in 02:08:14 (hh:mm:ss). Athletes in the present study completed the event in 02:45:10 ± 00:27:03. Overall performance time was significantly different between the two age groups (Table 3), however, no significant differences in relative intensity (assessed from %HR max) were found between young and master groups (91.3 ± 3.0 vs. 91.4 ± 2.6%, respectively; Fig. 1). RPE values at the end of the race were similar between young and master athletes (16 ± 2 vs. 15 ± 2, respectively). Moreover, no significant differences in weight lost and the volume of fluid ingested during the triathlon were observed between the two groups (Table 3).

Changes in maximal isometric torque and cardio-respiratory parameters following the race

24 h following the race, a significant time effect was found for all maximal cardio-respiratory parameters, without any interaction effect between young and master athletes (Table 4). vVO_{2max}, $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}E_{max}$ and HR_{max} significantly declined in both groups following the event (Table 4). A significant interaction effect was observed for the speed at VT2, with a greater decrease in masters, when compared with young athletes (−8.3 vs −2.5%, respectively; Table 4).

Running economy (RE) was significantly better in young (28.8 ± 2.4 ml min^{-1} kg^{-1}) when compared with master athletes (31.1 ± 3.2 ml min^{-1} kg^{-1}) before the triathlon race, however RE did not significantly change in either group following the race (+2.6 vs. −0.8%, respectively in young and masters, NS). No significant differences in maximal voluntary torque (KE and KF) were observed between pre- and post-testing sessions for both groups (Table 4).

Discussion

The purpose of the present study was to compare the muscle strength, maximal oxygen consumption, ventilatory

Table 2 Maximal isometric torque and cardio-respiratory parameters of master and young triathletes prior to competing in an Olympic distance triathlon

KE and *KF MVC* knee extensors and flexors maximal voluntary contraction, vVO_2max running speed at maximal oxygen uptake, *RE* running economy at 9 ± 1 km h^{-1}

Significant difference between young and masters ($p < 0.05$)

	Young (20–39 years)		Master (≥40 years)	
	Mean	SD	Mean	SD
N	9		10	
KE MVC (N.m)	201.0	40.5	208.7	36.5
KF MVC (N.m)	85.0	15.1	73.5	19.9
vVO_2max (km h^{-1})	19.8	1.0	16.8#	2.6
V_Emax (l min^{-1})	163.5	19.0	148.4	22.8
VO_2max (ml min^{-1} kg^{-1})	67.1	3.7	57.8#	8.7
Speed at VT1 (km h^{-1})	12.9	0.9	11.0#	1.4
Speed at VT2 (km h^{-1})	15.9	1.1	13.3#	1.8
RE (ml kg^{-1} min^{-1})	28.8	2.4	31.1#	3.2

Table 3 Performance time, relative intensity (%HR max), fluid loss and ratings of perceived exertion (RPE) of master and young triathletes performing in an Olympic distance triathlon

	Young (20–39 years)		Master (≥40 years)	
	Mean	SD	Mean	SD
N	9		10	
Total performance (hh:mm:ss)	02:28:22	00:10:28	03:00:17#	00:28:48
Swimming time (hh:mm:ss)	00:24:16	00:02:09	00:30:44#	00:07:17
Cycling time (hh:mm:ss)	01:23:40	00:05:23	01:38:13#	00:13:35
Running (hh:mm:ss)	00:40:27	00:03:57	00:51:19#	00:09:56
Total performance (% best time)	115.7	8.2	140.6#	22.5
Overall triathlon intensity(% HR max)	91.3	3.0	91.4	2.6
Weight lost during the race (kg)	2.31	1.12	2.14	1.37
Vol. of fluid ingested during race (l)	0.99	0.27	0.93	0.21
RPE of race (CR16)	15.7	2.5	15.4	2.2

Significant difference between young and masters ($p < 0.05$)

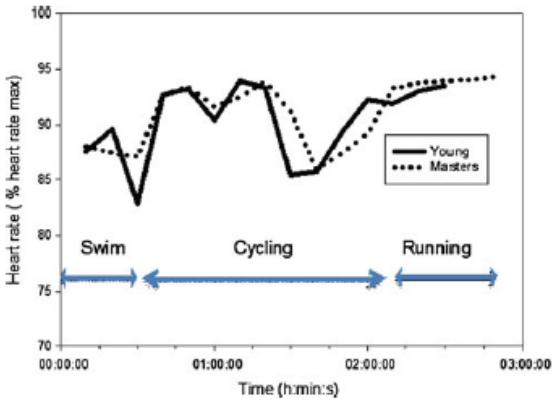


Fig. 1 Relative heart rate (% HR max) of masters and young triathletes performing in an Olympic distance triathlon

thresholds and submaximal running economy between the well-trained young and master participants prior to and following an Olympic distance triathlon. The main results of our study indicate that: (1) despite regular training, $\dot{V}O_{2max}$, vVO_2max and energy cost of running significantly declined with aging, yet muscular performance was found to be similar between the groups tested in this study; (2) following the race, $\dot{V}O_{2\,max}$ and vVO_{2max}, decreased in a similar manner regardless of age, however the decrease in running speed at VT2 was significantly lower in master athletes. No effect of the race was observed on maximal isometric strength or submaximal running economy.

The effects of ageing on maximal isometric performance in master triathletes

In this study, no significant difference in KE or KF maximal voluntary torque were observed between young and master athletes prior to the competition (Table 2). This is somewhat surprising since a decline in maximal torque-generating capacity is classically described with aging. Indeed, numerous studies on aging have reported a 15–35% decline of maximal muscle torque in trained or untrained elderly people (Bieuzen et al. 2010; Louis et al. 2009; Porter et al. 1995). This decline may occur beyond 35 years but is most prominent beyond 60 years and is typically explained by structural modifications of skeletal muscle; such as a loss in muscle mass and increase in non contractile volume (i.e. connective and fatty tissues), combined with possible alterations in muscle typology (II type to I type fibers) (Kent-Braun et al. 2000; Lexell 1995). The similar KE and KF maximal torque values recorded between the master and young athletes in the present study is also not in agreement with recent studies which have shown a reduction in maximal strength production for the quadriceps muscles in well-trained master ultra trail athletes (Easthope et al. 2010). For example, Easthope et al. (2010) have recently reported a 21.8 ± 4.6% difference in quadriceps strength between masters and young well-trained endurance ultra trail runners. We hypothesize that the difference between the results of this and previous studies could be related to the specificity of triathlon in which performance is not associated with a high muscular strength (Bentley et al. 1998) and strategies for improving performance in Olympic distance triathlon typically do not focus on strength training (Hausswirth and Brisswalter 2008). In fact, the young triathletes in the present study produced relatively low maximal voluntary torque compared with previous studies in ultra-trail runners [i.e. 201 ± 40 vs. 252 ± 32 N.m in Easthope et al. (2010) study]. Furthermore, it is possible that the master triathletes in the present study were too young (52.4 ± 10 years) to present significant declines in maximal torque similar to those reported in the literature. In the scientific literature, studies on this topic are typically comparative; therefore, there is a need of longitudinal

Table 4 Percent of change in maximal isometric torque of the knee extensors (KE) and knee flexors (KF) and cardio-respiratory parameters in master and young triathletes following an Olympic distance triathlon

	Young (20–39 years)		Master (≥40 years)	
	Mean	SD	Mean	SD
Muscular performance				
KE MVC (%)	2.3	5.6	−1.4	−0.3
KF MVC (%)	5.4	9.9	3.1	2.6
Cardio-respiratory values				
Max				
vVO_2max (%)	−5.6*	0.5	−9.5*	−3.0
VO_2max (%)	−6.2*	−3.4	−3.1*	−6.8
V_Emax (%)	−13.4*	−3.4	−11.1*	2.4
HR max (%)	−4.4	−1.1	−5.1	−1.1
VT2				
Speed (%)	−2.5	0.1	−8.3*#	0.8
VT1				
Speed (%)	−2.3	−1.6	−3.6*	−0.9
Running economy (%)	2.6	−1.8	−0.8	−2.9

* Significant difference between pre and post race

Significant difference between young and masters ($p < 0.05$)

studies to assess the possible protective effect of regular triathlon training on strength loss with aging.

The effects of ageing on cardio-respiratory parameters for master triathletes

The master triathletes in this study displayed the expected reductions in $\dot{V}O_{2max}$ when compared with their young counterparts. On the basis of linear regression analysis, $\dot{V}O_{2max}$ (ml kg^{-1} min^{-1}) was inversely related to age ($r = 0.76$) in master triathletes (Fig. 2) and the observed absolute rate of decline followed a slope of −4.2 ml kg^{-1} min^{-1} decade^{-1} (from baseline level of 79.4 ml kg^{-1} min^{-1}). This absolute rate of decline could be compared with the study of Pimentel et al. (2003) who have reported an absolute rate of decline in $\dot{V}O_{2max}$ of −5.4 ml kg^{-1} min^{-1} decade^{-1} in endurance-trained men (from baseline level of 80.7 ml kg^{-1} min^{-1}) and −3.9 ml kg^{-1} min^{-1} decade^{-1} in sedentary participants. The mean $\dot{V}O_{2max}$ decline recorded in masters participating in the present study was of 6.8% per decade, in accordance with previous values reported by Trappe et al. (1996) for highly trained athletes, but lower than the values reported for trained (−10% per decade) fit (−15% per decade) and untrained individuals (−15% per decade). These results confirm that the regular endurance training is efficient in limiting the decline in $\dot{V}O_{2max}$ with ageing. In the present study, a decrease in speed at VT1 and VT2 was also recorded. However, when the speed at VT1 was expressed as a percentage of $\dot{V}O_{2max}$, an increase was observed with ageing ($r = 0.65$; Fig. 3). The increase in relative values of VT1 is in accordance with the study of Peiffer et al. (2008) in master cyclists and longitudinal studies in regularly trained runners (Wiswell et al. 2000). As previously mentioned a reduction in $\dot{V}O_{2max}$ is classically observed with ageing (Peiffer et al. 2008) and thus expressing ventilatory threshold as a percentage of $\dot{V}O_{2max}$ leads to higher values in old populations. Within this framework, the blood lactate threshold of master athletes, especially those competing in endurance events, occurs at a higher percentage of their $\dot{V}O_{2max}$ when compared with young subjects (Allen et al. 1985; Coggan et al. 1990). It is also possible that an increase in threshold observed in master athletes may be related to an increase in oxidative enzymes such as succinate dehydrogenase and b-hydroxyacyl-CoA and a decrease in lactate dehydrogenase found to exist in older athletes (Allen et al. 1985; Coggan et al. 1990). Such differences in skeletal muscle characteristics may explain the master athletes' ability to perform as well as some young runners despite a lower $\dot{V}O_{2max}$. However, it should be noted that the higher threshold values (as a percentage of $\dot{V}O_{2max}$) observed in master athletes in the present study was found only for VT1. The % $\dot{V}O_{2max}$ and $\%HR_{max}$ at VT2 were similar for young and masters triathletes. In our study we also observed a significant decrease in running economy (RE) with aging, but no effect of fatigue on RE in both groups. This result is not in accordance with the cross-sectional study of Allen et al. (1985) who did not find any difference in running economy between young and older male athletes. Based on these results, it is often hypothesized that the energy cost of locomotion does not contribute significantly to the decrease in endurance exercise performance observed with advancing age (Allen et al. 1985; Reaburn and Dascombe 2008). A limitation of our study was that the speed used to assess running economy was low (i.e. 9 ± 1 km h^{-1}), when

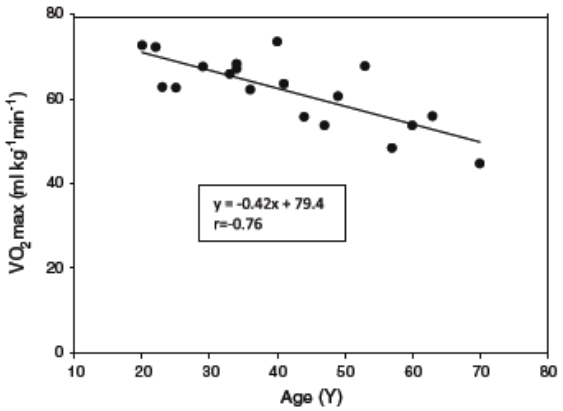


Fig. 2 Relationship between age and maximal aerobic consumption $(\dot{V}O_{2\,max})$ in masters and young triathletes

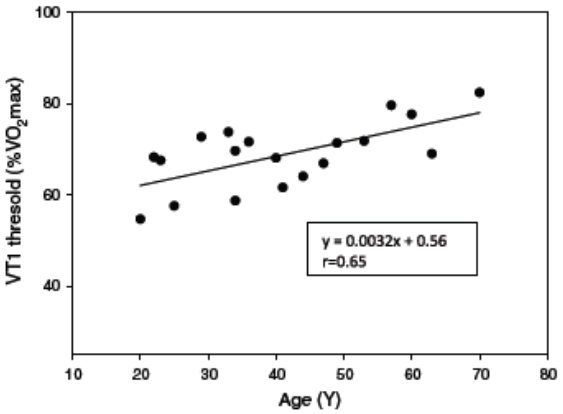


Fig. 3 Relationship between age and first ventilatory threshold (VT1) as a percentage of maximal oxygen uptake $(\dot{V}O_{2\,max})$ in master and young triathletes

compared with running speeds used by triathletes during racing (i.e. 12.1 ± 2.2 vs. 14.9 ± 1.3 km h^{-1} for master and young subjects, respectively) thus further investigations are needed to examine the role of efficiency on performance in masters.

The effects of ageing on triathlon performance

Performance during the triathlon was significantly different between the young and master athletes, which is in accordance with recent studies (Bernard et al. 2010; Lepers et al. 2010). In our study, both young and master triathletes performed the Olympic triathlon at similar relative intensities (91.3 ± 3.0 vs. 91.4 ± 2.6% of maximal heart rate, respectively for young and masters). This result indicates that for trained participants, the overall exercise intensity during an Olympic distance triathlon is independent of age

Changes in muscular performance and cardio-respiratory parameters 24 h after completion of a distance Olympic triathlon

No significant differences in maximal voluntary torque (KE and KF) were observed as the end of the triathlon, in both groups. After ultra endurance events, a decline in maximal voluntary torque is often observed and may be related to muscle fatigue development (Easthope et al. 2010; Millet et al. 2002, 2003). For example, Millet et al. 2002, 2003 recorded a 30% decline in maximal voluntary torque of the knee extensors following a 65 km ultra marathon and a 24% decline after a 30 km running race. Furthermore, Easthope et al. (2010) have recently shown that the reduction in MVC after ultra-endurance trail running is still significant in master athletes 24 h following the race, whereas no effect was observed in young subjects. Such results indicate that master athletes may have a reduced recovery ability following endurance exercise. The possibility to compare the Olympic triathlon and ultra endurance exercise results needs some caution since Olympic distance triathlon is less fatiguing than an ultra-endurance event. In the present study maximal voluntary torque of the knee flexors and extensors 24 h after the race was not significantly different to pre-values in both groups. When compared with previous studies, the duration of the race (2–3 h) was probably too short to induce a significant muscular fatigue. On the other hand, the triathlon involves three locomotion modes with the cycling and swimming portions of the race relying heavily on concentric work, which does not induce the same structural muscle damage classically described with eccentric contractions during running (Nicol et al. 2006).

In this study, a decrease in maximal values of oxygen uptake and ventilation was recorded 24 h following the race without the difference between young and master triathletes. Decreases in maximal oxygen uptake, ventilation and heart rate observed in this study are discordant from the study of Le Gallais et al. (1999) who did not find any effect of an Olympic triathlon on cardio-respiratory parameters recorded 24 h post race in young subjects. These differences may be explained by the longer race performed in the present study (hh:mm; 01:56 ± 00:07 vs. 02:45 ± 00:27) which was likely to be the result of the hilly course geography. The effect of exercise duration could also explain the interaction effect observed at VT2. In our study, the master triathletes raced 32 min longer than young triathletes. Consequently, the duration of exercise was approximately 20% more for masters compared with young subjects. Recently, Lepers et al. (2010) have reported that age-related declines in cycling and running performance for the Ironman triathlon are greater than for the Olympic triathlon, suggesting that task

duration has an important influence on the age-associated changes in triathlon performance. Furthermore, some physiological alterations associated with aging such as lower resting muscle glycogen concentration (Cartee et al. 1994), lower fat oxidation (Sial et al. 1998), or changes in substrates availability and utilization for a same relative intensity could enhance the effect of race duration on performance in master athletes.

Conclusions

The purpose of this study was to compare the muscle performance and classical cardio-respiratory determinants of endurance performance between young and master participants prior to, during and following an Olympic distance triathlon. The results indicate that for trained subjects, the overall relative exercise intensity during an Olympic distance triathlon and the fatigue effects 24 h following the race appear to be independent of the participant's age. Such results will allow coaches, athletes and sport scientists to better prescribe training intensities, evaluate the duration necessary for recovery and develop training groups mixing young and master triathletes. Further studies examining the influence of age on the time course of recovery following the exercise and changes in physiological characteristics of older triathletes (i.e. seniors, +70 years) are warranted.

References

Allen WK, Seals DR, Hurley BF, Ehsani AA, Hagberg JM (1985) Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. J Appl Physiol 58:1281–1284

Bentley DJ, Wilson GJ, Davie AJ, Zhou S (1998) Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. J Sports Med Phys Fitness 38:201–207

Bernard T, Sultana F, Lepers R, Hausswirth C, Brisswalter J (2010) Age-related decline in olympic triathlon performance: effect of locomotion mode. Exp Aging Res 36:64–78

Bieuzen F, Hausswirth C, Louis J, Brisswalter J (2010) Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. Gerontology 56:66–72

Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. Med Sci Sports Exerc 14:377–381

Cartee GD, Kietzke EW, Briggs-Tung C (1994) Adaptation of muscle glucose transport with caloric restriction in adult, middle-aged, and old rats. Am J Physiol 266:R1443–R1447

Coggan AR, Spina RJ, Rogers MA, King DS, Brown M, Nemeth PM, Holloszy JO (1990) Histochemical and enzymatic characteristics of skeletal muscle in master athletes. J Appl Physiol 68:1896–1901

Easthope CS, Hausswirth C, Louis J, Lepers R, Vercruyssen F, Brisswalter J (2010) Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. Eur J Appl Physiol 110:1107–1116

Fell J, Reaburn P, Harrison GJ (2008) Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. J Sports Med Phys Fitness 48:272–277

Hausswirth C, Brisswalter J (2008) Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. Sports Med 38:881–891

Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. Med Sci Sports Exerc 27:1292–1301

Kent-Braun JA, Ng AV, Young K (2000) Skeletal muscle contractile and noncontractile components in young and older women and men. J Appl Physiol 88:662–668

Le Gallais D, Hayot M, Hue O, Wouassi D, Boussana A, Ramonatxo M, Prefaut C (1999) Metabolic and cardioventilatory responses during a graded exercise test before and 24 h after a triathlon. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 79:176–181

Lepers R, Sultana F, Bernard T, Hausswirth C, Brisswalter J (2010) Age-related changes in triathlon performances. Int J Sports Med 31:251–256

Lexell J (1995) Human aging, muscle mass, and fiber type composition. J Gerontol A Biol Sci Med Sci 50:11–16

Louis J, Hausswirth C, Bieuzen F, Brisswalter J (2009) Muscle strength and metabolism in master athletes. Int J Sports Med 30:754–759

Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G (2002) Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. J Appl Physiol 92:486–492

Millet GY, Martin V, Lattier G, Ballay Y (2003) Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. J Appl Physiol 94:193–198

Nicol C, Avela J, Komi PV (2006) The stretch-shortening cycle : a model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. Sports Med 36:977–999

Peiffer JJ, Abbiss CR, Chapman D, Laursen PB, Parker DL (2008) Physiological characteristics of masters-level cyclists. J Strength Cond Res 22:1434–1440

Pimentel AE, Gentile CL, Tanaka H, Seals DR, Gates PE (2003) Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained than in sedentary men. J Appl Physiol 94:2406–2413

Porter MM, Vandervoort AA, Lexell J (1995) Aging of human muscle: structure, function and adaptability. Scand J Med Sci Sports 5:129–142

Reaburn P, Dascombe B (2008) Endurance performance in masters athletes. Eur Rev Aging Phys Act 5:31–42

Sial S, Coggan AR, Hickner RC, Klein S (1998) Training-induced alterations in fat and carbohydrate metabolism during exercise in elderly subjects. Am J Physiol 274:E785–E790

Tanaka H, Seals DR (2008) Endurance exercise performance in Masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. J Physiol 586:55–63

Trappe SW, Costill DL, Vukovich MD, Jones J, Melham T (1996) Aging among elite distance runners: a 22 year longitudinal study. J Appl Physiol 80:285–290

Wiswell RA, Jaque SV, Marcell TJ, Hawkins SA, Tarpenning KM, Constantino N, Hyslop DM (2000) Maximal aerobic power, lactate threshold, and running performance in master athletes. Med Sci Sports Exerc 32:1165–1170

III.2.B **Synthèse**

L'analyse du déclin des performances avec l'âge en triathlon (Sultana et al. 2008; Lepers et al. 2009; Bernard et al. 2010) a mis en évidence un certain nombre d'hypothèses susceptibles d'être expliquées par l'étude du modèle du *Master* triathlète. Un travail récent rapporte une fatigabilité accrue et une plus grande sensibilité aux dommages musculaires avec le vieillissement chez les *Masters* athlètes (Easthope et al. 2010).

Outre l'effet de l'âge sur les principaux facteurs de la performance en endurance (Tanaka et Seals 2008), il apparait intéressant d'évaluer l'impact d'une compétition de triathlon sur la fatigue et les réponses à l'exercice induites par cette épreuve.

L'objet de cette étude était donc de comparer le couple maximal isométrique lors d'une flexion et d'une extension de la jambe et les paramètres cardio-respiratoires chez des jeunes et des *Masters* triathlètes bien entrainés, avant et après un triathlon distance olympique, et de mesurer la réponse cardiaque des sujets lors l'épreuve.

Un jour avant et 24 heures après la compétition, les sujets ont réalisé trois extensions et flexions volontaires maximales du genou et un test triangulaire maximal en course à pied sur tapis roulant afin de déterminer les valeurs de couple maximal isométrique, de $\dot{V}O_{2max}$, de vitesse à $\dot{V}O_{2max}$ (vVO_{2max}), de vitesses aux seuils ventilatoires (vSV1 et vSV2) et du CE en course à pied (à allure sous maximale). Durant l'épreuve du triathlon, une mesure des performances et des réponses cardiaques des sujets a été réalisé.

Avant l'épreuve, $\dot{V}O_{2max}$, vVO_{2max}, vSV1, vSV2 et l'efficience énergétique étaient significativement plus faibles chez les *Masters* triathlètes, mais le couple maximal volontaire était similaire pour les deux groupes. Vingt quate heures après la course, une diminution significative et similaire pour les deux groupes a été observée pour $\dot{V}O_{2max}$ (-3,1% pour les *Masters*, et -6,2% pour les jeunes, $p<0,05$) et vVO_{2max} (-9,5% pour les *Masters*, et -5,6% pour les jeunes, $p<0,05$). La vSV2 avait diminué de manière significative uniquement chez les *Masters* alors qu'il n'a pas été observé de différence sur le couple maximal isométrique ou sur l'efficience énergétique de la course à pied à intensité sous maximale.

Lors de l'épreuve de triathlon, aucune différence d'intensité relative n'a été observée entre les groupes (91,3 ± 3,0% FC_{max} pour les *Masters vs* 91,4 ± 2,6% FC_{max} pour les jeunes).

Ces résultats indiquent que chez des triathlètes bien entraînés, l'âge ne semble pas avoir d'influence sur l'intensité relative soutenue pendant une compétition de triathlon distance olympique. L'âge n'a pas non plus d'influence significative sur la récupération 24h après la compétition. Seul VT2 est impacté probablement en raison des durées d'effort différentes entre les 2 groupes. Alors que l'efficience énergétique n'est pas retenue comme facteur déterminant du déclin des performances chez les *Masters* athlètes (Allen et al. 1985 ; Evans et al. 1995 ; Peiffer et al. 2008 ; Tanaka et Seals 2003, 2008 ; Reaburn et Dascombe 2008), l'observation d'une différence significative du CE en course à pied (plus important chez les *Masters* triathlètes) suggère qu'une modification du CE de la locomotion avec l'âge pourrait contribuer au déclin des performances.

III.3 Etude 3 : Effet de l'âge sur l'efficience énergétique

III.3.A **Effet de l'âge sur le rendement énergétique du pédalage chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés**

Effet de l'âge sur le rendement énergétique du pédalage chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés

Introduction

Le triathlon consiste en la réalisation successive d'épreuves de natation, cyclisme et course à pied selon différents formats de course tels que le triathlon *sprint* (750 m, 20 km et 5 km), le triathlon *distance olympique* (1,5 km, 40 km et 10 km) et l'*Ironman* (3,8 km, 180 km et 42,2 km). Comme pour les autres activités de longue durée, la performance en triathlon dépend de la capacité du sujet à maintenir une vitesse maximale de déplacement pendant la durée de l'épreuve tout en réduisant le coût énergétique de la locomotion, défini comme la quantité d'énergie métabolique dépensée (au-dessus de la valeur de repos) par unité de distance (di Prampero 1986; Hausswirth et Brisswalter 2008). En effet, des corrélations significatives ont été mises en évidence entre la performance en triathlon et le coût énergétique de la partie cycliste, dont la durée représente environ 50% de la durée totale du triathlon (Lepers et al. 2009). Cependant, les principales études relatives à l'évolution des performances avec l'âge chez les *Masters* athlètes ne retiennent pas l'efficience énergétique comme hypothèse explicative du déclin observé (Allen et al. 1985 ; Evans et al. 1995 ; Peiffer et al. 2008 ; Tanaka et Seals 2003, 2008 ; Reaburn et Dascombe 2008). L'hypothèse principale dans la littérature suggère que les effets concomitants de l'entraînement sportif et du vieillissement induiraient une prédominance progressive de fibres lentes qui sont plus économiques (Tanaka et Seals 2008). Les travaux les plus récents de la littérature présentent des résultats contradictoires concernant cette hypothèse. D'une part l'étude de Peiffer et al. (2008) compare les caractéristiques physiologiques de *Masters* cyclistes compétitifs dans trois tranches d'âge (35-44 ans, 45-54 ans et plus de 55 ans) et ne rapporte aucun effet de l'âge sur l'efficience des cyclistes de 35 à 73 ans. D'autre part, Sacchetti et al. (2011) ont mesuré le rendement énergétique sur ergocycle pour deux groupes de 8 cyclistes (24 ± 5 ans ; 64 ± 4 ans) performants et entrainés. Le rendement a été mesuré à deux intensités relatives sous maximales et pour différentes cadences de pédalage (40 à 120 rpm). Un rendement plus faible des *Masters* cyclistes a été observé pour une cadence de 100 rpm (18,3 ± 0,6% vs. 21,2 ± 1,9%). Par ailleurs, la cadence de pédalage la plus efficiente serait également plus basse chez les *Masters* que chez les jeunes (40-60 vs. 60-80). Il convient de souligner que Sacchetti et al. (2011) ont mesuré un rendement brut et n'ont pas modélisé le déclin du rendement avec l'âge. L'existence d'un effet de l'âge sur le rendement a été également observée dans l'étude de Louis et al. (2011) montrant une différence de 10,7% sur le paramètre de *delta efficiency* (DE) entre de jeunes athlètes (25,6 ± 5,9 ans) et des *Masters* (51,5 ± 5,5 ans). Les résultats contradictoires enregistrés pourraient être liés à la diversité des protocoles de mesure de

l'efficience mais aussi à l'hétérogénéité des populations dans ces études comparatives où il est difficile d'apprécier le volume et l'intensité d'entrainement. Selon ces dernières études, la réduction de l'efficience avec l'âge serait principalement liée à une réduction de la capacité de production de force. Une diminution de la capacité de production de force réduirait la force relative appliquée à chaque tour de pédale, augmentant ainsi le recrutement des unités motrices et la demande métabolique (Hoff et al. 2002). Dans ce cadre, Sunde et al. (2009) et Louis et al. (2011) ont pu montrer une corrélation significative entre la capacité de production de force maximale et l'efficience de la locomotion respectivement chez de jeunes cyclistes et chez des athlètes. La diminution de force avec l'âge étant en partie liée à une diminution de masse maigre (Vandervoort 2002), les effets du vieillissement sur la composition corporelle pourraient avoir par voie de conséquence une relation avec l'efficience énergétique de la locomotion du *Master* triathlète non seulement pour les activités à composante gravitationnelle comme la course à pied mais aussi pour les activités portées comme la natation et le cyclisme.

Dans une perspective de recherche explicative du déclin des performances avec l'âge et d'optimisation de la performance en triathlon chez le *Master* triathlète, ces résultats soulèvent plusieurs interrogations, l'une relative à l'influence de l'âge sur l'efficience énergétique des différents modes de locomotion du triathlon en général et pour le cyclisme en particulier, et l'autre relative à une éventuelle relation entre l'efficience énergétique et la réduction de force/puissance.

L'objet de cette étude est double : i) mesurer le rendement énergétique du pédalage au sein d'une population de cyclistes et triathlètes tous bien entraînés sur une large tranche d'âge afin de caractériser un éventuel déclin, et ii) investiguer une possible relation entre l'efficience énergétique et la réduction de force/puissance avec l'âge.

Matériels et méthodes

Sujets

Cinquante sujets hommes, tous bien entraînés en endurance (cyclistes ou triathlètes), ont participé à cette étude : 10 jeunes adultes (JA < 30 ans), 10 adultes (30 < A < 40 ans), 10 jeunes *Masters* (40 < JM < 50 ans), 10 *Masters* (50 ans < M < 60 ans) et 10 *Seniors* (60 ans < S). Les critères d'inclusion étaient les suivants : un volume d'entrainement hebdomadaire supérieur à 10 heures hebdomadaires et un indice de masse corporelle IMC inférieur à 25 $kg.m^{-2}$. Les caractéristiques des cinq groupes de sujets sont présentées dans le Tableau 1. Au

préalable, tous les participants ont lu et signé un formulaire de consentement éclairé ainsi que rempli un questionnaire « mode de vie, santé et pratique sportive ». L'absence de différence significative sur les volumes d'entrainement (temps et distance) en cyclisme est vérifiée.

Tableau 1 : Caractéristiques des sujets

	YA (<30 y)	A (30-40 y)	YM (40-50 y)	M (50-60 y)	S (60 y <)
Age (années)	22,4 ± 3,2	35,1 ± 3,2 *	44,0 ± 3,2 *	54,4 ± 3,8 *	69,6 ± 5,9 *
Taille (cm)	177,3 ± 5,1	178,8 ± 4,7	176,0 ± 9,9	173,9 ± 8,2	176,9 ± 8,4
Masse (kg)	66,3 ± 4,8	72,9 ± 5,4	68,8 ± 6,8	66,5 ± 6,1	73,5 ± 10,1
IMC ($kg.m^{-2}$)	21,1 ± 1,2	22,8 ± 1,1 *	22,2 ± 1,1	22,0 ± 1,1	23,4 ± 1,6 #
Entr. hebdomadaire ($h.sem^{-1}$)	14,1 ± 3,4	14,6 ± 2,7	13,6 ± 3,0	13,6 ± 3,5	12,8 ± 3,2
Entr. cyclisme ($h.sem^{-1}$)	9,5 ± 6,0	9,0 ± 3,1	9,4 ± 4,2	8,9 ± 3,7	11,1 ± 3,6
Distance cyclisme ($km.sem^{-1}$)	260 ± 154	223 ± 68	251 ± 124	208 ± 84	271 ± 103

Les valeurs sont sous la forme moyenne ± écart type.
** Différence significative avec le groupe d'âge plus jeune ($p<0.05$)*
 # Différence significative entre le groupe S et JA ($p<0.05$)

Protocole expérimental

Mesures anthropométriques

Les paramètres anthropométriques classiques de taille et de masse corporelle sont mesurés à l'aide d'une toise et d'un pèse personne. L'indice de masse corporelle (IMC) est calculé en divisant la masse par la taille au carré. Une mesure des quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, supra-illiaque et sous-scapulaire) est réalisée à l'aide d'une pince à plis classique sur l'hémicorps droit de chaque sujet afin d'estimer la densité corporelle (Durnin et Womersley, 1974) et le pourcentage de masse grasse (Siri 1956). Une mesure de quatre plis cutanés, de cinq circonférences, de la longueur de la jambe droite et du diamètre inter condylien du genou est effectuée pour estimer : le volume osseux de la jambe selon la formule de Shephard et al. (1988) et les volumes total, de masse grasse et musculaire de la jambe par la méthode de Jones et Pearson (1969).

Test d'effort maximal triangulaire

Chaque sujet réalise un test maximal à puissance croissante en laboratoire sur ergocycle SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Königskamp, Germany). La longueur des manivelles, le cintre et la selle de la bicyclette sont ajustés verticalement et horizontalement pour reproduire les positions habituelles des sujets. Ces données posturales sont enregistrées. Les sujets ont utilisé leurs pédales et chaussures personnelles. Le mode de fonctionnement de l'ergomètre permet

aux sujets d'adopter librement une cadence de pédalage, la puissance de sortie restant constante grâce à l'ajustement automatique de la force à la vitesse angulaire.

Au cours de cette session la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) ainsi que les puissances développées dès l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ (PMA) et au premier et second seuil ventilatoire (SV1 et SV2) sont déterminés selon les recommandations de Beaver et al. (1986). Les critères d'atteintes de $\dot{V}O_{2max}$ sont un plateau de $\dot{V}O_2$ malgré l'augmentation de la puissance et ceux décrits par Howley et al. (1995) : quotient respiratoire (QR) supérieur à 1,11, et atteinte de la fréquence cardiaque maximale théorique (220 – âge ± 10 bpm). Les seuils ventilatoires 1 (SV1) et 2 (SV2) sont déterminés selon la méthode décrite par Beaver et al. (1986). La détermination de SV1 lors d'un test incrémental correspond au point d'inflexion de la cinétique de l'équivalent respiratoire pour l'O_2 ($\dot{V}E / \dot{V}O_2$) sans augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 ($\dot{V}E / \dot{V}CO_2$). Ce point d'inflexion est aussi associé à la rupture de la pente d'augmentation de $\dot{V}E$ en fonction de l'intensité de l'exercice. La détermination de SV2 correspond au point d'inflexion de la cinétique de l'équivalent respiratoire pour l'O_2 ($\dot{V}E / \dot{V}O_2$) avec une augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 ($\dot{V}E / \dot{V}CO_2$). La détermination des seuils ventilatoires a été réalisée par deux expérimentateurs indépendamment et les résultats ont été comparés à posteriori. En cas de désaccord, l'avis d'un troisième expérimentateur a été demandé.

Après un premier palier d'échauffement de 6 minutes à 75W (sujets de plus de 50 ans) ou 100W (sujets de moins de 50 ans), l'incrémentation de la puissance est fixée à 25W toutes les minutes jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus maintenir la puissance imposée.

Les valeurs de fréquence cardiaque (FC) sont enregistrées et moyennées par intervalle de 5s à l'aide d'un cardio fréquence mètre de type Polar (RS800SD, Kempele, Finland).

L'analyse des échanges gazeux et respiratoires est réalisée à partir d'une chaîne métabolique télémétrique de type K4B2 (Cosmed, Rome, Italie) en cycle à cycle puis les valeurs sont moyennées toutes les 5s.

Test rectangulaire et mesure du rendement

Après 20 minutes de repos suite au test triangulaire, les sujets réalisent 3 minutes de pédalage à une intensité de 40% PMA suivies de 7 minutes à 65% PMA. La cadence de pédalage doit être comprise entre 80 et 90 rpm.

Comme pour le test triangulaire, les variables cardiorespiratoires (i.e. $\dot{V}O_2$, FC, le quotient respiratoire (QR), la fréquence respiratoire et le débit ventilatoire) sont moyennées sur 5s à partir des données enregistrées à l'état stable (i.e. les deux dernières minutes du test à 65% PMA). L'indice retenu pour l'étude du rendement du pédalage est le rendement brut ou *Gross Efficiency* (GE en %) :

$$GE\ (\%) = \frac{Travail\ utile\ produit\ (Joules)}{Energie\ métabolique\ totale\ dépensée\ (Joules)}$$

Le travail utile a été calculé à partir des données de puissance enregistrées en continue par le système SRM.

L'énergie métabolique a été calculée à partir des mesures de $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ moyennées sur les deux dernières minutes. Les conditions métaboliques stables d'un exercice sous maximal (QR < 1) ont été vérifiées. La quantité de gaz échangé a été convertie en équivalent en énergie en Joules à partir de la table fournie par De Zuntz et Pflugers (1901).

Mesure de la puissance mécanique maximale sur ergocycle

Après 20 min de récupération à l'issue du test rectangulaire, les sujets réalisaient 5 sprints de 10 secondes sur ergocycle, entrecoupés de 3 min de récupération selon la méthode proposée par Arsac et al. (1996). Les charges de friction différentes étaient appliquées en fonction des cinq cadences maximales programmées. Pendant le test, le capteur SRM a enregistré de manière continue la puissance développée et la cadence de pédalage moyennées sur 0,5 secondes. La force, la cadence et la puissance mesurées à partir du dynamomètre SRM représentaient les valeurs réelles de couple (FSRM, N.m), de vitesse de pédalage (rpm) et de puissance (PSRM, W) appliqués par le sujet sur le pédalier au cours du sprint. La position de départ du sujet était standardisée assise. Le sujet devait conserver la position assise durant toute la durée du sprint et le sujet était vigoureusement encouragé.

Les valeurs maximales théoriques de vitesse V_0 et de force F_0 pour chaque sprint ont été obtenues par extrapolation de la régression linéaire entre la vitesse de pédalage (V, rpm) et la force F mesurées en continu durant les phases d'accélération. V_0 et F_0 ont la dimension respectivement d'une fréquence maximale de pédalage (en rpm) et d'un couple maximal (en $N.m.kg^{-1}$). Afin de prendre en compte les différences de masse entre les sujets et les groupes d'âge, les valeurs de couple sont exprimées en valeur relative.

La puissance maximale (P_{max}) est obtenue pour un pic de vitesse égal à $0{,}5 \times V_0$ et une force égale à $0{,}5 \times F_0$. P_{max} est donc égal à $0{,}25 \times V_0 \times F_0$. P_{max} correspond au sommet de la

courbe de la relation polynomiale du deuxième degré entre la puissance et la vitesse (Hintzy et al. 1999; Jones et Passfield 1998). La valeur de vitesse correspondante à P_{max} représentait la vitesse optimale de pédalage (V_{Opt}, rpm).

Traitement statistique

Pour chaque variable, la valeur moyenne de chaque groupe ainsi que l'écart type sont calculés. L'effet de l'âge sur les différentes variables dépendantes (données d'entrainement, sommes des quatre plis cutanés, % de masse grasse, mesures anthropométriques de la jambe droite, $\dot{V}O_{2max}$, FC_{max}, PMA, puissance et $\%\dot{V}O_{2max}$ à SV1 et SV2, valeurs de réglage postural de l'ergocycle, puissance à 65% PMA, $\%\dot{V}O_{2max}$ à 65% PMA, % FC_{max} à 65% PMA, $\dot{V}E$ à 65% PMA, de cadence de pédalage à 65% PMA, QR à 65% PMA, RPE à 65% PMA, P_{max} et V_{Opt}) est évalué à partir d'une analyse de variance à un facteur groupe et complétée par un test post-hoc de Tuckey pour situer les différences entre les groupes.
Pour caractériser le déclin du rendement énergétique du pédalage avec l'âge ou les relations entre les variables dépendantes, une analyse de corrélation a été effectuée en utilisant le test de Pearson. Le seuil de signification est fixé à $p<0.05$.

Résultats

Mesures anthropométriques

Malgré le critère d'inclusion des sujets (IMC < 25 $kg.m^{-2}$), il est noté une différence significative entre les JA et les A et entre les JA et les S pour ce paramètre. Des différences significatives de la somme des 4 plis cutanés, des valeurs de densité corporelle (dont l'évaluation est pondérée en fonction de l'âge) et du pourcentage de masse grasse entre les JA, les A et les M avec les S (respectivement 22,8 ± 2,6 ; 23,0 ± 4,0 ; 24,6 ± 4,4 vs. 31,0 ± 7,6 en mm). Mise à part la différence de volume musculaire entre les JA et A, on peut noter l'absence de différence significative sur les caractéristiques anthropométriques de la jambe droite (Tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques anthropométriques des sujets

	JA (<30 ans)	A (30-40 ans)	JM (40-50 ans)	M (50-60 ans)	S (60 ans <)
Age (années)	22,4 ± 3,2	35,1 ± 3,2 *	44,0 ± 3,2 *	54,4 ± 3,8 *	69,6 ± 5,9 *
Taille (cm)	177,3 ± 5,1	178,8 ± 4,7	177,3 ± 8,9	173,9 ± 8,2	176,9 ± 8,4
Masse (kg)	66,3 ± 4,8	72,9 ± 5,4	69,6 ± 6,5	66,5 ± 6,1	73,5 ± 10,1
IMC ($kg.m^{-2}$)	21,1 ± 1,2	22,8 ± 1,1 *	22,1 ± 1,0	22,0 ± 1,1	23,4 ± 1,6 #
Somme des 4 plis cutanés (mm)	22,8 ± 2,6	23,0 ± 4,0	25,4 ± 5,4	24,6 ± 4,4	31,0 ± 7,6 #■*
Densité corporelle ($kg.l^{-1}$)	1,077 ± 0,003	1,068 ± 0,004 *	1,064 ± 0,006 ƨ	1,064 ± 0,006 ●	1,055 ± 0,007 #■§*
% Masse grasse (%)	9,4 ± 1,4	13,3 ± 1,8 *	15,2 ± 2,8 ƨ	15,4 ± 2,5 ●	19,2 ± 3,0 #■§*
Volume jambe D (l)	13,2 ± 1,0	14,5 ± 1,7	13,8 ± 1,5	12,7 ± 1,5	13,4 ± 2,1
Volume osseux jambe D (l)	1,8 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2	1,7 ± 0,3	2,0 ± 0,4
Volume masse grasse jambe D (l)	3,5 ± 1,0	2,9 ± 0,9	2,9 ± 0,6	2,6 ± 0,7	3,0 ± 0,7
Volume musculaire jambe D (l)	7,9 ± 1,1	9,8 ± 1,7 *	9,0 ± 1,3	8,3 ± 1,4	8,5 ± 1,4

Les valeurs sont sous la forme moyenne ± écart type.
* *Différence significative avec le groupe d'âge plus jeune ($p<0.05$)*
\# *Différence significative entre le groupe S et JA ($p<0.05$)*
■ *Différence significative entre le groupe S et A ($p<0.05$)*
§ *Différence significative entre le groupe S et JM ($p<0.05$)*
● *Différence significative entre le groupe M et JA ($p<0.05$)*
ƨ *Différence significative entre le groupe JM et JA ($p<0.05$)*

Test d'effort incrémental sur ergocycle

Un effet du vieillissement est observé pour tous les paramètres cardio-respiratoires et de puissance à l'effort maximal. Les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$, de FC_{max} ainsi que celles de PMA sont significativement réduites par rapport au groupe des jeunes triathlètes à la fois pour le groupe des *Masters* et *Seniors* triathlètes. L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 3 ci après. Nous avons observé une augmentation de SV2 exprimé en $\%\dot{V}O_{2max}$ chez les *Seniors* triathlètes par rapport aux jeunes adultes (88,7 ± 4,8% vs. 80,5 ± 8,2%). Pour les paramètres à SV1 et à SV2 exprimés en $\%\dot{V}O_{2max}$ et en %PMA, aucune autre différence n'a été observée entre les différents groupes.

Tableau 3 : Caractéristiques cardio respiratoires des sujets

	YA (<30 y)	A (30-40 y)	YM (40-50 y)	M (50-60 y)	S (60 y <)
FC_{max} (bpm)	183,8 ± 9,6	180,6 ± 7,5	176,5 ± 13,0	170,9 ± 8,6 ●	155,2 ± 12,7#■§*
$\dot{V}O_2max$ (mL.min^{-1}.kg^{-1})	61,9 ± 9,6	56,6 ± 5,9	55,0 ± 8,1	51,3 ± 5,5 ●	38,7 ± 7,6 #■§*
PMA (W)	389,2 ± 35,2	401,1 ± 27,9	369,6 ± 53,1	328,3 ± 37,0 ●¤	266,9 ± 38,5 #■§*
PMA (W.kg^{-1})	5,9 ± 0,7	5,5 ± 0,5	5,4 ± 0,8	4,9 ± 0,4●	3,7 ± 0,6 #■§*
SV2 (% $\dot{V}O_2$ max)	80,5 ± 8,2	84,3 ± 5,3	85,4 ± 6,6	86,6 ± 6,5	88,7 ± 4,8 #
PSV2 (% PMA)	83,3 ± 2,9	87,0 ± 4,6	84,7 ± 4,2	82,7 ± 3,7	83,2 ± 6,7
SV1 (% $\dot{V}O_2$ max)	68,0 ± 8,0	66,2 ± 6,9	67,6 ± 7,4	67,3 ± 10,9	71,2 ± 8,1
PSV1 (% PMA)	65,9 ± 4,3	64,1 ± 7,5	62,9 ± 4,8	59,7 ± 6,6	61,9 ± 7,1

Les valeurs sont sous la forme moyenne ± écart type.
* *Différence significative avec le groupe d'âge plus jeune (p<0.05)*
\# *Différence significative entre le groupe S et JA (p<0.05)*
■ *Différence significative entre le groupe S et A (p<0.05)*
§ *Différence significative entre le groupe S et JM (p<0.05)*
● *Différence significative entre le groupe M et JA (p<0.05)*
¤ *Différence significative entre le groupe M et A (p<0.05)*

Mesure du rendement énergétique

Le principal résultat de notre étude est l'observation d'une différence significative des rendements énergétiques du pédalage à 65% PMA. Un effet du vieillissement est observé sur le rendement énergétique entre le groupe des jeunes adultes et les groupes de *Masters* et *Seniors* triathlètes. Par rapport aux jeunes adultes, le rendement brut à 65% PMA diminue de 7,4% pour les *Masters*. Pour les *Seniors,* le rendement brut à 65% PMA diminue également et significativement de 15,0% par rapport aux jeunes adultes, de 13,5% par rapports aux adultes, de 11,0% par rapport aux jeunes *Masters*. L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 4 ci après.

La puissance mécanique développée à 65% PMA est significativement plus faible pour les groupes de *Masters* et de *Seniors*. Par rapport aux JA et A, la puissance à 65% PMA diminue de 14,7% et 17% pour les *Masters*. Pour les *Seniors,* la puissance à 65% PMA diminue également et significativement de 30,7% par rapport aux JA, de 32,6% par rapports aux A, de 27,0% par rapport aux JM et de 18,8% par rapport aux M.

Aucune différence n'est observée sur les paramètres posturaux de réglage de l'ergocycle entre les différents groupes.

Une différence significative de fraction de $\dot{V}O_{2max}$ à 65% PMA est observée chez les groupes de *Masters* et *Seniors* triathlètes par rapport au groupe des jeunes adultes. Par rapport aux jeunes adultes, la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ à 65% PMA augmente de respectivement de 10,4% pour

les *Masters*. Pour les *Seniors,* la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ à 65% PMA augmente également et significativement de 19,3% par rapport aux jeunes adultes, de 14,5% par rapports aux adultes. A 65% PMA, aucune différence n'est observée concernant % FC_{max}, les valeurs de $\dot{V}E$, de cadence de pédalage, du QR (qui reste toujours strictement inférieur à 1) et de perception de l'effort (RPE).

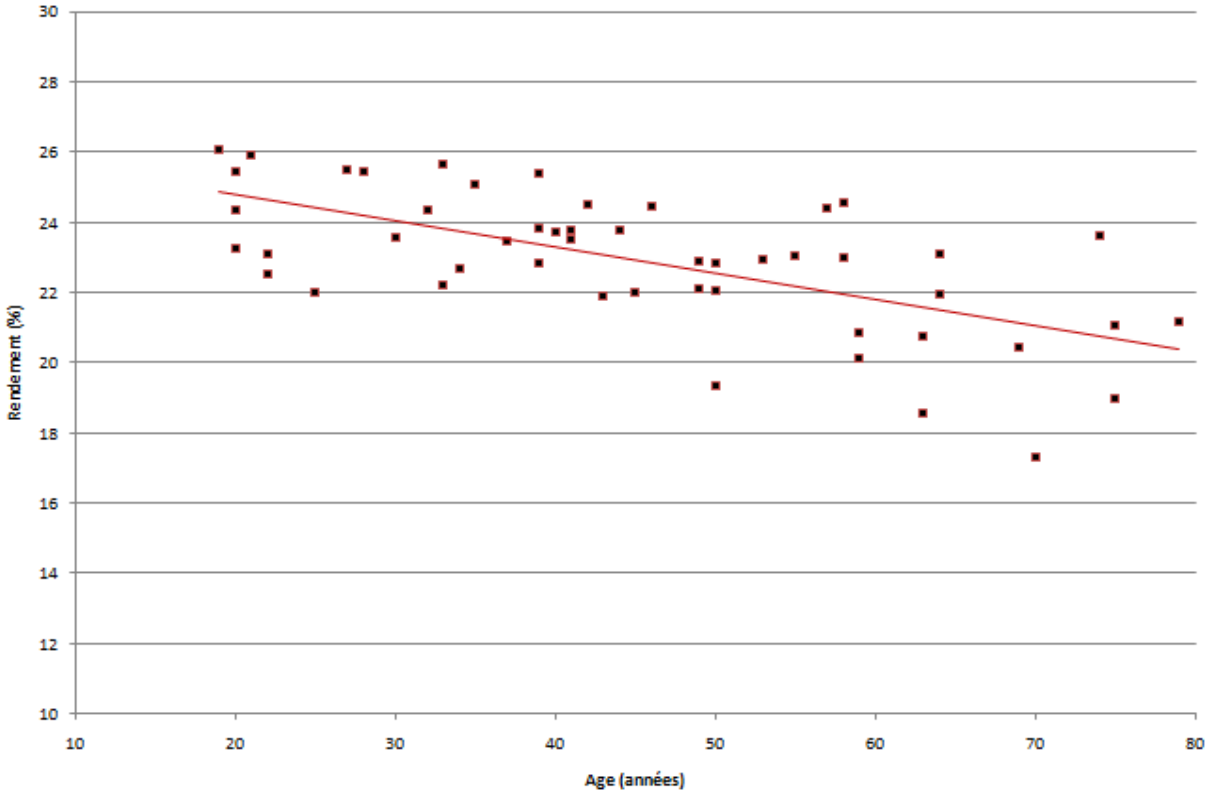
Tableau 4 : Valeurs de puissance, de réglage postural de l'ergocycle, des paramètres cardio ventilatoires et de rendement du pédalage à 65% de PMA

	JA (<30 ans)	A (30-40 ans)	JM (40-50 ans)	M (50-60 ans)	S (60 ans <)
Puissance mécanique (W)	251,9 ± 22,4	259,0 ± 18,5	238,8 ± 33,2	214,9 ± 22,1 ●¤	174,5 ± 24,2 #■§*
Cadence (rpm)	85,3 ± 5,4	86,6 ± 3,2	85,8 ± 2,4	86,9 ± 2,2	88,5 ± 3,7
Longueur manivelle (mm)	173,3 ± 1,7	172,8 ± 0,8	173,5 ± 2,4	172,5 ± 1,8	172,8 ± 1,4
Recul de selle (cm)	2,5 ± 1,7	4,1 ± 1,4	4,2 ± 2,6	4,6 ± 1,4	2,8 ± 1,3
Distance potence arrière de selle (cm)	79,5 ± 7,4	71,3 ± 27,5	76,8 ± 7,0	74,0 ± 6,5	82,1 ± 4,4
$\dot{V}_E$ *(L.min^{-1})*	78,1 ± 6,6	84,6 ± 14,0	80,6 ± 14,6	79,2 ± 12,3	77,3 ± 14,8
% $\dot{V}O_2$ max	73,4 ± 7,1	76,5 ± 6,9	79,4 ± 6,3	81,1 ± 5,5 ●	87,6 ± 6,4 #■
% FC max	85,3 ± 3,3	86,8 ± 3,2	86,2 ± 4,6	88,6 ± 4,6	90,6 ± 4,8
QR	0,92 ± 0,04	0,90 ± 0,06	0,91 ± 0,04	0,92 ± 0,02	0,92 ± 0,03
RPE	14,2 ± 1,5	13,6 ± 1,3	13,3 ± 0,9	13,6 ± 0,9	12,5 ± 2,0
GE (%)	24,4 ± 1,5	23,9 ± 1,2	23,3 ± 1,0	22,6 ± 1,6 ●	20,7 ± 2,0 #■§

Les valeurs sont sous la forme moyenne ± écart type.
* *Différence significative avec le groupe d'âge plus jeune (p<0.05)*
\# *Différence significative entre le groupe S et JA (p<0.05)*
■ *Différence significative entre le groupe S et A (p<0.05)*
§ *Différence significative entre le groupe S et JM (p<0.05)*
● *Différence significative entre le groupe M et JA (p<0.05)*
¤ *Différence significative entre le groupe M et A (p<0.05)*

L'analyse de corrélation du déclin du rendement énergétique du pédalage avec l'âge en utilisant un modèle linéaire (Figure 1) permet de caractériser une diminution de 0,75 %.déc^{-1} à 65 % PMA (GE 65% $= 26{,}25 - 0{,}745 \times \hat{a}ge$; r = 0,64).

Figure 1: Evolution du rendement énergétique du pédalage avec l'âge en utilisant un modèle linéaire chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés à 65% PMA.



Test Force-Vitesse

Un effet du vieillissement est observé sur la puissance maximale théorique (en W et en $W.kg^{-1}$). Concernant la puissance maximale théorique (en W), un déclin de 20,3%, 18,8% et 28,3 est observé respectivement entre JM vs. A, M vs. JA et M vs. A. Un déclin de 28,9%, 37,2% et 21,2% est également constaté respectivement entre S vs. JA, S vs. A et S vs. JM. Quand la puissance maximale théorique (en $W.kg^{-1}$) est rapportée à la masse des sujets, les différences significatives observées ne concernent plus que M vs. JA (18,3%), M vs. A (20,3%) ainsi que le groupe S vs JA (35,6%), S vs. A (37,2%), S vs. JM (26,0%) et S vs. M (12,4%). L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 5 ci-après. Aucune différence n'est observée sur la cadence optimale de pédalage (V_{Opt}).

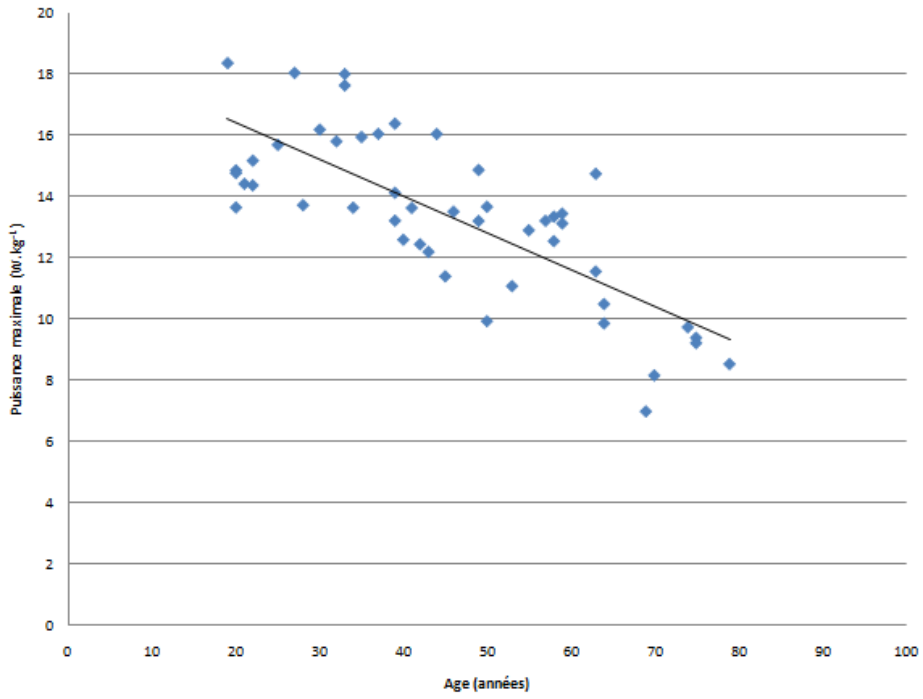
Tableau 5 : Valeurs de puissance maximale et de cadence de pédalage optimale des groupes de sujets

	YA (<30 y)	A (30-40 y)	YM (40-50 y)	M (50-60 y)	S (60 y <)
Puissance Max (W)	1013 ± 121	1148 ± 106	914 ± 104 *	823 ± 93 ●¤	720 ± 164 #■§
Puissance (W/kg)	15,3 ± 1,6	15,7 ± 1,6	13,3 ± 1,4	12,5 ± 1,3 ●¤	9,9 ± 2,1 #■§*
V_{Opt} (rpm)	137,4 ± 13,1	141,8 ± 15,9	123,0 ± 19,1	134,0 ± 15,3	124,0 ± 21,9

Les valeurs sont sous la forme moyenne ± écart type.
* *Différence significative avec le groupe d'âge plus jeune (p<0.05)*
\# *Différence significative entre le groupe S et JA (p<0.05)*
■ *Différence significative entre le groupe S et A (p<0.05)*
§ *Différence significative entre le groupe S et JM (p<0.05)*
● *Différence significative entre le groupe M et JA (p<0.05)*
¤ *Différence significative entre le groupe M et A (p<0.05)*

L'analyse de corrélation de la puissance maximale théorique avec l'âge en utilisant un modèle linéaire (Figure 2) permet de caractériser une diminution de 1,2 W.kg^{-1}.déc^{-1} ($P_{max}(W.kg^{-1}) = -0{,}12 \times âge\ (années) + 18{,}8$; r = 0,77).

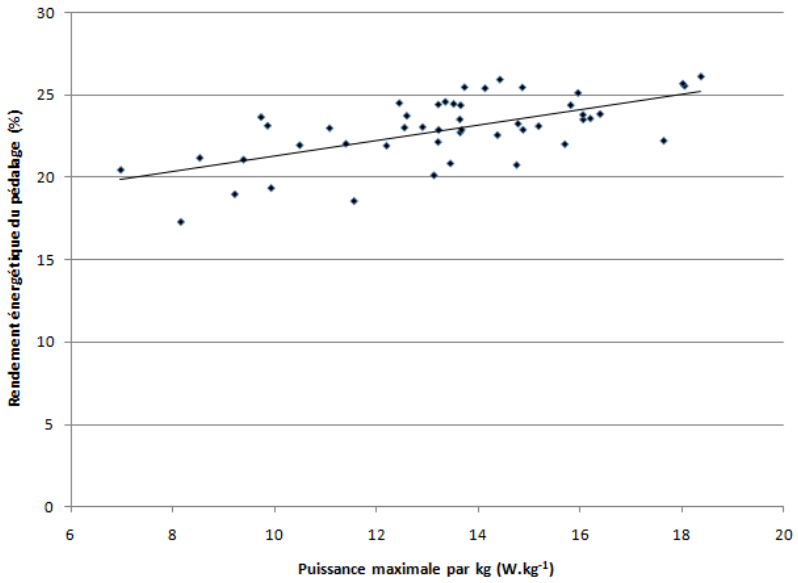
Figure 2: Relation entre la puissance maximale théorique et l'âge en utilisant un modèle linéaire chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés.



Relation entre rendement énergétique et puissance maximale

L'analyse de corrélation du rendement énergétique à 65% PMA avec la puissance maximale théorique (indépendamment de l'âge) en utilisant un modèle linéaire (Figure 3) permet de caractériser une relation : $GE_{65\%\,PMA}(\%) = -0{,}47 \times P_{max}\ (\mathrm{W.kg^{-1}}) + 16{,}62$; r = 0,63

Figure 3: Relation entre le rendement énergétique du pédalage à 65%PMA et de la puissance maximale théorique en utilisant un modèle linéaire chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés



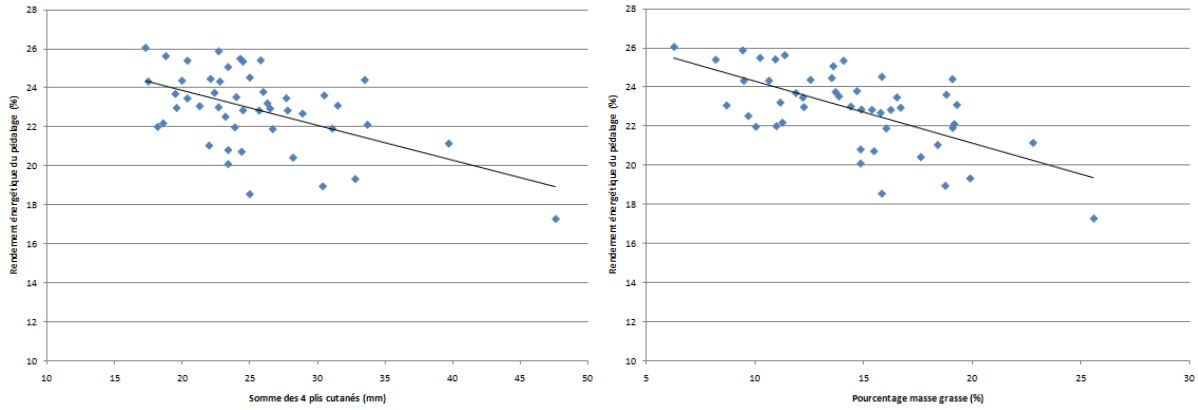
Relation entre rendement énergétique et la composition corporelle

L'analyse de corrélation du rendement énergétique à 65% PMA avec la somme des quatre plis cutanés ou le pourcentage de masse grasse (indépendamment de l'âge) en utilisant un modèle linéaire (Figure 4) permet de caractériser une relation dans les deux cas :

$GE_{65\%\,PMA}(\%) = 27{,}422 - 1{,}775 \times \sum 4\ plis\ cutanés\ (mm)$, r = 0,51

$GE_{65\%\,PMA}(\%) = 27{,}424 - 0{,}311 \times Pourcentage\ masse\ grasse\ (\%)$, r = 0,62

Figure 4: Relations entre le rendement énergétique du pédalage avec la somme des 4 plis cutanés et avec le pourcentage de masse grasse en utilisant un modèle linéaire chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés.



Il convient de souligner qu'il n'y a pas de corrélation entre le volume musculaire de la jambe et le rendement énergétique du pédalage à 65% PMA.

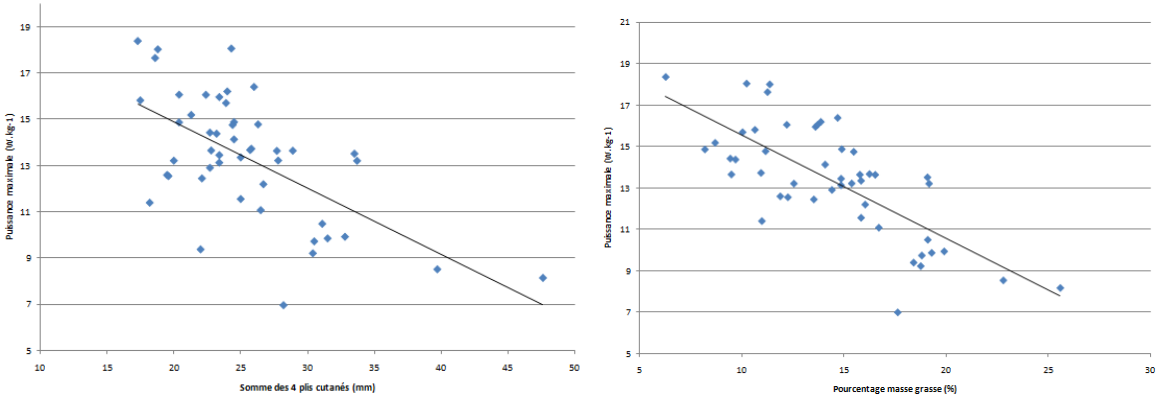
Relation entre puissance maximale et la composition corporelle

L'analyse de corrélation de la puissance maximale avec la somme des quatre plis cutanés ou le pourcentage de masse grasse (indépendamment de l'âge) en utilisant un modèle linéaire (Figure : 5) permet de caractériser une relation dans les deux cas :

$$P_{max}(W.kg^{-1}) = 20{,}623 - 0{,}2863 \times \sum 4\ plis\ cutanés\ (mm),\ r = 0{,}61$$

$$P_{max}(W.kg^{-1}) = 20{,}567 - 0{,}499 \times Pourcentage\ masse\ grasse\ (\%),\ r = 0{,}74$$

Figure 5: Relations entre la puissance maximale avec la somme des 4 plis cutanés et avec le pourcentage de masse grasse (indépendamment de l'âge) en utilisant un modèle linéaire chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés.



Discussion

Discussion méthodologique

Recrutement des sujets

Pour préciser l'influence de l'âge sur l'efficience énergique, la majeure partie des études de la littérature est comparative et porte sur des échantillons de population représentatifs des différentes tranches d'âge. Cependant, les personnes âgées de plus de 60 ans ont connu des conditions de vie très différentes telles que l'absence de structures d'entrainement. On peut en déduire qu'à 20 ans leurs performances sportives étaient différentes de celles de la génération actuelle. La différence observée dans ces conditions résulte à la fois d'un phénomène de cohorte et du phénomène de vieillissement sans que l'on puisse apprécier avec précision l'importance de l'un et de l'autre. La population des sujets âgés est très diverse mais constituée de personnes en pleine forme physique et indemnes de toute maladie dont le vieillissement est optimal. Cependant, le recrutement d'un échantillon de cyclistes et triathlètes volontaires risque de surreprésenter les plus performants *Masters* et les plus accessibles ou disponibles des sujets plus jeunes ayant une activité professionnelle. Le biais de cohorte de notre étude pourrait tendre à faire croire que la pente du vieillissement est plus importante qu'elle ne l'est en réalité. Le biais de sélection risque de faire croire le contraire.

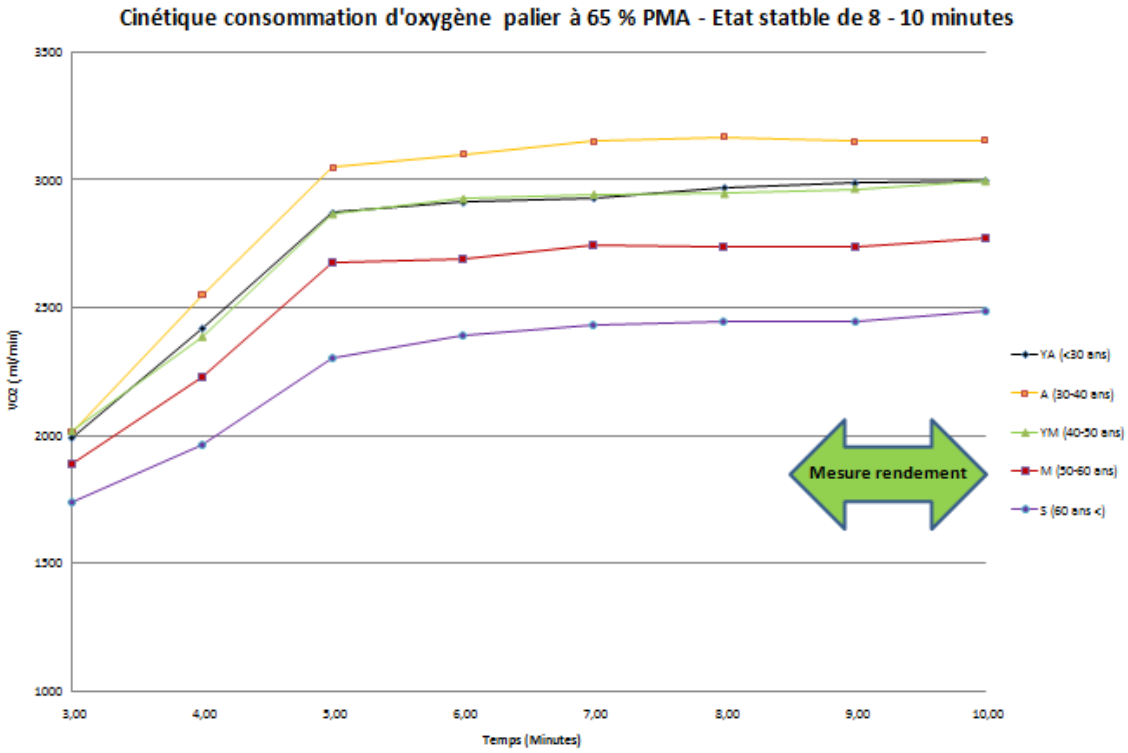
Validité de la mesure d'efficience énergétique

Le rendement énergétique sur ergocycle ne prend pas en compte les contraintes aérodynamiques (facteur de la performance de premier ordre en cyclisme sur un parcours plat), l'énergie utilisée pour lutter contre la gravité et l'énergie dissipée dans les phénomènes de friction lors du déplacement. Néanmoins, le rendement sur ergocycle mesure l'énergie mécanique produite, l'énergie qui est dissipée sous forme de chaleur, l'énergie nécessaire au fonctionnement des organes qui ne sont pas directement sollicités dans le mouvement et l'énergie musculaire dissipée sous forme de chaleur dans les processus de friction à l'intérieur de l'organisme. Le rendement énergétique du pédalage reste un facteur essentiel de la performance en cyclisme.

La procédure expérimentale prévoyait un réglage de l'ergocycle, une phase d'apprentissage et d'échauffement sur l'ergomètre et une phase de récupération de 20 minutes après le test triangulaire afin que les sujets soient préparés et dans de bonnes conditions pour effectuer une mesure d'efficience énergétique. Le choix de 65% PMA correspond à une intensité d'effort

correspondant à 80,0 ± 8,0% $\dot{V}O_{2max}$ (i.e., en dessous VT2 84,2 ± 4,6% $\dot{V}O_{2max}$). Cette intensité permet de se placer dans la condition où la fourniture d'énergie provient principalement des phosphorylations oxydatives (Daniels 1985). Dans ce contexte, le contrôle d'un QR strictement inférieur à 1 et de la stabilité de $\dot{V}O_2$ pendant la durée de mesure a été nécessaire au calcul du rendement entre la 8ième et 10ième minute (Figure 6).

Figure 6 : Cinétique de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) pendant le test de mesure du rendement à 65% PMA



Pour un même sujet entraîné, la variabilité du CE est faible lorsque la mesure est répétée d'un jour à l'autre (coefficient de variation de 1,6% Morgan et al. 1989, 1,8% Morgan et al. 1991 ou 4,6% Brisswalter et Legros 1994). La faible variabilité intra-individuelle de CE chez des sujets entraînés permet de considérer le rendement comme un paramètre pertinent pour observer l'effet du vieillissement sur la performance en endurance.

Discussion des résultats

Mise en évidence du déclin du rendement avec l'âge

Les premières études de la littérature supposent que les adaptations induites par le vieillissement n'ont pas d'effet sur l'efficience énergétique (Coyle et al. 1992; Horowitz et al. 1994; Mogensen et al. 2006). Les effets concomitants de l'entraînement sportif et du

vieillissement induiraient une prédominance progressive de fibres lentes au détriment des fibres rapides. Ce changement permettrait à l'organisme d'acquérir des fibres plus résistantes à la fatigue, dotées d'un métabolisme plus aérobie, et utilisant un appareil contractile développant la même force plus lentement (Sargeant 2007). Dans notre travail, nous avons observé un déclin avec l'âge du rendement à 65% PMA et pour une cadence de pédalage comprise entre 80 et 90 rpm chez des cyclistes et des triathlètes entrainés. Ce résultat conforte ceux rapportés par Sacchetti et al. (2011) ou Louis et al. (2011) et tend à montrer un déclin de l'efficience énergétique du pédalage avec l'âge dans une population entraînée de manière homogène. L'analyse de corrélation du rendement énergétique du pédalage avec l'âge en utilisant un modèle linéaire permet de caractériser le déclin à 65 % PMA ($GE\,65\% = 26{,}25 - 0{,}745 \times \hat{a}ge$; r = 0,64). Ce déclin est relativement faible si on le compare au déclin observé en pourcentage entre les *jeunes adultes* et les groupes *Masters* et *Seniors* (Tableau 6) pour les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$, de PMA et de puissance maximale. En revanche, il est du même ordre de grandeur que la diminution de FC_{max}.

Tableau 6 : Comparaison des déclins en pourcentage des Masters et des Seniors par rapport au groupe des jeunes adultes pour les paramètres de FC_{max}, de $\dot{V}O_{2max}$, de PMA et de puissance maximale

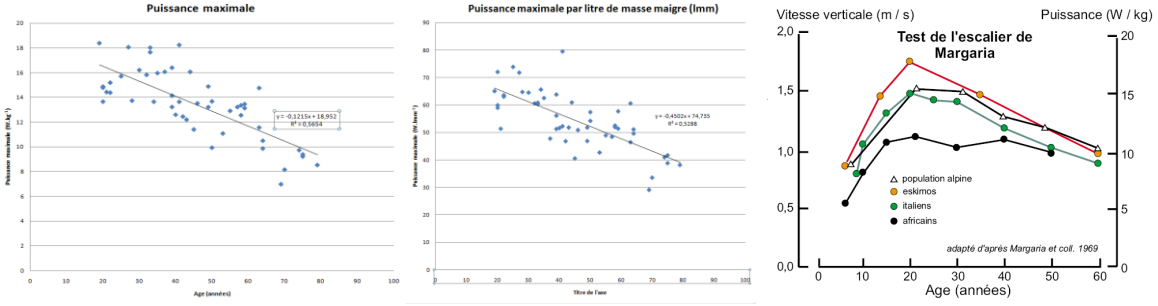
	Déclin pour les *Masters* (vs JA)	Déclin pour les *Seniors* (vs JA)
FC_{max} (bpm)	7,0%	15,6%
$\dot{V}O_2max$ ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$)	17,1%	37,4%
PMA (W)	15,7%	31,4%
PMA ($W.kg^{-1}$)	16,4%	37,8%
Puissance maximale ($W.kg^{-1}$)	18,3%	35,6%
GE à 65% de PMA (%)	7,4%	15,0%

Déclin de la puissance maximale avec l'âge

Des relations linéaires significatives entre la force et la vitesse, et polynomiales du second degré entre la vitesse et la puissance ont été établies quel que soit l'âge du sujet (Hintzy et al. 1999). Ce modèle d'évaluation de la puissance maximale est reproductible et correspond bien aux caractéristiques mécaniques d'un effort musculaire de type explosif. Les valeurs de puissance maximale produites par les sujets sont conformes à celles obtenues par Margaria et al. (1969) au cours d'un test de montée de marches (Figure 7).

Si on compare les déclins en $\%P_{max}$ entre JA vs. *Masters* (-18,3 % en $W.kg^{-1}$ et -20,3 % en $W.lmm^{-1}$) ou JA vs. *Seniors* (-35,6% en $W.kg^{-1}$ et -33,2% en $W.lmm^{-1}$), ils sont du même ordre de grandeur qu'ils soient exprimés par kg de masse ou en fonction du volume de masse maigre (lmm) déterminé pour la jambe (Shephard et al. 1988 ; Jones et Pearson 1969). Ces deux observations suggèrent que le déclin de P_{max} est d'avantage lié à une diminution des performances du muscle plus précoce que la diminution du volume musculaire.

Figure 7 : Déclin de la puissance maximale (en $W.kg^{-1}$ et en $W.lmm^{-1}$) chez les cyclistes et triathlètes bien entrainés et parallèle avec les résultats obtenus par Margaria et al. 1966 (test de l'escalier).



Par ailleurs, il n'a pas été observé de différence concernant la vitesse optimale (V_{Opt}) entre les différents groupes d'âge. Sargeant et Beelen (1993) montrent que la puissance maximale pouvant être produite lors d'un exercice est atteinte à 120 rpm et correspond à la vitesse de raccourcissement optimale des fibres de types II. Quelque soit le groupe d'âge, V_{Opt} reste supérieure 120 rpm. La diminution de P_{max} serait donc principalement induite par le déclin de force (diminution du couple) plutôt qu'à un ralentissement de la vitesse de mouvement. Outre la réduction de production de force totale, une modification du mouvement de pédalage avec le vieillissement pourrait induire une perte d'énergie par une augmentation de la force inutile (composante de la force totale appliquée parallèlement à la manivelle ; Sacchetti et al. 2011).

Effet du vieillissement sur les paramètres anthropométriques

L'analyse des mesures anthropométriques n'a pas permis de caractériser la diminution de volume de masse maigre des membres inférieurs quel que soit le groupe d'âge étudié (*Seniors* 69,6 ± 5,9 ans). Ce résultat suggère l'effet bénéfique de la pratique sportive chez le *Master* cycliste et triathlète pour prévenir de la sarcopénie dont les effets sont sensibles après 65 ans (Tzankoff et Norris 1977). En revanche l'augmentation de la masse grasse avec l'âge chez les *Masters* athlètes indique que l'entraînement régulier en volume et intensité est insuffisant pour endiguer ce phénomène.

Hypothèses explicatives du déclin du rendement

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer la réduction du rendement énergétique avec l'âge : une réduction de la capacité de production de force (Hoff et al. 2002) ou de puissance; un remodelage du schéma d'activation musculaire (Louis et al. 2009) ; une augmentation du coût énergétique de la ventilation (Watsford et al. 2009) ; l'entrainement, l'expertise du pédalage et la contribution du type de substrat (Coyle et al 1992 ; Williams et Cavanagh 1987) ; la capacité oxydative du muscle, l'endurance, la fatigabilité et la composition corporelle.

Réduction de la capacité de production de force ou de puissance

La diminution de la capacité de production de force/puissance efficace réduirait la force relative appliquée à chaque tour de pédale, augmentant ainsi le recrutement des unités motrices et la demande métabolique (Hoff et al. 2002). A l'instar des travaux de Sunde et al. (2010) et Louis et al. (2011), nous avons montré une corrélation significative entre la capacité de production de puissance maximale et le rendement énergétique du pédalage. L'analyse de corrélation du rendement énergétique à 65% PMA avec la puissance maximale théorique (indépendamment de l'âge) en utilisant un modèle linéaire permet de caractériser une relation de type : $GE_{65\%\,PMA}(\%) = -0{,}47 \times P_{max}\,(\mathrm{W.kg^{-1}}) + 16{,}62$; r = 0,63.

La diminution du rendement observée par Sacchetti et al. (2011) était associée à une diminution de la cadence de pédalage la plus efficiente (60-80 rpm chez les jeunes vs. 40-60 rpm chez les *Masters*). Les *Masters* réduiraient leur cadence de pédalage pour diminuer la part de l'énergie de gesticulation dans la dépense métabolique totale. Dans notre travail, tous les sujets avaient la consigne d'adopter une cadence de pédalage entre 80 et 90 rpm. Cet aspect n'a pas pu être vérifié.

Remodelage du schéma d'activation musculaire

De nombreuses études ont montré que la coactivation agoniste-antagoniste était accrue au cours du vieillissement (Klein et al. 2001 ; Macaluso et al. 2002). Cette suractivation des muscles antagonistes chez la personne âgée est non seulement susceptible de réduire la précision du mouvement mais aussi de diminuer la force exercée par la musculature agoniste par l'action opposée des muscles antagonistes. Récemment, Louis et al. (2009) ont analysé la coordination musculaire en cyclisme chez des jeunes et des *Masters* athlètes à une intensité de pédalage constante. Des stratégies d'activation musculaire différentes ont été mises en évidence entre les deux groupes. Chez les *Masters* athlètes, l'activité des muscles agonistes

(i.e. extenseurs du genou) était retardée, plus longue et moins importante que les jeunes, associée à une activité antagoniste (i.e. fléchisseurs du genou) augmentée et plus précoce. De plus, chez les *Masters* athlètes, la durée d'activation musculaire était plus importante que les jeunes. Il semblerait ainsi que les *Masters* athlètes compensent leur perte de force musculaire, en augmentant la durée d'activation musculaire et par voie de conséquence la dépense énergétique.

Augmentation du coût énergétique de la ventilation

La part de l'oxygène consommé pour la ventilation varie en fonction de l'intensité de l'effort. A l'effort maximal, cette contribution serait en moyenne de 10% $\dot{V}O_{2max}$ et passerait à 13-15% $\dot{V}O_{2max}$ pour les sujets sollicitant leur réserve ventilatoire (Aaron et al. 1992). Par ailleurs, Franck et al. (1998) ont reporté que l'économie de course pouvait être réduite significativement suite à six semaines d'entraînement et que la diminution de $\dot{V}O_2$ pour des exercices sous-maximaux était corrélée avec la réduction de $\dot{V}E$. La part du CE de $\dot{V}E$ est un paramètre qui intervient dans le CE de la locomotion (Coast et al. 1993); son évolution avec l'âge n'a pas encore fait l'objet d'étude. Nous n'avons pas observé de différence de $\dot{V}E$ à 65% PMA entre les groupes d'âge alors que les puissances correspondantes sont moindre chez les *Masters* et les *Seniors*. Une augmentation du CE de $\dot{V}E$ avec l'âge pourrait expliquer en partie le déclin du rendement du pédalage avec l'âge. Les effets du vieillissement, qui induisent des contraintes sur la mécanique ventilatoire (diminution des volumes mobilisables, diminution de la compliance pulmonaire et thoracique, diminution de force des muscles respiratoire) (Watsford et al. 2009) mais aussi une diminution de la capacité d'échanges gazeux du poumon, conduiraient à une augmentation du CE de $\dot{V}E$.

L'entraînement, l'expertise du pédalage et la contribution du type de substrat

Le volume et l'intensité de l'entrainement représente un des facteurs de la performance en endurance du *Master* athlète (Tanaka et Seals 2008). Le volume horaire et/ou kilométrique constituait un critère d'inclusion de notre protocole et l'analyse statistique n'a fait apparaître aucune différence entre les différents groupes. L'analyse de corrélation entre les données relatives à l'entrainement en cyclisme et le rendement brut du pédalage ne fait également pas apparaitre de relation. Néanmoins, il convient de souligner que les données relatives à l'entraînement des sujets ne prenaient pas en compte la distribution des intensités ou des cadences de pédalage d'entraînement. Par ailleurs, les améliorations du CE de la locomotion

en O_2 peuvent être partiellement compensées par une utilisation plus importante des lipides comme substrat après l'entraînement. L'absence de différence du QR observé à 65% PMA suggère une homogénéité de l'activité enzymatique résultant probablement d'un niveau d'entrainement similaire entre les groupes d'âge.

Dans notre étude, l'entraînement, l'hypothèse du niveau d'entraînement, de l'expertise du pédalage ou la contribution du type de substrat pour expliquer le déclin avec l'âge du rendement énergétique en cyclisme avancé par différents auteurs n'a pas pu être démontré.

Applications pratiques et conclusion

La mise en évidence d'un déclin du rendement énergétique souligne l'importance de prendre en compte ce facteur de la performance en endurance dans les programmes d'entrainement et d'évaluation. Les relations entre ce paramètre essentiel à la fois avec la puissance maximale et la composition corporelle suggère des stratégies d'amélioration de la performance applicables tant pour le sportif de haut niveau que pour le *Master* athlète : comme le développement ou le maintien de la capacité de production de force et de puissance maximale ou bien le suivi de l'évolution de la composition corporelle sous les effets de l'entrainement, de l'alimentation ou du vieillissement.

Cette étude a mesuré le rendement énergétique du pédalage au sein d'une population de cyclistes et triathlètes tous bien entraînés sur une large tranche d'âge. Un déclin significatif a été caractérisé avec le vieillissement. Les hypothèses explicatives sont multifactorielles. Une relation entre l'efficience énergétique et la réduction de force/puissance a été établie. D'autres hypothèses du déclin du rendement du pédalage sont évoquées comme le remodelage du schéma d'activation musculaire, les propriétés mécaniques du muscle ou la part du coût énergétique de la ventilation. Enfin, l'étude de la cinétique de l'efficience énergétique du *Master* triathlète pourrait permettre de caractériser son endurance et sa fatigabilité qui sont d'autres facteurs essentiels de la performance.

III.3.B **Synthèse**

Le coût énergétique de la partie cycliste, dont la durée représente environ 50% de la durée totale du triathlon (Lepers et al. 2009) est un facteur important de la performance en triathlon. Les principales études relatives à l'évolution des performances avec l'âge chez les *Masters* athlètes ne retiennent pas l'efficience énergétique comme hypothèse explicative du déclin observée (Allen et al. 1985 ; Evans et al. 1995 ; Peiffer et al. 2008 ; Tanaka et Seals 2003, 2008 ; Reaburn et Dascombe 2008). Les effets concomitants de l'entraînement sportif et du vieillissement concourraient à induire une prédominance progressive de fibres lentes dans des muscles qui sont plus économiques (Tanaka et Seals 2008). En revanche, Sacchetti et al. 2011 ainsi que Louis et al. 2011 ont récemment observés un rendement plus faible chez des *Masters* cyclistes et des *Masters* athlètes. Il n'existe pas actuellement de consensus sur l'effet de l'âge sur l'efficience de la locomotion pour le cyclisme et une conclusion est difficile.

Selon ces dernières études, la réduction de l'efficience avec l'âge serait principalement liée à une réduction de la capacité de production de force (Hoff et al. 2002). L'objet de cette étude est double : i) mesurer le rendement énergétique du pédalage au sein d'une population de cyclistes et triathlètes tous bien entraînés sur une large tranche d'âge afin de caractériser un éventuel déclin, et ii) investiguer une possible relation entre l'efficience énergétique et la réduction de force/puissance ou la modification de la composition corporelle avec l'âge.

Un déclin significatif du rendement du pédalage avec l'âge a été caractérisé chez des *Masters* cyclistes et des *Masters* athlètes bien entrainés. Les hypothèses explicatives sont multifactorielles. Une relation entre l'efficience énergétique et la réduction de la puissance maximale avec l'âge a été établie. D'autres hypothèses du déclin du rendement du pédalage sont évoquées comme le remodelage du schéma d'activation musculaire, les propriétés mécaniques du muscle ou la part du coût énergétique de la ventilation. Enfin, l'étude de la cinétique de l'efficience énergétique du *Master* triathlète pourrait permettre de caractériser son endurance et sa fatigabilité qui sont d'autres facteurs essentiels de la performance.

Conclusion Générale et Perspectives

Chapitre IV. Conclusion générale et perspectives

Le travail expérimental a investigué un domaine nouveau à plusieurs titres : le vieillissement de la population associé à la sédentarisation des modes de vie est un phénomène sans précédent pour l'humanité, le triathlon est un sport olympique jeune et le modèle du *Master* athlète suscite un intérêt récent. Dans ce contexte, le champ d'investigation du travail expérimental était vaste. Les résultats sont nombreux.

Le déclin de la performance sur une épreuve de triathlon (distance olympique ou *Ironman*) et pour chaque mode de locomotion a une forme exponentielle et suit le modèle exponentiel proposé pour les épreuves de course à pied par Baker et al. (2003). Un déclin significatif a été observé sur la performance totale à partir de 45 ans chez les *Masters* triathlètes hommes. Il est plus prononcé sur *Ironman* que sur distance olympique. Le déclin en triathlon est plus tardif que celui observé en course à pied (i.e., 35 ans Leyk et al. 2007 ; Tanaka et Seals 2003, 2008). Ce résultat suggère un déclin spécifique à chaque mode de locomotion et à l'évolution de leur contribution respective dans la performance totale. Cette première hypothèse est vérifiée puisqu'une différence significative entre les modes de locomotion est observée (Bernard et al. 2010). En natation sur distance olympique, le déclin est significatif par rapport au groupe d'âge précédent après 40 ans, il est plus précoce qu'en course à pied (après 55 ans) ou qu'en cyclisme (après 60 ans). Comparé aux autres modes de locomotion, un moindre déclin des performances en cyclisme est observé. Le déclin en course à pied devient significatif par rapport au groupe d'âge précédent à 45 ans sur *Ironman* alors que ce n'était le cas qu'après 55 ans sur distance olympique. La contribution de chaque mode de locomotion sur la performance totale n'évolue pas avec l'âge avant 70 ans. Après 70 ans, la contribution de la natation et de la course à pied augmente de manière significative sur distance olympique.

Le déclin plus prononcé en natation lors d'une épreuve de triathlon n'est pas en accord avec les études de Tanaka et Seals (2003, 2008) qui ont mis en évidence un moindre déclin en natation qu'en course à pied quand ces activités sont réalisées de manière isolée. La principale hypothèse explicative avancée était due au fait de l'absence d'impact en natation qui rendrait cette activité moins traumatisante. Notre résultat pourrait être expliqué par un moindre niveau d'expertise de la natation chez les *Masters* triathlètes et/ou une stratégie de course consistant à utiliser le *drafting* en natation ou à nager moins vite pour réduire le coût énergétique et

privilégier les parcours cycliste et course à pied dont la contribution à la performance totale est plus importante (Bentley et al. 2002). Le déclin en natation est similaire, sur distance olympique et *Ironman*.

Le moindre déclin des performances en cyclisme observée sur distance olympique et *Ironman* pourrait s'expliquer par des aspects mécaniques (Lepers et al. 2009). La conséquence d'une même diminution de capacité de production de puissance motrice induite par le vieillissement pourrait se traduire par une moindre variation de vitesse en cyclisme qu'en course à pied.

Le déclin plus prononcé en course à pied qu'en cyclisme pourrait être expliqué par une plus grande sensibilité à la fatigue neuromusculaire (Gauche et al. 2006) et aux dommages musculaires (Place et al. 2004) en fin d'épreuve.

La comparaison du déclin des performances avec l'âge sur triathlon distance olympique (1,5 km de natation, 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied) et sur *Ironman* (3,8 km de natation, 180 km de cyclisme et 42,2 km de course à pied) montre qu'il est moins prononcé sur distance olympique pour la performance totale, en cyclisme et en course à pied respectivement pour les groupes d'âge au dessus de 55 ans, 55 ans et 50 ans. Le déclin de la performance en natation semble indépendant du format de l'épreuve. L'amplitude des déclins observés en cyclisme et en course à pied est plus grande sur *Ironman.* Cette dernière observation suggère que la durée de la tâche pourrait être un facteur important de l'évolution des performances avec l'âge en triathlon ou pour les activités d'ultra endurance. D'ailleurs, une récente étude sur une course d'ultra endurance en course à pied rapporte une fatigabilité accrue et une plus grande sensibilité aux dommages musculaires avec le vieillissement chez les *Masters* athlètes (Easthope et al. 2010). Outre l'effet de l'âge sur les principaux facteurs de la performance en endurance (Tanaka et Seals 2008), il apparaissait intéressant de mesurer l'impact de la réalisation d'une compétition de triathlon afin d'évaluer la fatigue induite par l'épreuve et d'analyser la réponse à l'exercice pendant l'épreuve. L'étude du modèle du *Master* triathlète a consisté à i) étudier les performances musculaires et les paramètres cardio-respiratoires du groupe de *Masters* triathlètes bien entrainés, avant et après (24 heures) un triathlon distance olympique et à les comparer à un groupe de jeunes, et ii) mesurer la réponse cardiaque des sujets lors de l'épreuve.

Avant l'épreuve, $\dot{V}O_{2max}$, vVO_{2max}, les vitesses aux seuils ventilatoires et l'efficience énergétique étaient significativement plus faibles chez les *Masters* triathlètes, mais le couple maximal volontaire était similaire pour les deux groupes. Vingt quatre heures après la course,

une diminution significative et similaire pour les deux groupes a été observée pour $\dot{V}O_{2max}$ et vVO_{2max}. La vitesse à VT2 avait diminué de manière significative uniquement chez les *Masters* alors qu'il n'a pas été observé de différence sur le couple maximal isométrique ou sur l'efficience énergétique de la course à pied à intensité sous maximale. Lors de l'épreuve de triathlon, il n'a pas été observé de différence d'intensité relative d'effort entre les deux groupes. Ces résultats indiquent que chez les sujets bien entraînés, l'intensité relative de l'effort sur l'ensemble d'un triathlon distance olympique et que la fatigue, 24 heures après la course, semblent indépendantes de l'âge pour ce type d'épreuve. Concernant la récupération, l'âge n'a pas non plus d'influence significative sur la récupération 24h après la compétition. Seule la vitesse à VT2 est impactée probablement en raison des durées d'effort différentes entre les 2 groupes. Alors que l'efficience énergétique n'est pas retenue comme facteur déterminant du déclin des performances chez les *Masters* athlètes (Allen et al. 1985 ; Evans et al. 1995 ; Peiffer et al. 2008 ; Tanaka et Seals 2003, 2008 ; Reaburn et Dascombe 2008), l'observation d'une différence significative du CE en course à pied (plus important chez les *Masters* triathlètes) suggère qu'une modification du CE de la locomotion avec l'âge pourrait contribuer au déclin des performances.

Dans la troisième étude, un déclin significatif du rendement du pédalage avec l'âge a été analysé chez des *Masters* cyclistes et des *Masters* triathlètes bien entrainés. Les hypothèses explicatives sont multifactorielles. Une relation entre l'efficience énergétique et la réduction de la puissance maximale avec l'âge a été établie. D'autres hypothèses sont évoquées et méritent des investigations complémentaires comme le remodelage du schéma d'activation musculaire, l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques du muscle ou la part du CE de la ventilation.

La mise en évidence d'un déclin du rendement énergétique souligne l'importance de prendre en compte ce facteur de la performance en endurance dans les programmes d'entrainement et d'évaluation. Les relations entre ce paramètre essentiel à la fois avec la puissance maximale et la composition corporelle suggère des stratégies d'amélioration de la performance applicables tant pour le sportif de haut niveau que pour le *Master* athlète. Le vieillissement conduit inexorablement à une réduction de la masse musculaire squelettique, contribuant ainsi au déclin des performances et à une plus grande fragilité. Le seul moyen actuel de pallier partiellement la sarcopénie est de maintenir une activité physique régulière, basée à la fois sur les exercices de force et d'endurance (Poortmans et Carpentier 2009). Les premiers activent

les signaux de la synthèse protéique myofibrillaire, tandis que les seconds agissent sur la synthèse des enzymes oxydatives des mitochondries. Pour le *Master* athlète et compte tenu des effets du vieillissement, il apparait que la composition corporelle mérite d'être considérée comme un facteur physiologique important de la performance en complément des autres facteurs classiquement utilisés.

A titre applicatif, le tableau des facteurs de la performance en triathlon établi dans le cadre théorique de ce travail peut être révisé pour l'adapter aux spécificités du *Master* triathlète (Tableau 7).

	Principaux déterminants
Performance en endurance	$\dot{V}O_{2max}$ Fraction de $\dot{V}O_{2max}$ Economie de course
Performance musculaire	Capacité du muscle à produire de la force **et de la puissance**
Natation	Technique de nage pour : - Réduire les résistances mécaniques - Produire une puissance propulsive.
Cyclisme	Production $P_{méca}$ à partir du mouvement de pédalage Contraintes aérodynamiques du contre la montre individuel
Course à pied	Masse et caractéristiques anthropométriques Capacité de stockage et de restitution de l'énergétique du système musculaire
Triathlon	Utilisation des conditions d'aspiration (en natation seulement) Stratégie et tactique de course en milieu ouvert
Longévité	**Capacité à s'entraîner dans la durée. Facteurs psycho sociologiques et organisationnels** **Robustesse face aux blessures. Fatigabilité.**
Anthropométrique	**Modification corporelle**

Tableau 7 : Déterminants de la performance en triathlon pour le *Master* triathlète

Les perspectives de ce travail sont nombreuses :

1. En ajoutant un groupe de sujets, la dernière étude expérimentale pourrait investiguer l'effet de l'âge sur le rendement du pédalage au-delà de 70 ans (sous réserve de trouver des sujets répondant aux critères d'inclusion) ;
2. L'investigation de l'effet de l'âge sur le coût énergétique des autres modes de locomotion pourrait être riche d'enseignements compte tenu de leurs spécificités respectives ;
3. L'étude de la cinétique de l'efficience énergétique du *Master* triathlète pourrait permettre de caractériser son endurance et sa fatigabilité ;
4. Une analyse des stratégies d'allure par mode de locomotion pourrait compléter l'étude du *Master* triathlète ;
5. Le modèle du *Master* athlète féminin avec ses spécificités présente un champ d'investigation qui n'est pas encore exploité ;
6. Une meilleure connaissance des facteurs psycho-sociologiques de la performance chez les *Masters* athlètes pourrait accompagner les investigations du champ physiologique ;
7. La recherche applicative de stratégies pour minimiser les effets du vieillissement combinant entrainement, mode de locomotion et nutrition pourrait être une finalité.

Bibliographie

Bibliographie

Aaron EA, Seow KC, Johnson BD, Dempsey JA. (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol.* 72 (5):1818-1825.

Allen WK, Seals DR, Hurley BF, Ehsani AA, Hagberg JM. (1985). Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. *J Appl Physiol.* 58 (4):1281-1284.

Alnaqeeb MA, Goldspink G. (1987). Changes in fibre type, number and diameter in developing and ageing skeletal muscle. *J Anat.* 153:31-45.

Arsac LM, Belli A, Lacour JR. (1996). Muscle function during brief maximal exercise: accurate measurements on a friction-loaded cycle ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 74 (1-2):100-106.

Astrand PO. (1967). Measurement of maximal aerobic capacity. *Can Med Assoc J.* 96 (12):732-735.

Astrand PO, Ryhming I. (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol.* 7 (2):218-221.

Astrand PO, Saltin B. (1961). Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol.* 16:977-981.

Baker AB, Tang YQ, Turner MJ. (2003). Percentage decline in masters superathlete track and field performance with aging. *Experimental Aging Reasearch.* 29:47-65.

Baker J, Fraser-Thomas J, A. DR, Horton S. (2010). Sport participation and positive development in older persons. *Eur Rev Aging Phys Act.* 7:3-12.

Balagopal P, Ljungqvist O, Nair KS. (1997). Skeletal muscle myosin heavy-chain synthesis rate in healthy humans. *Am J Physiol.* 272 (1 Pt 1):E45-50.

Balmer J, Bird S, Davison R. (2008a). Indoor 16.1-km time-trial performance in cyclists aged 25- 63 years. *J Sports Sci.* 26 (1):57-62.

Balmer J, Bird S, Davison R, Lucia A. (2008b). Effect of age on 16.1-km time-trial performance. *J Sports Sci.* 26 (2):197-206.

Barani AE, Durieux AC, Sabido O, Freyssenet D. (2003). Age-related changes in the mitotic and metabolic characteristics of muscle-derived cells. *J Appl Physiol.* 95 (5):2089-2098.

Baratta R, Solomonow M, Zhou BH, Letson D, Chuinard R, D'Ambrosia R. (1988). Muscular coactivation. The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *Am J Sports Med.* 16 (2):113-122.

Bassett DR, Jr., Flohr J, Duey WJ, Howley ET, Pein RL. (1991). Metabolic responses to drafting during front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc.* 23 (6):744-747.

Bassett DR, Jr., Howley ET. (1997). Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med Sci Sports Exerc.* 29 (5):591-603.

Bassett DR, Jr., Howley ET. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 32 (1):70-84.

Bassey EJ, Fiatarone MA, O'Neill EF, Kelly M, Evans WJ, Lipsitz LA. (1992). Leg extensor power and functional performance in very old men and women. *Clin Sci (Lond).* 82 (3):321-327.

Baudry S, Klass M, Duchateau J. (2005). Postactivation potentiation influences differently the nonlinear summation of contractions in young and elderly adults. *J Appl Physiol.* 98 (4):1243-1250.

Baudry S, Klass M, Pasquet B, Duchateau J. (2007). Age-related fatigability of the ankle dorsiflexor muscles during concentric and eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol.* 100 (5):515-525.

Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 60 (6):2020-2027.

Beelen A, Sargeant AJ. (1993). Effect of prior exercise at different pedalling frequencies on maximal power in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 66 (2):102-107.

Bell MP, Ferguson RA. (2009). Interaction between muscle temperature and contraction velocity affects mechanical efficiency during moderate-intensity cycling exercise in young and older women. *J Appl Physiol.* 107 (3):763-769.

Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR. (2002). Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance. *Sports Med.* 32 (6):345-359.

Bentley DJ, Wilson GJ, Davie AJ, Zhou S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 38 (3):201-207.

Bernard T, Hausswirth C, Le Meur Y, Bignet F, Dorel S, Brisswalter J. (2009). Distribution of power output during the cycling stage of a Triathlon World Cup. *Med Sci Sports Exerc.* 41 (6):1296-1302.

Bernard T, Sultana F, Lepers R, Hausswirth C, Brisswalter J. (2010). Age-related decline in olympic triathlon performance: effect of locomotion mode. *Exp Aging Res.* 36 (1):64-78.

Bernard T, Vercruyssen F, Grego F, Hausswirth C, Lepers R, Vallier JM, Brisswalter J. (2003). Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *Br J Sports Med.* 37 (2):154-158; discussion 159.

Bernard T, Vercruyssen F, Mazure C, Gorce P, Hausswirth C, Brisswalter J. (2007). Constant versus variable-intensity during cycling: effects on subsequent running performance. *Eur J Appl Physiol.* 99 (2):103-111.

Betik AC, Hepple RT. (2008). Determinants of VO2 max decline with aging: an integrated perspective. *Appl Physiol Nutr Metab.* 33 (1):130-140.

Bieuzen F, Hausswirth C, Louis J, Brisswalter J. (2010). Age-related changes in neuromuscular function and performance following a high-intensity intermittent task in endurance-trained men. *Gerontology.* 56 (1):66-72.

Bijker KE, de Groot G, Hollander AP. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *Eur J Appl Physiol.* 87 (6):556-561.

Billat V, Sirvent P, Lepretre PM, Koralsztein JP. (2004). Training effect on performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance-runners. *Pflugers Arch.* 447 (6):875-883.

Boffoli D, Scacco SC, Vergari R, Solarino G, Santacroce G, Papa S. (1994). Decline with age of the respiratory chain activity in human skeletal muscle. *Biochim Biophys Acta.* 1226 (1):73-82.

Bongard V, McDermott AY, Dallal GE, Schaefer EJ. (2007). Effects of age and gender on physical performance. *Age (Dordr).* 29 (2-3):77-85.

Borg GA. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc.* 14 (5):377-381.

Bosco C, Komi PV. (1980). Influence of aging on the mechanical behavior of leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 45 (2-3):209-219.

Bosquet L, Leger L, Legros P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med.* 32 (11):675-700.

Bosquet L, Léger L, Legros P. (2000). Les méthodes de détermination de l'endurance aérobie. *Science & Sports.* 15:55-73.

Boulanger E, Puisieux F, Gaxatte C, Wautier JL. (2007). [Aging: role and control of glycation]. *Rev Med Interne.* 28 (12):832-840.

Brisswalter J, Hausswirth C. (2003). Energie et performance. *Physique et sportive Ed Armand Colin.*

Brisswalter J, Legros P. (1994). Stabilité intra-individuelle des paramètres cinématiques, du coût énergétique de la course à pied chez des athlètes spécialistes de moyennes distances. *Science & Sports.* 9:145-153.

Brooks GA. (1985). Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc.* 17 (1):22-34.

Brown MC, Holland RL, Hopkins WG. (1981). Motor nerve sprouting. *Annu Rev Neurosci.* 4:17-42.

Brown SJ, Ryan HJ, Brown JA. (2007). Age-associated changes in VO2 and power output—a cross-sectional study of endurance trained New Zealand cyclists. *J Sport Sci Med.* 6:477–483.

Brunner F, Schmid A, Sheikhzadeh A, Nordin M, Yoon J, Frankel V. (2007). Effects of aging on Type II muscle fibers: a systematic review of the literature. *J Aging Phys Act.* 15 (3):336-348.

Buskirk ER, Hodgson JL. (1987). Age and aerobic power: the rate of change in men and women. *Fed Proc.* 46 (5):1824-1829.

Butler-Browne G, Bigard AX. (2006). Caractéristiques du vieillissement musculaire et effets préventifs de l'exercice régulier. *Science et Sports.* 21:184-193.

Butler PJ, Turner DL. (1988). Effect of training on maximal oxygen uptake and aerobic capacity of locomotory muscles in tufted ducks, Aythya fuligula. *J Physiol.* 401:347-359.

Cardus J, Burgos F, Diaz O, Roca J, Barbera JA, Marrades RM, Rodriguez-Roisin R, Wagner PD. (1997). Increase in pulmonary ventilation-perfusion inequality with age in healthy individuals. *Am J Respir Crit Care Med.* 156 (2 Pt 1):648-653.

Carmeli E, Coleman R, Reznick AZ. (2002). The biochemistry of aging muscle. *Exp Gerontol.* 37 (4):477-489.

Cartee GD. (1994a). Aging skeletal muscle: response to exercise. *Exerc Sport Sci Rev.* 22:91-120.

Cartee GD. (1994b). Influence of age on skeletal muscle glucose transport and glycogen metabolism. *Med Sci Sports Exerc.* 26 (5):577-585.

Cartee GD, Farrar RP. (1988). Exercise training induces glycogen sparing during exercise by old rats. *J Appl Physiol.* 64 (1):259-265.

Cartee GD, Kietzke EW, Briggs-Tung C. (1994). Adaptation of muscle glucose transport with caloric restriction in adult, middle-aged, and old rats. *Am J Physiol.* 266 (5 Pt 2):R1443-1447.

Cavagna. (1977). Storage and utilisation of energy elastic in skeletal muscle. *Exerc Sport Sci Rev.* 5:89-130.

Cavagna GA, Legramandi MA, Peyre-Tartaruga LA. (2008). Old men running: mechanical work and elastic bounce. *Proc Biol Sci.* 275 (1633):411-418.

Cavanagh PR, Lafortune MA. (1980). Ground reaction forces in distance running. *J Biomech.* 13 (5):397-406.

Cazorla G, Montpetit R, Fouillot J, Cervetti J. (1982). Étude méthodologique de la mesure directe de la consommation maximale d'oxygène au cours de la nage. *Cinésiologie.* XXI:33–40.

Chapman DW, Newton M, McGuigan MR, Nosaka K. (2008). Comparison between old and young men for responses to fast velocity maximal lengthening contractions of the elbow flexors. *Eur J Appl Physiol.* 104 (3):531-539.

Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. (1990). Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 61 (1-2):88-92.

Chatard JC, Millet G. (1996). Effects of wetsuit use in swimming events. Practical recommendations. *Sports Med.* 22 (2):70-75.

Chollet D, Hue O, Auclair F, Millet G, Chatard JC. (2000). The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes. *Eur J Appl Physiol.* 82 (5-6):413-417.

Clarkson PM, Kroll W, Melchionda AM. (1981). Age, isometric strength, rate of tension development and fiber type composition. *J Gerontol.* 36 (6):648-653.

Clarys JP. (1979). Human morphology and hydrodynamics. *Tarauds, Bedingfield EW, editors Swimming III Baltimore : Univ Park Press.*3-44.

Coast JR, Rasmussen SA, Krause KM, O'Kroy JA, Loy RA, Rhodes J. (1993). Ventilatory work and oxygen consumption during exercise and hyperventilation. *J Appl Physiol.* 74 (2):793-798.

Coggan AR, Spina RJ, King DS, Rogers MA, Brown M, Nemeth PM, Holloszy JO. (1992). Skeletal muscle adaptations to endurance training in 60- to 70-yr-old men and women. *J Appl Physiol.* 72 (5):1780-1786.

Coggan AR, Spina RJ, Rogers MA, King DS, Brown M, Nemeth PM, Holloszy JO. (1990). Histochemical and enzymatic characteristics of skeletal muscle in master athletes. *J Appl Physiol.* 68 (5):1896-1901.

Conley DL, Krahenbuhl GS. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 12 (5):357-360.

Conley KE, Jubrias SA, Amara CE, Marcinek DJ. (2007). Mitochondrial dysfunction: impact on exercise performance and cellular aging. *Exerc Sport Sci Rev.* 35 (2):43-49.

Convertino VA. (1991). Blood volume: its adaptation to endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 23 (12):1338-1348.

Convertino VA. (2007). Blood volume response to physical activity and inactivity. *Am J Med Sci.* 334 (1):72-79.

Convertino VA, Ludwig DA. (2000). Validity of VO(2 max) in predicting blood volume: implications for the effect of fitness on aging. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 279 (3):R1068-1075.

Cooper LW, Powell AP, Rasch J. (2007). Master's swimming: an example of successful aging in competitive sport. *Curr Sports Med Rep.* 6 (6):392-396.

Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. (1985). Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med.* 6 (5):266-270.

Costill DL, Maglischo BW, Richardson AB. (1994). La natation. *Vigot.*13-14.

Coyle EF. (1995). Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev.* 23:25-63.

Coyle EF. (2006). Understanding efficiency of human muscular movement exemplifies integrative and translational physiology. *J Physiol.* 571 (Pt 3):501.

Craib MW, Mitchell VA, Fields KB, Cooper TR, Hopewell R, Morgan DW. (1996). The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 28 (6):737-743.

Crane JD, Devries MC, Safdar A, Hamadeh MJ, Tarnopolsky MA. (2010). The effect of aging on human skeletal muscle mitochondrial and intramyocellular lipid ultrastructure. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 65 (2):119-128.

D'Antona G, Pellegrino MA, Adami R, Rossi R, Carlizzi CN, Canepari M, Saltin B, Bottinelli R. (2003). The effect of ageing and immobilization on structure and function of human skeletal muscle fibres. *J Physiol.* 552 (Pt 2):499-511.

Dalleau G, Belli A, Bourdin M, Lacour JR. (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 77 (3):257-263.

Daniels JT. (1985). A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc.* 17 (3):332-338.

Davies MJ, Dalsky GP. (1997). Economy of mobility in older adults. *J Orthop Sports Phys Ther.* 26 (2):69-72.

Davy KP, Seals DR. (1994). Total blood volume in healthy young and older men. *J Appl Physiol.* 76 (5):2059-2062.

De Pero R, Amici S, Benvenuti C, Minganti C, Capranica L, Pesce C. (2009). Motivation for sport participation in older Italian athletes: the role of age, gender and competition level. *Sport Sci Health.* 5:61–69.

De Serres SJ, Enoka RM. (1998). Older adults can maximally activate the biceps brachii muscle by voluntary command. *J Appl Physiol.* 84 (1):284-291.

Deley G, Kervio G, Van Hoecke J, Verges B, Grassi B, Casillas JM. (2007). Effects of a one-year exercise training program in adults over 70 years old: a study with a control group. *Aging Clin Exp Res.* 19 (4):310-315.

Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS. (1984). Exercise-induced arterial hypoxaemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol.* 355:161-175.

Denis C, Chatard JC. (1994). Adaptabilité du sujet âgé à l'exercice d'endurance. *Science & Sports.*9209-9213.

Denis C, Chatard JC, Dormois D, Linossier MT, Geyssant A, Lacour JR. (1986). Effects of endurance training on capillary supply of human skeletal muscle on two age groups (20 and 60 years). *J Physiol (Paris).* 81 (5):379-383.

di Prampero PE. (1981). Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol.* 89:143-222.

di Prampero PE. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* 7 (2):55-72.

Dockery DW, Ware JH, Ferris BG, Jr., Glicksberg DS, Fay ME, Spiro A, 3rd, Speizer FE. (1985). Distribution of forced expiratory volume in one second and forced vital capacity in healthy, white, adult never-smokers in six U.S. cities. *Am Rev Respir Dis.* 131 (4):511-520.

Donato AJ, Tench K, Glueck DH, Seals DR, Eskurza I, Tanaka H. (2003). Declines in physiological functional capacity with age: a longitudinal study in peak swimming performance. *J Appl Physiol.* 94 (2):764-769.

Duc S. (2005). Analyse de l'activité musculaire du pédalage en relation avec la performance en cyclisme. *Mémoire de thèse.*

Duchateau J, Klass M, Baudry S. (2006a). Évolution et adaptation à l'entraînement du système neuromusculaire au cours du vieillissement. *Science & Sports.* 21:199-203.

Duchateau J, Semmler JG, Enoka RM. (2006b). Training adaptations in the behavior of human motor units. *J Appl Physiol.* 101 (6):1766-1775.

Durnin JV, Womersley J. (1974). Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr.* 32 (1):77-97.

Easthope CS, Hausswirth C, Louis J, Lepers R, Vercruyssen F, Brisswalter J. (2010). Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur J Appl Physiol.* 110 (6):1107-1116.

Egermann M, Brocai D, Lill CA, Schmitt H. (2003). Analysis of injuries in long-distance triathletes. *Int J Sports Med.* 24 (4):271-276.

Enoka RM, Christou EA, Hunter SK, Kornatz KW, Semmler JG, Taylor AM, Tracy BL. (2003). Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *J Electromyogr Kinesiol.* 13 (1):1-12.

Enright PL, Kronmal RA, Higgins M, Schenker M, Haponik EF. (1993). Spirometry reference values for women and men 65 to 85 years of age. Cardiovascular health study. *Am Rev Respir Dis.* 147 (1):125-133.

Estenne M, Yernault JC, De Troyer A. (1985). Rib cage and diaphragm-abdomen compliance in humans: effects of age and posture. *J Appl Physiol.* 59 (6):1842-1848.

Ettema G, Loras HW. (2009). Efficiency in cycling: a review. *Eur J Appl Physiol.* 106 (1):1-14.

Evans SL, Davy KP, Stevenson ET, Seals DR. (1995). Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *J Appl Physiol.* 78 (5):1931-1941.

Fairbrother JT. (2007). Prediction of 1500-m freestyle swimming times for older masters all-American swimmers. *Exp Aging Res.* 33 (4):461-471.

Faulkner JA, Davis CS, Mendias CL, Brooks SV. (2008). The aging of elite male athletes: age-related changes in performance and skeletal muscle structure and function. *Clin J Sport Med.* 18 (6):501-507.

Fell J, Reaburn P, Harrison GJ. (2008). Altered perception and report of fatigue and recovery in veteran athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 48 (2):272-277.

Fiatarone MA, Marks EC, Ryan ND, Meredith CN, Lipsitz LA, Evans WJ. (1990). High-intensity strength training in nonagenarians. Effects on skeletal muscle. *JAMA.* 263 (22):3029-3034.

Fitts RH, Troup JP, Witzmann FA, Holloszy JO. (1984). The effect of ageing and exercise on skeletal muscle function. *Mech Ageing Dev.* 27 (2):161-172.

Fitzgerald MD, Tanaka H, Tran ZV, Seals DR. (1997). Age-related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary women: a meta-analysis. *J Appl Physiol.* 83 (1):160-165.

Fleg JL, Lakatta EG. (1988). Role of muscle loss in the age-associated reduction in VO2 max. *J Appl Physiol.* 65 (3):1147-1151.

Francescato MP, Girardis M, di Prampero PE. (1995). Oxygen cost of internal work during cycling. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 72 (1-2):51-57.

Franch J, Madsen K, Djurhuus MS, Pedersen PK. (1998). Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. *Med Sci Sports Exerc.* 30 (8):1250-1256.

Frontera WR, Hughes VA, Fielding RA, Fiatarone MA, Evans WJ, Roubenoff R. (2000a). Aging of skeletal muscle: a 12-yr longitudinal study. *J Appl Physiol.* 88 (4):1321-1326.

Frontera WR, Meredith CN, O'Reilly KP, Knuttgen HG, Evans WJ. (1988). Strength conditioning in older men: skeletal muscle hypertrophy and improved function. *J Appl Physiol.* 64 (3):1038-1044.

Frontera WR, Suh D, Krivickas LS, Hughes VA, Goldstein R, Roubenoff R. (2000b). Skeletal muscle fiber quality in older men and women. *Am J Physiol Cell Physiol.* 279 (3):C611-618.

Fuchi T, Iwaoka K, Higuchi M, Kobayashi S. (1989). Cardiovascular changes associated with decreased aerobic capacity and aging in long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 58 (8):884-889.

Fung L, Ha A. (1994). Changes in track and field performance with chronological aging. *Int J Aging Hum Dev.* 38 (2):171-180.

Gallagher D, Belmonte D, Deurenberg P, Wang Z, Krasnow N, Pi-Sunyer FX, Heymsfield SB. (1998). Organ-tissue mass measurement allows modeling of REE and metabolically active tissue mass. *Am J Physiol.* 275 (2 Pt 1):E249-258.

Garcia AL, Wagner K, Einig C, Trippo U, Koebnick C, Zunft HJ. (2006). Evaluation of body fat changes during weight loss by using improved anthropometric predictive equations. *Ann Nutr Metab.* 50 (3):297-304.

Gauche E, Lepers R, Rabita G, Leveque JM, Bishop D, Brisswalter J, Hausswirth C. (2006). Vitamin and mineral supplementation and neuromuscular recovery after a running race. *Med Sci Sports Exerc.* 38 (12):2110-2117.

Gleim GW, Stachenfeld NS, Nicholas JA. (1990). The influence of flexibility on the economy of walking and jogging. *J Orthop Res.* 8 (6):814-823.

Gordon T, Hegedus J, Tam SL. (2004). Adaptive and maladaptive motor axonal sprouting in aging and motoneuron disease. *Neurol Res.* 26 (2):174-185.

Goubel F. (2001). Adaptation des propriétés mécaniques du muscle à l'entraînement. *Science & Sports.* 16 (4):196-203.

Grappe F. (2009). Cyclisme et Optimisation de la Performance. *Edition De Boeck, Collection Science et Pratique du Sport.* (2ème édition).

Green HJ, Roy B, Grant S, Hughson R, Burnett M, Otto C, Pipe A, McKenzie D, Johnson M. (2000). Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *J Appl Physiol.* 89 (3):1189-1197.

Greenlund LJ, Nair KS. (2003). Sarcopenia--consequences, mechanisms, and potential therapies. *Mech Ageing Dev.* 124 (3):287-299.

Grimby G, Danneskiold-Samsoe B, Hvid K, Saltin B. (1982). Morphology and enzymatic capacity in arm and leg muscles in 78-81 year old men and women. *Acta Physiol Scand.* 115 (1):125-134.

Guenard H, Diallo MH, Laurent F, Vergeret J. (1992). Lung density and lung mass in emphysema. *Chest.* 102 (1):198-203.

Guenard H, Rouatbi S. (2002a). Aspects physiologiques du vieillissement respiratoire. *Rev Mal Respir.* 19:230-240.

Guenard H, Rouatbi S. (2002b). Physiological aspects of the decline of pulmonary function with age. *Rev Mal Respir.* 19 (2 Pt1):230-240.

Hagberg JM, Allen WK, Seals DR, Hurley BF, Ehsani AA, Holloszy JO. (1985). A hemodynamic comparison of young and older endurance athletes during exercise. *J Appl Physiol.* 58 (6):2041-2046.

Hagberg JM, Coyle EF. (1983). Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc.* 15 (4):287-289.

Hagberg JM, Graves JE, Limacher M, Woods DR, Leggett SH, Cononie C, Gruber JJ, Pollock ML. (1989). Cardiovascular responses of 70- to 79-yr-old men and women to exercise training. *J Appl Physiol.* 66 (6):2589-2594.

Hagberg JM, McCole SD. (1996). Energy expenditure during bycling. *In : Burke ER, editor High tech Cycling Champaign, IL : Human Kinetics.*167-184.

Hagerman FC, Fielding RA, Fiatarone MA, Gault JA, Kirkendall DT, Ragg KE, Evans WJ. (1996). A 20-yr longitudinal study of Olympic oarsmen. *Med Sci Sports Exerc.* 28 (9):1150-1156.

Hagerman FC, Walsh SJ, Staron RS, Hikida RS, Gilders RM, Murray TF, Toma K, Ragg KE. (2000). Effects of high-intensity resistance training on untrained older men. I. Strength, cardiovascular, and metabolic responses. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 55 (7):B336-346.

Hagmar M, Hirschberg AL, Lindholm C, Schenck-Gustafsson K, Eriksson MJ. (2005). Athlete's heart in postmenopausal former elite endurance female athletes. *Clin J Sport Med.* 15 (4):257-262.

Hakkinen K, Alen M, Kallinen M, Newton RU, Kraemer WJ. (2000). Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle-aged and elderly people. *Eur J Appl Physiol.* 83 (1):51-62.

Hakkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Malkia E, Kraemer WJ, Newton RU, Alen M. (1998). Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol.* 84 (4):1341-1349.

Harms CA, McClaran SR, Nickele GA, Pegelow DF, Nelson WB, Dempsey JA. (2000). Effect of exercise-induced arterial O2 desaturation on VO2max in women. *Med Sci Sports Exerc.* 32 (6):1101-1108.

Harridge SD, Kryger A, Stensgaard A. (1999). Knee extensor strength, activation, and size in very elderly people following strength training. *Muscle Nerve.* 22 (7):831-839.

Hausswirth C, Brisswalter J. (1999). Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres d'influence. *Science et Sports.* 14:59-70.

Hausswirth C, Brisswalter J. (2008). Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. *Sports Med.* 38 (11):881-891.

Hausswirth C, Le Meur Y, Bieuzen F, Brisswalter J, Bernard T. (2010). Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance. *Eur J Appl Physiol.* 108 (6):1115-1123.

Hausswirth C, Lehenaff D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Med.* 31 (9):679-689.

Hausswirth C, Lehenaff D, Dreano P, Savonen K. (1999). Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc.* 31 (4):599-604.

Hawkins S, Wiswell R. (2003). Rate and mechanism of maximal oxygen consumption decline with aging: implications for exercise training. *Sports Med.* 33 (12):877-888.

Hawkins SA, Marcell TJ, Victoria Jaque S, Wiswell RA. (2001). A longitudinal assessment of change in VO2max and maximal heart rate in master athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 33 (10):1744-1750.

Hawkins SA, Wiswell RA, Marcell TJ. (2003). Exercise and the master athlete--a model of successful aging? *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 58 (11):1009-1011.

Heath GW, Hagberg JM, Ehsani AA, Holloszy JO. (1981). A physiological comparison of young and older endurance athletes. *J Appl Physiol.* 51 (3):634-640.

Heck H, Mader A, Hess G, Mucke S, Muller R, Hollmann W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med.* 6 (3):117-130.

Heiden T, Burnett A. (2003). The effect of cycling on muscle activation in the running leg of an Olympic distance triathlon. *Sports Biomech.* 2 (1):35-49.

Heise GD, Martin PE. (1998). "Leg spring" characteristics and the aerobic demand of running. *Med Sci Sports Exerc.* 30 (5):750-754.

Hepple RT, Mackinnon SL, Goodman JM, Thomas SG, Plyley MJ. (1997). Resistance and aerobic training in older men: effects on VO2peak and the capillary supply to skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 82 (4):1305-1310.

Herbert RD, Gandevia SC. (1999). Twitch interpolation in human muscles: mechanisms and implications for measurement of voluntary activation. *J Neurophysiol.* 82 (5):2271-2283.

Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, Foster C. (1988). Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol.* 65 (5):2285-2290.

Hill AV. (1925). The physiological basis of athletic records. *Sci Monthly.* 21:409-428.

Hintzy F, Belli A, Grappe F, Rouillon JD. (1999). Optimal pedalling velocity characteristics during maximal and submaximal cycling in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 79 (5):426-432.

Hodge K, Allen JB, Smellie L. (2008). Motivation in Masters sport: Achievement and social goals. *Psychology of Sport and Exercise.* 9 (2):157-176.

Hoff J, Gran A, Helgerud J. (2002). Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scand J Med Sci Sports.* 12 (5):288-295.

Hoff J, Helgerud J, Wisloff U. (1999). Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc.* 31 (6):870-877.

Hooper AC. (1981). Length, diameter and number of ageing skeletal muscle fibres. *Gerontology.* 27 (3):121-126.

Hopker J, Coleman D, Passfield L. (2009a). Changes in cycling efficiency during a competitive season. *Med Sci Sports Exerc.* 41 (4):912-919.

Hopker J, Coleman D, Passfield L, Wiles J. (2010). The effect of training volume and intensity on competitive cyclists' efficiency. *Appl Physiol Nutr Metab.* 35 (1):17-22.

Hopker J, Passfield L, Coleman D, Jobson S, Edwards L, Carter H. (2009b). The effects of training on gross efficiency in cycling: a review. *Int J Sports Med.* 30 (12):845-850.

Horowitz JF, Sidossis LS, Coyle EF. (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int J Sports Med.* 15 (3):152-157.

Howley ET, Bassett DR, Jr., Welch HG. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 27 (9):1292-1301.

Hugbson RL, Weisiger KH, Swanson GD. (1987). Blood lactate concentration increase as a continuous function in progressive exercise. *J Appl Physiol.* 62:1975-1981.

Hunter SK, Thompson MW, Ruell PA, Harmer AR, Thom JM, Gwinn TH, Adams RD. (1999). Human skeletal sarcoplasmic reticulum Ca2+ uptake and muscle function with aging and strength training. *J Appl Physiol.* 86 (6):1858-1865.

Hurley BF. (1995). Age, gender, and muscular strength. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 50 Spec No:41-44.

Iwaoka K, Fuchi T, Higuchi M, Kobayashi S. (1988). Blood lactate accumulation during exercise in older endurance runners. *Int J Sports Med.* 9 (4):253-256.

Izquierdo M, Aguado X, Gonzalez R, Lopez JL, Hakkinen K. (1999a). Maximal and explosive force production capacity and balance performance in men of different ages. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 79 (3):260-267.

Izquierdo M, Ibanez J, Gorostiaga E, Garrues M, Zuniga A, Anton A, Larrion JL, Hakkinen K. (1999b). Maximal strength and power characteristics in isometric and dynamic actions of the upper and lower extremities in middle-aged and older men. *Acta Physiol Scand.* 167 (1):57-68.

Jakobi JM, Rice CL. (2002). Voluntary muscle activation varies with age and muscle group. *J Appl Physiol.* 93 (2):457-462.

Janssen I, Heymsfield SB, Wang ZM, Ross R. (2000). Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18-88 yr. *J Appl Physiol.* 89 (1):81-88.

Jeukendrup A, Saris WH, Brouns F, Kester AD. (1996). A new validated endurance performance test. *Med Sci Sports Exerc.* 28 (2):266-270.

Jokl P, Sethi PM, Cooper AJ. (2004). Master's performance in the New York City Marathon 1983-1999. *Br J Sports Med.* 38 (4):408-412.

Jones AM. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med.* 32 (1):39-43.

Jones PR, Pearson J. (1969). Anthropometric determination of leg fat and muscle plus bone volumes in young male and female adults. *J Physiol.* 204 (2):63P-66P.

Jones SM, Passfield L. (1998). The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: Haake SJ, editor. The engineering of sport. *Oxford Blackwell Science Ltd.* 265-74.

Joyner MJ. (1993). Physiological limiting factors and distance running: influence of gender and age on record performances. *Exerc Sport Sci Rev.* 21:103-133.

Jubrias SA, Odderson IR, Esselman PC, Conley KE. (1997). Decline in isokinetic force with age: muscle cross-sectional area and specific force. *Pflugers Arch.* 434 (3):246-253.

Kallinen M, Markku A. (1995). Aging, physical activity and sports injuries. An overview of common sports injuries in the elderly. *Sports Med.* 20 (1):41-52.

Kanda K, Hashizume K, Nomoto E, Asaki S. (1986). The effects of aging on physiological properties of fast and slow twitch motor units in the rat gastrocnemius. *Neurosci Res.* 3 (3):242-246.

Kasch FW, Boyer JL, Schmidt PK, Wells RH, Wallace JP, Verity LS, Guy H, Schneider D. (1999). Ageing of the cardiovascular system during 33 years of aerobic exercise. *Age Ageing.* 28 (6):531-536.

Kasch FW, Boyer JL, Van Camp S, Nettl F, Verity LS, Wallace JP. (1995). Cardiovascular changes with age and exercise. A 28-year longitudinal study. *Scand J Med Sci Sports.* 5 (3):147-151.

Kasch FW, Boyer JL, Van Camp SP, Verity LS, Wallace JP. (1993). Effect of exercise on cardiovascular ageing. *Age Ageing.* 22 (1):5-10.

Katzel LI, Sorkin JD, Fleg JL. (2001). A comparison of longitudinal changes in aerobic fitness in older endurance athletes and sedentary men. *J Am Geriatr Soc.* 49 (12):1657-1664.

Kavanagh T, Shephard RJ. (1990). Can regular sports participation slow the aging process? Data on masters athletes. *Phys Sportsmed.* 18:94-104.

Kawamura Y, Dyck PJ. (1977). Lumbar motoneurons of man: III. The number and diameter distribution of large- and intermediate- diameter cytons by nuclear columns. *J Neuropathol Exp Neurol.* 36 (6):956-963.

Kawamura Y, O'Brien P, Okazaki H, Dyck PJ. (1977a). Lumbar motoneurons of man II: the number and diameter distribution of large- and intermediate-diameter cytons in "motoneuron columns" of spinal cord of man. *J Neuropathol Exp Neurol.* 36 (5):861-870.

Kawamura Y, Okazaki H, O'Brien PC, Dych PJ. (1977b). Lumbar motoneurons of man: I) number and diameter histogram of alpha and gamma axons of ventral root. *J Neuropathol Exp Neurol.* 36 (5):853-860.

Kayser B. (2003). Exercise starts and ends in the brain. *Eur J Appl Physiol.* 90 (3-4):411-419.

Keen DA, Yue GH, Enoka RM. (1994). Training-related enhancement in the control of motor output in elderly humans. *J Appl Physiol.* 77 (6):2648-2658.

Kellis E. (1998). Quantification of quadriceps and hamstring antagonist activity. *Sports Med.* 25 (1):37-62.

Kent-Braun JA, Ng AV. (2000). Skeletal muscle oxidative capacity in young and older women and men. *J Appl Physiol.* 89 (3):1072-1078.

Kent-Braun JA, Ng AV, Doyle JW, Towse TF. (2002). Human skeletal muscle responses vary with age and gender during fatigue due to incremental isometric exercise. *J Appl Physiol.* 93 (5):1813-1823.

Kent-Braun JA, Ng AV, Young K. (2000). Skeletal muscle contractile and noncontractile components in young and older women and men. *J Appl Physiol.* 88 (2):662-668.

Kerdok AE, Biewener AA, McMahon TA, Weyand PG, Herr HM. (2002). Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *J Appl Physiol.* 92 (2):469-478.

Keul J, Keppler D, Doll E. (1967). Standard bicarbonate, pH lactate and pyruvate concentrations during and after muscular exercise. *Ger Med Mon.* 12 (4):156-158.

Kindermann W, Simon G, Keul J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 42 (1):25-34.

Kjendlie PL, Ingjer F, Stallman RK, Stray-Gundersen J. (2004). Factors affecting swimming economy in children and adults. *Eur J Appl Physiol.* 93 (1-2):65-74.

Klass M, Baudry S, Duchateau J. (2005). Aging does not affect voluntary activation of the ankle dorsiflexors during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J Appl Physiol.* 99 (1):31-38.

Klein CS, Rice CL, Marsh GD. (2001). Normalized force, activation, and coactivation in the arm muscles of young and old men. *J Appl Physiol.* 91 (3):1341-1349.

Klitgaard H, Mantoni M, Schiaffino S, Ausoni S, Gorza L, Laurent-Winter C, Schnohr P, Saltin B. (1990). Function, morphology and protein expression of ageing skeletal muscle: a cross-sectional study of elderly men with different training backgrounds. *Acta Physiol Scand.* 140 (1):41-54.

Knudson RJ, Clark DF, Kennedy TC, Knudson DE. (1977). Effect of aging alone on mechanical properties of the normal adult human lung. *J Appl Physiol.* 43 (6):1054-1062.

Kohrt WM, Malley MT, Coggan AR, Spina RJ, Ogawa T, Ehsani AA, Bourey RE, Martin WH, 3rd, Holloszy JO. (1991). Effects of gender, age, and fitness level on response of VO2max to training in 60-71 yr olds. *J Appl Physiol.* 71 (5):2004-2011.

Kolt GS, Driver RP, Giles LC. (2004). Why older Australians participate in exercise and sport. *J Aging Phys Act.* 12 (2):185-198.

Komi PV. (1984). Physiological and biomechanical correlates of muscle function: effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exerc Sport Sci Rev.* 12:81-121.

Kreider RB. (1991). Physiological considerations of ultraendurance performance. *Int J Sport Nutr.* 1 (1):3-27.

Kyle CR. (1994). Energy and aerodynamics in bicycling. *Clin Sports Med.* 13 (1):39-73.

Lakatta EG. (1993). Cardiovascular regulatory mechanisms in advanced age. *Physiol Rev.* 73 (2):413-467.

Lakatta EG. (1994). Cardiovascular reserve capacity in healthy older humans. *Aging (Milano).* 6 (4):213-223.

Larsson L, Li X, Frontera WR. (1997). Effects of aging on shortening velocity and myosin isoform composition in single human skeletal muscle cells. *Am J Physiol.* 272 (2 Pt 1):C638-649.

Lavoie JM, Montpetit RR. (1986). Applied physiology of swimming. *Sports Med.* 3 (3):165-189.

Lawrenson L, Poole JG, Kim J, Brown C, Patel P, Richardson RS. (2003). Vascular and metabolic response to isolated small muscle mass exercise: effect of age. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 285 (3):H1023-1031.

Le Gallais D, Hayot M, Hue O, Wouassi D, Boussana A, Ramonatxo M, Prefaut C. (1999). Metabolic and cardioventilatory responses during a graded exercise test before and 24 h after a triathlon. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 79 (2):176-181.

Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J, Bernard T. (2009). Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *Eur J Appl Physiol.* 106 (4):535-545.

Léger L, Thivierge M. (1988). Heart rate monitors : validity, stability, and functionality. *Physician Sportsmed.* 16 (5):143-151.

Léone M, Bongbélé J, Lavoie J. (1987). Rétrospective et prospective de l'évaluation de la puissance aérobie maximale en natation. *Revue Staps.* 8 (15):5-16.

Lepers R. (2008). Analysis of Hawaii ironman performances in elite triathletes from 1981 to 2007. *Med Sci Sports Exerc.* 40 (10):1828-1834.

Lepers R, Cattagni T. (2011). Do older athletes reach limits in their performance during marathon running? *Age (Dordr).*

Lepers R, Maffiuletti NA, Rochette L, Brugniaux J, Millet GY. (2002). Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *J Appl Physiol.* 92 (4):1487-1493.

Lepers R, Sultana F, Bernard T, Hausswirth C, Brisswalter J. (2010). Age-related changes in triathlon performances. *Int J Sports Med.* 31 (4):251-256.

Lexell J. (1993). Ageing and human muscle: observations from Sweden. *Can J Appl Physiol.* 18 (1):2-18.

Lexell J. (1995). Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 50 Spec No:11-16.

Lexell J, Downham DY. (1991). The occurrence of fibre-type grouping in healthy human muscle: a quantitative study of cross-sections of whole vastus lateralis from men between 15 and 83 years. *Acta Neuropathol.* 81 (4):377-381.

Lexell J, Taylor CC, Sjostrom M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *J Neurol Sci.* 84 (2-3):275-294.

Leyk D, Erley O, Ridder D, Leurs M, Ruther T, Wunderlich M, Sievert A, Baum K, Essfeld D. (2007). Age-related changes in marathon and half-marathon performances. *Int J Sports Med.* 28 (6):513-517.

Lindle RS, Metter EJ, Lynch NA, Fleg JL, Fozard JL, Tobin J, Roy TA, Hurley BF. (1997). Age and gender comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20-93 yr. *J Appl Physiol.* 83 (5):1581-1587.

Louis J, Hausswirth C, Bieuzen F, Brisswalter J. (2009). Muscle strength and metabolism in master athletes. *Int J Sports Med.* 30 (10):754-759.

Louis J, Hausswirth C, Easthope C, Brisswalter J. (2011). Strength training improves cycling efficiency in master endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.*

Lynch NA, Metter EJ, Lindle RS, Fozard JL, Tobin JD, Roy TA, Fleg JL, Hurley BF. (1999). Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *J Appl Physiol.* 86 (1):188-194.

Macaluso A, De Vito G. (2004). Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *Eur J Appl Physiol.* 91 (4):450-472.

Macaluso A, Nimmo MA, Foster JE, Cockburn M, McMillan NC, De Vito G. (2002). Contractile muscle volume and agonist-antagonist coactivation account for differences in torque between young and older women. *Muscle Nerve.* 25 (6):858-863.

Macfarlane DJ, Fogarty BA, Hopkins WG. (1989). The accuracy and variability of commercially available heart rate monitors. *NZ J Sports Med.* 17 (4):51-53.

Maffulli N, Testa V, Capasso G. (1994). Anaerobic threshold determination in master endurance runners. *J Sports Med Phys Fitness.* 34 (3):242-249.

Maharam LG, Bauman PA, Kalman D, Skolnik H, Perle SM. (1999). Masters athletes: factors affecting performance. *Sports Med.* 28 (4):273-285.

Mahler DA, Rosiello RA, Loke J. (1986). The aging lung. *Clin Geriatr Med.* 2 (2):215-225.

Makrides L, Heigenhauser GJ, Jones NL. (1990). High-intensity endurance training in 20- to 30- and 60- to 70-yr-old healthy men. *J Appl Physiol.* 69 (5):1792-1798.

Margaria R. (1966). Energy production for muscular work in the aged. *G Gerontol.* 14 (12):1135-1142.

Margaria R, Aghemo P, Rovelli E. (1966). Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *J Appl Physiol.* 21 (5):1662-1664.

Marsh AP, Martin PE, Foley KO. (2000). Effect of cadence, cycling experience, and aerobic power on delta efficiency during cycling. *Med Sci Sports Exerc.* 32 (9):1630-1634.

Masse-Biron J, Mercier J, Collomp K, Hardy JM, Prefaut C. (1992). Age and training effects on the lactate kinetics of master athletes during maximal exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 65 (4):311-315.

McCole SD, Claney K, Conte JC, Anderson R, Hagberg JM. (1990). Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol.* 68 (2):748-753.

McDaniel J, Durstine JL, Hand GA, Martin JC. (2002). Determinants of metabolic cost during submaximal cycling. *J Appl Physiol.* 93 (3):823-828.

McElvaney GN, Blackie SP, Morrison NJ, Fairbarn MS, Wilcox PG, Pardy RL. (1989). Cardiac output at rest and in exercise in elderly subjects. *Med Sci Sports Exerc.* 21 (3):293-298.

Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O2 deficit. *J Appl Physiol.* 64 (1):50-60.

Mercier D, Léger L, Desjardins M. (1984). Nomogramme pour prédire la performance, le VO2max et l'endurance relative en course de fond. *Méd Sport.* 58:181-187.

Meredith CN, Frontera WR, Fisher EC, Hughes VA, Herland JC, Edwards J, Evans WJ. (1989). Peripheral effects of endurance training in young and old subjects. *J Appl Physiol.* 66 (6):2844-2849.

Millet GP, Candau R. (2002). Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines. *Science et Sports.* 17:166-176.

Millet GP, Dreano P, Bentley DJ. (2003a). Physiological characteristics of elite short- and long-distance triathletes. *Eur J Appl Physiol.* 88 (4-5):427-430.

Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G. (2002). Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J Appl Physiol.* 92 (2):486-492.

Millet GY, Martin V, Lattier G, Ballay Y. (2003b). Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol.* 94 (1):193-198.

Mittendorfer B, Klein S. (2001). Effect of aging on glucose and lipid metabolism during endurance exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 11 Suppl:S86-91.

Mogensen M, Bagger M, Pedersen PK, Fernstrom M, Sahlin K. (2006). Cycling efficiency in humans is related to low UCP3 content and to type I fibres but not to mitochondrial efficiency. *J Physiol.* 571 (Pt 3):669-681.

Moore DH, 2nd. (1975). A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature.* 253 (5489):264-265.

Morgan DW, Baldini FD, Martin PE, Kohrt WM. (1989a). Ten kilometer performance and predicted velocity at VO2max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc.* 21 (1):78-83.

Morgan DW, Daniels JT. (1994). Relationship between VO2max and the aerobic demand of running in elite distance runners. *Int J Sports Med.* 15 (7):426-429.

Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS. (1989b). Factors affecting running economy. *Sports Med.* 7 (5):310-330.

Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS, Baldini FD. (1991). Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Med Sci Sports Exerc.* 23 (3):378-383.

Morse CI, Thom JM, Davis MG, Fox KR, Birch KM, Narici MV. (2004). Reduced plantarflexor specific torque in the elderly is associated with a lower activation capacity. *Eur J Appl Physiol.* 92 (1-2):219-226.

Morse CI, Thom JM, Mian OS, Muirhead A, Birch KM, Narici MV. (2005). Muscle strength, volume and activation following 12-month resistance training in 70-year-old males. *Eur J Appl Physiol.* 95 (2-3):197-204.

Morton RH, Fukuba Y, Banister EW, Walsh ML, Kenny CT, Cameron BJ. (1994). Statistical evidence consistent with two lactate turnpoints during ramp exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 69 (5):445-449.

Moseley L, Achten J, Martin JC, Jeukendrup AE. (2004). No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *Int J Sports Med.* 25 (5):374-379.

Nair KS. (2005). Aging muscle. *Am J Clin Nutr.* 81 (5):953-963.

Narici MV, Maganaris CN, Reeves N. (2002). Muscle and tendon adaptations to ageing and spaceflight. *J Gravit Physiol.* 9 (1):P137-138.

Narici MV, Maganaris CN, Reeves ND, Capodaglio P. (2003). Effect of aging on human muscle architecture. *J Appl Physiol.* 95 (6):2229-2234.

Neptune RR, van den Bogert AJ. (1998). Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. *J Biomech.* 31 (3):239-245.

Neubauer O, Konig D, Wagner KH. (2008). Recovery after an Ironman triathlon: sustained inflammatory responses and muscular stress. *Eur J Appl Physiol.* 104 (3):417-426.

Nichols JF, Phares SL, Buono MJ. (1997). Relationship between blood lactate response to exercise and endurance performance in competitive female master cyclists. *Int J Sports Med.* 18 (6):458-463.

Nicol C, Avela J, Komi PV. (2006). The stretch-shortening cycle : a model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. *Sports Med.* 36 (11):977-999.

Noakes TD. (2000). Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 10 (3):123-145.

Ogawa T, Spina RJ, Martin WH, 3rd, Kohrt WM, Schechtman KB, Holloszy JO, Ehsani AA. (1992). Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation.* 86 (2):494-503.

Orlander J, Aniansson A. (1980). Effect of physical training on skeletal muscle metabolism and ultrastructure in 70 to 75-year-old men. *Acta Physiol Scand.* 109 (2):149-154.

Paavolainen L, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol.* 86 (5):1527-1533.

Padilla J, Eguia Lis MC, Licea J, Taylor AW. (1998). [Maximal aerobic capacity and sports activity in Mexicans from 13 to 56]. *Arch Inst Cardiol Mex.* 68 (3):224-231.

Parker Jones P, Davy KP, Desouza CA, Tanaka H. (1999). Total blood volume in endurance-trained postmenopausal females: relation to exercise mode and maximal aerobic capacity. *Acta Physiol Scand.* 166 (4):327-333.

Payne AM, Delbono O. (2004). Neurogenesis of excitation-contraction uncoupling in aging skeletal muscle. *Exerc Sport Sci Rev.* 32 (1):36-40.

Peiffer JJ, Abbiss CR, Chapman D, Laursen PB, Parker DL. (2008). Physiological characteristics of masters-level cyclists. *J Strength Cond Res.* 22 (5):1434-1440.

Peronnet F, Thibault G. (1984). Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course à pied. *Macolin.* 7:15-18.

Peronnet F, Thibault G, Rhodes EC, McKenzie DC. (1987). Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc.* 19 (6):610-615.

Peterson MJ, Czerwinski SA, Siervogel RM. (2003). Development and validation of skinfold-thickness prediction equations with a 4-compartment model. *Am J Clin Nutr.* 77 (5):1186-1191.

Pimentel AE, Gentile CL, Tanaka H, Seals DR, Gates PE. (2003). Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained than in sedentary men. *J Appl Physiol.* 94 (6):2406-2413.

Place N, Lepers R, Deley G, Millet GY. (2004). Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 36 (8):1347-1356.

Podolin DA, Pagliassotti MJ, Gleeson TT, Mazzeo RS. (1994). Influence of endurance training on the age-related decline in hepatic glyconeogenesis. *Mech Ageing Dev.* 75 (1):81-93.

Poehlman ET, Arciero PJ, Goran MI. (1994). Endurance exercise in aging humans: effects on energy metabolism. *Exerc Sport Sci Rev.* 22:251-284.

Pollock ML, Foster C, Knapp D, Rod JL, Schmidt DH. (1987). Effect of age and training on aerobic capacity and body composition of master athletes. *J Appl Physiol.* 62 (2):725-731.

Pollock ML, Mengelkoch LJ, Graves JE, Lowenthal DT, Limacher MC, Foster C, Wilmore JH. (1997). Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. *J Appl Physiol.* 82 (5):1508-1516.

Poortmans JR. (2006). Vieillissement, exercice et médecine préventive. *Science & Sports.* 21:181-183.

Poortmans JR, Carpentier YA. (2009). Sarcopénie, vieillissement et exercice. *science & Sports.* 24:74-78.

Porter DA, Costill DL, Zachwieja JJ, Krzeminski K, Fink WJ, Wagner E, Folkers K. (1995a). The effect of oral coenzyme Q10 on the exercise tolerance of middle-aged, untrained men. *Int J Sports Med.* 16 (7):421-427.

Porter MM, Vandervoort AA, Lexell J. (1995b). Aging of human muscle: structure, function and adaptability. *Scand J Med Sci Sports.* 5 (3):129-142.

Poujade B, Hautier CA, Rouard A. (2002). Determinants of the energy cost of front-crawl swimming in children. *Eur J Appl Physiol.* 87 (1):1-6.

Poulin MJ, Vandervoort AA, Paterson DH, Kramer JF, Cunningham DA. (1992). Eccentric and concentric torques of knee and elbow extension in young and older men. *Can J Sport Sci.* 17 (1):3-7.

Pousson M, Lepers R, Van Hoecke J. (2001). Changes in isokinetic torque and muscular activity of elbow flexors muscles with age. *Exp Gerontol.* 36 (10):1687-1698.

Power GA, Dalton BH, Behm DG, Vandervoort AA, Doherty TJ, Rice CL. (2010). Motor unit number estimates in masters runners: use it or lose it? *Med Sci Sports Exerc.* 42 (9):1644-1650.

Powers SK, Dodd S, Lawler J, Landry G, Kirtley M, McKnight T, Grinton S. (1988). Incidence of exercise induced hypoxemia in elite endurance athletes at sea level. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 58 (3):298-302.

Pratley R, Nicklas B, Rubin M, Miller J, Smith A, Smith M, Hurley B, Goldberg A. (1994). Strength training increases resting metabolic rate and norepinephrine levels in healthy 50- to 65-yr-old men. *J Appl Physiol.* 76 (1):133-137.

Prefaut C, Anselme F, Caillaud C, Masse-Biron J. (1994). Exercise-induced hypoxemia in older athletes. *J Appl Physiol.* 76 (1):120-126.

Prefaut C, Masse-Biron J. (1989). Aptitude physique aérobie et vieillissement. *Science & Sports.* 4 (3):185-191.

Proctor DN, Balagopal P, Nair KS. (1998a). Age-related sarcopenia in humans is associated with reduced synthetic rates of specific muscle proteins. *J Nutr.* 128 (2 Suppl):351S-355S.

Proctor DN, Beck KC, Shen PH, Eickhoff TJ, Halliwill JR, Joyner MJ. (1998b). Influence of age and gender on cardiac output-VO2 relationships during submaximal cycle ergometry. *J Appl Physiol.* 84 (2):599-605.

Pugh LG. (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol.* 213 (2):255-276.

Pyka G, Lindenberger E, Charette S, Marcus R. (1994). Muscle strength and fiber adaptations to a year-long resistance training program in elderly men and women. *J Gerontol.* 49 (1):M22-27.

Rahe RH, Arthur RJ. (1975). Swim performance decrement over middle life. *Med Sci Sports.* 7 (1):53-58.

Ranganathan VK, Siemionow V, Sahgal V, Yue GH. (2001). Effects of aging on hand function. *J Am Geriatr Soc.* 49 (11):1478-1484.

Ransdell LB, Vener J, Huberty J. (2009). Masters athletes: an analysis of running, swimming and cycling performance by age and gender. *J Exerc Sci Fit.* 7 (2 (Suppl)):S61–S73.

Ratel S, Poujade B. (2009). Comparative analysis of the energy cost during front crawl swimming in children and adults. *Eur J Appl Physiol.* 105 (4):543-549.

Reaburn P, Dascombe B. (2008). Endurance performance in masters athletes. *Eur Rev Aging Phys Act.* 5 (1):31-42.

Reynolds THt, Reid P, Larkin LM, Dengel DR. (2004). Effects of aerobic exercise training on the protein kinase B (PKB)/mammalian target of rapamycin (mTOR) signaling pathway in aged skeletal muscle. *Exp Gerontol.* 39 (3):379-385.

Rivera AM, Pels AE, 3rd, Sady SP, Sady MA, Cullinane EM, Thompson PD. (1989). Physiological factors associated with the lower maximal oxygen consumption of master runners. *J Appl Physiol.* 66 (2):949-954.

Rodeheffer RJ, Gerstenblith G, Becker LC, Fleg JL, Weisfeldt ML, Lakatta EG. (1984). Exercise cardiac output is maintained with advancing age in healthy human subjects: cardiac dilatation and increased stroke volume compensate for a diminished heart rate. *Circulation.* 69 (2):203-213.

Rogers MA, Hagberg JM, Martin WH, 3rd, Ehsani AA, Holloszy JO. (1990). Decline in VO2max with aging in master athletes and sedentary men. *J Appl Physiol.* 68 (5):2195-2199.

Rooyackers OE, Adey DB, Ades PA, Nair KS. (1996). Effect of age on in vivo rates of mitochondrial protein synthesis in human skeletal muscle. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 93 (26):15364-15369.

Rosen MJ, Sorkin JD, Goldberg AP, Hagberg JM, Katzel LI. (1998). Predictors of age-associated decline in maximal aerobic capacity: a comparison of four statistical models. *J Appl Physiol.* 84 (6):2163-2170.

Rossiter HB, Howlett RA, Holcombe HH, Entin PL, Wagner HE, Wagner PD. (2005). Age is no barrier to muscle structural, biochemical and angiogenic adaptations to training up to 24 months in female rats. *J Physiol.* 565 (Pt 3):993-1005.

Roth SM, Martel GF, Ivey FM, Lemmer JT, Tracy BL, Metter EJ, Hurley BF, Rogers MA. (2001). Skeletal muscle satellite cell characteristics in young and older men and women after heavy resistance strength training. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 56 (6):B240-247.

Sacchetti M, Lenti M, Di Palumbo AS, De Vito G. (2011). Different effect of cadence on cycling efficiency between young and older cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 42 (11):2128-2133.

Saltin B. (1986). Physiological adaptation to physical conditioning. Old problems revisited. *Acta Med Scand Suppl.* 711:11-24.

Santalla A, Naranjo J, Terrados N. (2009). Muscle efficiency improves over time in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 41 (5):1096-1101.

Sargeant AJ. (2007). Structural and functional determinants of human muscle power. *Exp Physiol.* 92 (2):323-331.

Sargeant AJ, Beelen A. (1993). Human muscle fatigue in dynamic exercise. In Sargeant A.J., Kernel D. (eds). *Neuromuscular fatigue (Academy series).*81-92.

Scaglioni G, Ferri A, Minetti AE, Martin A, Van Hoecke J, Capodaglio P, Sartorio A, Narici MV. (2002). Plantar flexor activation capacity and H reflex in older adults: adaptations to strength training. *J Appl Physiol.* 92 (6):2292-2302.

Seiler KS, Spirduso WW, Martin JC. (1998). Gender differences in rowing performance and power with aging. *Med Sci Sports Exerc.* 30 (1):121-127.

Shaw K, Ostrow A. (2005). Motivation and psychological skills in senior athlete. *Eur Rev Aging Phys Act.* 2:22-34.

Shephard RJ, Bouhlel E, Vandewalle H, Monod H. (1988). Muscle mass as a factor limiting physical work. *J Appl Physiol.* 64 (4):1472-1479.

Sherrill DL, Enright PL, Kaltenborn WT, Lebowitz MD. (1999). Predictors of longitudinal change in diffusing capacity over 8 years. *Am J Respir Crit Care Med.* 160 (6):1883-1887.

Sial S, Coggan AR, Hickner RC, Klein S. (1998). Training-induced alterations in fat and carbohydrate metabolism during exercise in elderly subjects. *Am J Physiol.* 274 (5 Pt 1):E785-790.

Sidossis LS, Horowitz JF, Coyle EF. (1992). Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *Int J Sports Med.* 13 (5):407-411.

Sipila S, Viitasalo J, Era P, Suominen H. (1991). Muscle strength in male athletes aged 70-81 years and a population sample. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 63 (5):399-403.

Siri WE. (1956). The gross composition of the body. *Adv Biol Med Phys.* 4:239-280.

Siri WE. (1961). Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In: Techniques for Measuring Body Composition, edited by Brozek J and Henschel A. *Washington, COMPOSITION: A A of Sciences.*p. 223-244.

Sjodin B, Jacobs I. (1981). Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med.* 2 (1):23-26.

Slawinski J. (2003). Effets de la fatigue et du niveau d'entraînement : Etude des relations entre les coûts énergétique et mécanique en course à pied. *Thèse.*

Slawinski J, Billat V. (2004). Differences in mechanical and energy cost of running among highly, well and non endurance trained runners. *Medicine Science in Sports and Exercise.* 36 (8):1440-1446.

Sleivert GG, Rowlands DS. (1996). Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med.* 22 (1):8-18.

Stainbsy WN, Gladden LB, Barclay JK, Wilson BA. (1980). Exercise efficiency: validity of base-line subtractions. *J Appl Physiol.* 48 (3):518-522.

Stones MJ, Kozma A. (1981). Adult age trends in athletic performances. *Exp Aging Res.* 7 (3):269-280.

Stones MJ, Kozma A. (1986). Age by distance effects in running and swimming records: a note on methodology. *Exp Aging Res.* 12 (4):203-206.

Sunde A, Storen O, Bjerkaas M, Larsen MH, Hoff J, Helgerud J. (2009). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *J Strength Cond Res.* 24 (8):2157-2165.

Suzuki K, Peake J, Nosaka K, Okutsu M, Abbiss CR, Surriano R, Bishop D, Quod MJ, Lee H, Martin DT, Laursen PB. (2006). Changes in markers of muscle damage, inflammation and HSP70 after an Ironman Triathlon race. *Eur J Appl Physiol.* 98 (6):525-534.

Tanaka H, Desouza CA, Jones PP, Stevenson ET, Davy KP, Seals DR. (1997). Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in physically active vs. sedentary healthy women. *J Appl Physiol.* 83 (6):1947-1953.

Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol.* 37 (1):153-156.

Tanaka H, Seals DR. (1997). Age and gender interactions in physiological functional capacity: insight from swimming performance. *J Appl Physiol.* 82 (3):846-851.

Tanaka H, Seals DR. (2003). Invited Rewiew: Dynamic exercice performance in masters athletes: insight into effects of primary human aging on physiological functional capacity. *J Appl Physiol* 95:2152-2162.

Tanaka H, Seals DR. (2008). Endurance exercise performance in Masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. *J Physiol.* 586 (1):55-63.

Tate CA, Hyek MF, Taffet GE. (1994). Mechanisms for the responses of cardiac muscle to physical activity in old age. *Med Sci Sports Exerc.* 26 (5):561-567.

Thelen DG, Schultz AB, Alexander NB, Ashton-Miller JA. (1996). Effects of age on rapid ankle torque development. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 51 (5):M226-232.

Thompson SH. (1994). Facilitation of calcium-dependent potassium current. *J Neurosci.* 14 (12):7713-7725.

Thys H. (1987). Elasticité et rendement du geste sportif. *Science et Motricité.* 1:22-26.

Thys H, Faraggiana T, Margaria R. (1972). Utilization of muscle elasticity in exercise. *J Appl Physiol.* 32 (4):491-494.

Toth MJ, Matthews DE, Tracy RP, Previs MJ. (2005). Age-related differences in skeletal muscle protein synthesis: relation to markers of immune activation. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 288 (5):E883-891.

Trappe S. (2007). Marathon runners: how do they age? *Sports Med.* 37 (4-5):302-305.

Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR. (1995). Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. *J Appl Physiol.* 78 (3):823-829.

Trappe SW, Costill DL, Vukovich MD, Jones J, Melham T. (1996). Aging among elite distance runners: a 22-yr longitudinal study. *J Appl Physiol.* 80 (1):285-290.

Tzankoff SP, Norris AH. (1977). Effect of muscle mass decrease on age-related BMR changes. *J Appl Physiol.* 43 (6):1001-1006.

Vago P, Mercier J, Ramonatxo M, Prefaut C. (1987). Is ventilatory anaerobic threshold a good index of endurance capacity? *Int J Sports Med.* 8 (3):190-195.

Vallier JM, Bigard AX, Carré F, Eclache JP, Mercier J. (2000). Détermination des seuils lactiques et ventilatoires. Position de la Société française de médecine du sport. *Science & Sports.* 15:133-140.

van Ingen Schenau GJ, Cavanagh PR. (1990). Power equations in endurance sports. *J Biomech.* 23 (9):865-881.

Vandervoort AA. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle Nerve.* 25 (1):17-25.

Vandervoort AA, McComas AJ. (1986). Contractile changes in opposing muscles of the human ankle joint with aging. *J Appl Physiol.* 61 (1):361-367.

Vandewalle H, Peres G, Heller J, Panel J, Monod H. (1987). Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. Correlation with the height of a vertical jump. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 56 (6):650-656.

Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM. (2002). Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc.* 34 (3):530-536.

Vijayan K, Thompson JL, Norenberg KM, Fitts RH, Riley DA. (2001). Fiber-type susceptibility to eccentric contraction-induced damage of hindlimb-unloaded rat AL muscles. *J Appl Physiol.* 90 (3):770-776.

Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Burgi A. (2008). Pacing during an elite Olympic distance triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport.* 11 (4):424-432.

Vleck VE, Burgi A, Bentley DJ. (2006). The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite olympic distance triathlon. *Int J Sports Med.* 27 (1):43-48.

Wahba WM. (1983). Influence of aging on lung function--clinical significance of changes from age twenty. *Anesth Analg.* 62 (8):764-776.

Wakeling JM, Blake OM, Chan HK. (2010). Muscle coordination is key to the power output and mechanical efficiency of limb movements. *J Exp Biol.* 213 (3):487-492.

Wasserman K, McIlroy MB. (1964). Detecting the Threshold of Anaerobic Metabolism in Cardiac Patients during Exercise. *Am J Cardiol.* 14:844-852.

Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN, Beaver WL. (1967). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J App Physiol.* 35:236-243.

Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, Beaver WL. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol.* 35 (2):236-243.

Watsford ML, Murphy AJ, Pine MJ. (2007). The effects of ageing on respiratory muscle function and performance in older adults. *J Sci Med Sport.* 10 (1):36-44.

Weiner JS, Lourie JA. (1981). In: Practical human biology. . *London: Academic Press.*p. 27-52.

Weiss EP, Spina RJ, Holloszy JO, Ehsani AA. (2006). Gender differences in the decline in aerobic capacity and its physiological determinants during the later decades of life. *J Appl Physiol.* 101 (3):938-944.

Wells CL, Boorman MA, Riggs DM. (1992). Effect of age and menopausal status on cardiorespiratory fitness in masters women runners. *Med Sci Sports Exerc.* 24 (10):1147-1154.

Werner C, Hanhoun M, Widmann T, Kazakov A, Semenov A, Poss J, Bauersachs J, Thum T, Pfreundschuh M, Muller P, Haendeler J, Bohm M, Laufs U. (2008). Effects of physical exercise on myocardial telomere-regulating proteins, survival pathways, and apoptosis. *J Am Coll Cardiol.* 52 (6):470-482.

Wiebe CG, Gledhill N, Jamnik VK, Ferguson S. (1999). Exercise cardiac function in young through elderly endurance trained women. *Med Sci Sports Exerc.* 31 (5):684-691.

Williams KR, Cavanagh PR. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol.* 63 (3):1236-1245.

Willis PE, Chadan SG, Baracos V, Parkhouse WS. (1998). Restoration of insulin-like growth factor I action in skeletal muscle of old mice. *Am J Physiol.* 275 (3 Pt 1):E525-530.

Wilson M, O'Hanlon R, Basavarajaiah S, George K, Green D, Ainslie P, Sharma S, Prasad S, Murrell C, Thijssen D, Nevill A, Whyte G. (2010). Cardiovascular function and the veteran athlete. *Eur J Appl Physiol.* 110 (3):459-478.

Wilson TM, Tanaka H. (2000). Meta-analysis of the age-associated decline in maximal aerobic capacity in men: relation to training status. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 278 (3):H829-834.

Wiswell RA, Hawkins SA, Jaque SV, Hyslop D, Constantino N, Tarpenning K, Marcell T, Schroeder ET. (2001). Relationship between physiological loss, performance decrement, and age in master athletes. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 56 (10):M618-626.

Wiswell RA, Jaque SV, Marcell TJ, Hawkins SA, Tarpenning KM, Constantino N, Hyslop DM. (2000). Maximal aerobic power, lactate threshold, and running performance in master athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 32 (6):1165-1170.

Woo JS, Derleth C, Stratton JR, Levy WC. (2006). The influence of age, gender, and training on exercise efficiency. *J Am Coll Cardiol.* 47 (5):1049-1057.

Wright VJ, Perricelli BC. (2008). Age-related rates of decline in performance among elite senior athletes. *Am J Sports Med.* 36 (3):443-450.

Yarasheski KE, Pak-Loduca J, Hasten DL, Obert KA, Brown MB, Sinacore DR. (1999). Resistance exercise training increases mixed muscle protein synthesis rate in frail women and men >/=76 yr old. *Am J Physiol.* 277 (1 Pt 1):E118-125.

Young BW, Starkes JL. (2005). Career-span analyses of track performance: longitudinal data present a more optimistic view of age-related performance decline. *Exp Aging Res.* 31 (1):69-90.

Young BW, Weir PL, Starkes JL, Medic N. (2008). Does lifelong training temper age-related decline in sport performance? Interpreting differences between cross-sectional and longitudinal data. *Exp Aging Res.* 34 (1):27-48.

Zahariev A, Bergouignan A, Caloin M, Normand S, Gauquelin-Koch G, Gharib C, Blanc S. (2005). Skinfold thickness versus isotope dilution for body fat assessment during simulated microgravity: results from three bed-rest campaigns in men and women with and without countermeasures. *Eur J Appl Physiol.* 95 (4):344-350.

Zamparo P. (2006). Effects of age and gender on the propelling efficiency of the arm stroke. *Eur J Appl Physiol.* 97 (1):52-58.

Zamparo P, Antonutto G, Capelli C, Francescato MP, Girardis M, Sangoi R, Soule RG, Pendergast DR. (1996). Effects of body size, body density, gender and growth on underwater torque. *Scand J Med Sci Sports.* 6 (5):273-280.

Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A. (2000a). Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 83 (6):487-491.

Zamparo P, Capelli C, Cencigh P. (2000b). Energy cost and mechanical efficiency of riding a four-wheeled, human-powered, recumbent vehicle. *Eur J Appl Physiol.* 83 (6):499-505.

Zamparo P, Pendergast DR, Mollendorf J, Termin A, Minetti AE. (2005). An energy balance of front crawl. *Eur J Appl Physiol.* 94 (1-2):134-144.

Zuntz N, Pflügers. (1901). . *Arch Physiol.* 83:557.

Annexes

Annexe I : Questionnaire « Mode de vie – Santé – Pratique sportive – Posture vélo »

NOM :

PRENOM :

Date de naissance :

Adresse :

Tél. :

E-mail :

Sports pratiqués :

Club :

ANTECEDENTS, HYGIENE DE VIE

Vos parents, grands -parents, oncles et tantes, frères et sœurs ont ils eu ou ont ils des problèmes de santé pour lesquels ils prennent des traitements ?

(Hypertension, allergies, diabète, infarctus, attaques, asthme, maladie de la thyroïde, cancers, etc.) OUI NON

Si OUI précisez ?

Avez-vous des problèmes de santé nécessitant la prise de médicaments ?

(Hypertension, allergies, diabète, infarctus, attaques, asthme, maladie de la thyroïde, cancers) OUI NON

Si OUI précisez ?

Avez-vous subi des traumatismes tels que fractures, entorses, plaies graves, brûlures ?

OUI NON

Si OUI précisez ?

Avez-vous été opéré? OUI NON

Si OUI précisez ?

Combien d'heures dormez-vous par nuit en moyenne?

Comment prenez vous vos repas *(chez vous, cantine, restaurant, sandwich)?*

Combien de temps passez-vous dans les transports ?

Est ce que vous fumez ? OUI NON

Si OUI combien ?

INTERROGATOIRE SANTE

Avez vous des problèmes digestifs ? *(Douleurs, mal à l'estomac, brûlures, nausées, diarrhées, constipation)*

Avez-vous des difficultés respiratoires ? *(Essoufflement au repos, à l'effort, toux, crachats)*

Avez-vous des palpitations ?

Avez-vous des vertiges, pertes de connaissance?

Avez-vous pris du poids ou maigri ?

Avez-vous des douleurs articulaires ?des rhumatismes?

Faites vous du rhume des foins ? Sinusites ?rhinopharyngites à répétition ?

Avez-vous des problèmes dentaires ?

INTERROGATOIRE PRATIQUE SPORTIVE

Sports d'origine et autres sports pratiqués	
Niveau de Pratique dans la discipline.	
Nombre d'années consécutives de pratique compétitive.	
Nombre d'heures d'entraînement par semaine (total)	
Nombre d'heures d'entraînement par semaine en natation	
Nombre d'heures d'entraînement par semaine en cyclisme	
Nombre d'heures d'entraînement par semaine en CAP	
Nombre de km par semaine en natation	
Nombre de km par semaine en cyclisme	
Nombre de km par semaine en CAP	
Arrêts temporaires récents d'activités physiques (blessures, épreuves de la vie…)	
DONNEES ANTHROPOMETRIQUES	
Poids (kg)	
Taille (m)	
IMC (kg/m^2)	

POSTURE VELO

Pour le test sur ergo cycle, il convient de se rapprocher des conditions habituelles de compétition. L'ergo cycle sera configuré en reproduisant votre posture « cycliste » à partir des mesures réalisées sur votre vélo (figure ci après). Il faudra apporter **ses chaussures et pédales lors de la session de test.**

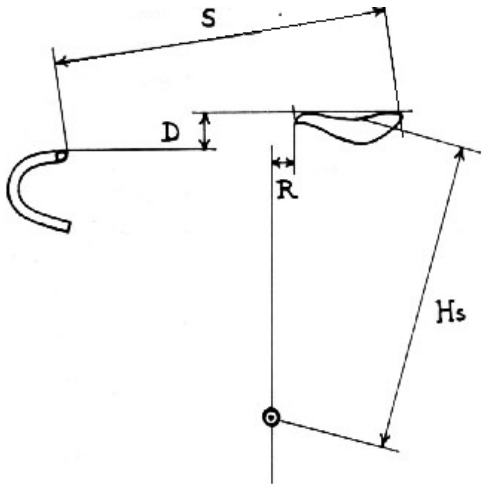


Figure : Position du cycliste. Report des réglages.

Longueur de manivelle (mm) :

Axe potence-arrière selle Cote AC (cm :mm) :

Axe pédalier-sommet centre selle Cote HS (cm :mm) :

Recul de selle Cote RS (cm :mm) :

Annexe II : Mesures anthropométriques

La composition corporelle correspond à l'analyse du corps humain en compartiments. Le concept de compartiments corporels associe des composants de l'organisme fonctionnellement liés. On peut alors étudier leur modification selon diverses situations physiologiques : pratique sportive intense et vieillissement chez le master athlète. L'étude de la composition corporelle permet de mesurer la masse grasse dont l'augmentation apparait comme une conséquence inéluctable du vieillissement ainsi que la masse maigre, déterminant majeur de la dépense énergétique, dont la diminution s'explique en partie par la perte de masse musculaire. En effet, la masse dite « non grasse » ou « maigre » de l'organisme correspond aux tissus constituant les parties fonctionnelles des organes (souvent vitaux) et aux muscles. La masse « non grasse » est caractérisée par des dépenses énergétiques élevées en comparaison au tissu adipeux (Gallagher et al. 1998). Diverses méthodes sont développées pour évaluer, selon le modèle de compartiment choisi. Pour notre étude, il était intéressant de cibler une augmentation de masse grasse et de surveiller l'épargne de la masse musculaire. L'analyse de la composition corporelle permet d'approfondir les connaissances en nutrition, physiologie et métabolisme. La mesure précise de la masse grasse par un outil simple, reproductible, fiable, peu coûteux et non invasif présente un intérêt majeur pour appréhender les effets du vieillissement chez le *Master* triathlète.

Mesure de l'indice de masse corporelle (IMC)

Par la mesure de la taille et du poids (Balance Terraillon, modèle nautic professional, certifiée Q.C. passed 35), les sujets ont été caractérisés par leur l'indice de masse. L'IMC est un outil simple d'évaluation de l'excès de masse grasse, mais on sait que la masse grasse peut varier de façon importante pour un même IMC.

Méthode d'évaluation de la composition corporelle

Modèle à 2 compartiments

Modèle à 2 compartiments oppose la masse grasse et le reste, la masse non grasse (abusivement nommée masse maigre). La masse grasse correspond aux triglycérides stockés dans les adipocytes, quelle que soit leur localisation anatomique; ce compartiment est virtuellement dépourvu d'eau. La masse maigre correspond à la somme de l'eau, des os, des

organes, en excluant la partie grasse. La masse maigre est essentiellement constituée d'eau. Le rapport entre l'eau et la masse maigre définit l'hydratation de la masse maigre.

Méthode de mesure des plis cutanés (quatre)

Les mesures des plis cutanés (méthode de prédiction) renseignent sur la masse grasse. L'évaluation de la composition corporelle des sujets a été effectuée par la mesure de 4 plis cutanés au moyen de la seule la pince de Harpenden ®. La pression entre les mâchoires de la pince est constante (10 g/mm). Ce matériel a fait l'objet d'étude de validation. Bien qu'onéreux, il reste le matériel de référence à adopter en l'absence de moyens spécialisés. Il ne nécessite par ailleurs aucune calibration secondaire ni entretien particulier. Les sites classiques de mesure des plis cutanés ont été établis par Durnin et Womersley (1974). La somme des quatre plis cutanés est introduite dans des équations prédictives, en fonction de l'âge et du sexe, afin d'estimer la densité corporelle. Les mesures sont réalisées par convention du côté dominant et ne prennent que quelques minutes. Il apparait nécessaire de rappeler toutes les précautions méthodologiques qui ont été prise afin de respecter de réaliser la meilleure estimation possible de la masse grasse. Les mesures ont été réalisées conformément aux recommandations publié par l'Institut régional du bien-être, de la médecine et du sport santé (IRBMS) et décrite dans le document intégral (Méthode de mesure des plis cutanés chez le sportif – www.irbms.com / www.medecinedusport.fr). De nombreux autres sites de plis cutanés sont décrits (abdominaux, membres inférieurs…), mais n'ont généralement pas été suffisamment validés. Elles ont été effectuées trois fois par la même personne selon les techniques et établies par le programme biologique international (Weiner et Lourie 1981). La moyenne de trois mesures était prise en compte pour la détermination de la moyenne du pli cutané mesuré.

Pli Bicipital

Pli vertical, situé à mi-distance entre l'insertion haute (tête humérale de l'épaule) et basse (pli du coude).

Pli Tricipital

Pli vertical sur la face postérieure du Triceps, bras entièrement détendu (éviter les rotations du membre).

A mi-distance entre l'insertion haute (Acromion de l'épaule) et basse (Olécrane du coude).

Pli Sous Scapulaire

Pli oblique vers le bas et le dehors, sur la face postérieure, le bras bien détendu. Le pli se situé juste sous la pointe de l'omoplate (1 cm).

Pli Supra iliaque

Pli oblique en bas et en dedans, situé juste au-dessus de la crête iliaque (2 cm), à son intersection avec la ligne axillaire antérieure.

Tableau8 : Mesure du pli Bicipital, Tricipital, Sous Scapulaire et Supra Iliaque (conformément à la méthode de mesure des plis cutanés chez le sportif – www.irbms.com / www.medecinedusport.fr).

Estimation de la densité corporelle

L'équation de Durnin et Womersley (1974) a été utilisée pour déterminer la densité corporelle des sujets. Elle est validée dans les deux sexes (Peterson et al. 2003), et en particulier sur la population de jeunes sportifs. Elle a fait l'objet de nombreuses études, et trouve une validation par rapport aux méthodes de référence (Zahariev et al. 2005). Une légère surestimation semble toutefois s'observer par rapport à la méthode hydrostatique (Garcia et al. 2006).

$$DC = C - (M * \log \sum 4 \text{ plis})$$

Les constantes C et M de l'équation de Durnin et Womersley (1974) dépendent de l'âge et du sexe du sujet (Tableau 9)

Tranches d'âge	Homme	Femme
17-19	1,1620 – 0,0630 (log S)	1,1549 – 0,0678 (log S)
20-29	1,1631 – 0,0632 (log S)	1,1599 – 0,0717 (log S)
30-39	1,1422 – 0,0544 (log S)	1,1423 – 0,0632 (log S)
40-49	1,1620 – 0,0700 (log S)	1,1333 – 0,0612 (log S)
> 50	1,1715 – 0,0779 (log S)	1,1339 – 0,0645 (log S)

Tableau 9 : Equations prédictives de la densité corporelle (DC) en fonction de l'âge et du sexe chez l'adulte d'après Durnin et Womersley (1974). S est la somme des 4 plis cutanés (bicipital, tricipital, sous-scapulaire, supra iliaque) exprimée en mm.

Cette équation semble donc particulièrement indiquée pour l'appréciation de la composition corporelle des sportifs, en raison de sa facilité de réalisation pratique, de sa reproductibilité, et de sa spécificité reconnue vis-à-vis des populations sportives. En pratique, l'une des causes fréquentes de surestimation de l'adiposité avec la formule de 4 plis, repose sur une erreur de détermination du pli Supra-iliaque (mesuré trop latéralement et/ou trop bas), et ne répondant pas à la localisation précédemment décrite.

Evaluation du pourcentage de masse grasse

L'hydro densitomètre a longtemps été considérée comme la référence à partir de laquelle les autres méthodes ont été validées. Cette méthode a fourni une grande partie de nos connaissances sur la composition corporelle. La densité corporelle correspond à la masse corporelle (le poids) divisée par le volume corporel. Si le poids est aisé à déterminer, la mesure du volume corporel est plus complexe.

Différentes équations, déterminées par Siri (1956), permettent à partir de la densité corporelle, de calculer la masse grasse en pourcentage du poids, et par différence, la masse maigre. L'équation de Siri (1961) a été utilisée pour déterminer le pourcentage de masse grasse des sujets.

$$\%\ de\ masse\ grasse = [(4{,}95 \div DC) - 4{,}5] * 100$$

Où DC représente la densité corporelle (en $kg.m^{-3}$).

Méthode d'évaluation de la composition de la jambe

Mesures anthropométriques jambe droite

Cinq circonférences de la jambe droite ont été mesurées à 90° de l'axe longitudinal (haut de la cuisse, milieu de la cuisse, sous la rotule, maximum du mollet et au-dessus de la cheville).

Les plis cutanés (pli demi-cuisse avant, pli demi cuisse arrière, pli mollet arrière et pli mollet latéral), la longueur du membre inférieur (de l'épine iliaque antéro supérieure à la malléole externe) ainsi que le diamètre inter condylien du genou ont été mesurés afin de déterminer le volume total du membre (Jones et Pearson 1969).

Volumes du membre inférieur droit

Le volume du membre inférieur droit est évalué selon la formule suivante (Jones et Pearson 1969) :

$$Volume_{Jambe} = \left[\sum C^2 * L\right] \div 62{,}8$$

Avec, $\sum C^2$ comme la somme du carré des cinq circonférences mesurées, et L la longueur.

Le volume de la masse grasse locale est estimé selon la formule suivante (Jones et Pearson 1969) :

$$Volume_{tissu\ adipeux} = \left[\sum C \div 5\right] * \left[\sum S \div 2n\right] \div L$$

Avec, $\sum C$ comme étant la somme des cinq circonférences, $\sum S$ comme étant la somme des quatre plis cutanés (pli demi cuisse avant, pli demi-cuisse arrière, pli mollet arrière et pli mollet latéral), n le nombre des plis cutanés et L la longueur de la jambe.

Le volume des os du membre inférieur est calculé à partir du diamètre inter condylien du genou selon (Shephard et al. 1988) :

$$Volume_{osseux} = \pi * R^2 * L$$

Avec R, le rayon de l'os, où $R = 0{,}235 * D$ et D et le diamètre inter condylien du genou.

Le volume musculaire était finalement calculé selon la formule (Jones et Pearson 1969).

$$Volume_{Musculaire} = Volume_{Jambe} - \left(Volume_{tissu\ adipeux} + Volume_{osseux}\right)$$

Publications Personnelles

Publications personnelles

Revues internationales impactées à comité de lecture

Bernard T, Sultana F, Lepers R, Hausswirth C, Brisswalter J. Age related decline in Olympic triathlon performance: effect of locomotion mode. Exp Aging Res. 2010;36(1):64-78.

Lepers R, Sultana F, Bernard T, Hausswirth C, Brisswalter J. Age-Related Changes in Triathlon Performances. Int J Sports Med 2009; 30: 1-6.

Sultana F, Chris R Abbiss CR, Bernard T, Louis J, Hausswirth C, Brisswalter J. Age-related changes in cardio-respiratory responses and muscular performance following an Olympic triathlon in well-trained triathletes. Eur J Appl Physiol. (sous presse).

Revues nationales à comité de lecture

Sultana F, Brisswalter J, Lepers R, Hausswirth C, Bernard T. Effet de l'âge et du sexe sur l'évolution des performances en triathlon olympique. Science & Sports 2008. 23(3-4) ; 130-135.

Louis J, Bieuzen F, Sultana F, Brisswalter J. Evolution des coordinations musculaires au cours du pédalage chez le sujet âgé régulièrement entraîné en endurance. Science & Sports (2009). 24 ; 160–165.

Article rédigé

Effet de l'âge sur le rendement énergétique du pédalage chez des cyclistes et triathlètes bien entrainés.

Frédéric Sultana
Laboratoire Handibio, Université du Sud Toulon-Var

Effet du vieillissement sur les facteurs de la performance en triathlon

Ce travail de thèse s'organise en trois parties l'observation de l'effet de l'avancée dans l'âge sur la performance en triathlon, l'étude du modèle du *Master* triathlète (i.e. > 40 ans) à travers les facteurs de la performance et la mesure de l'impact du vieillissement sur le rendement énergétique du pédalage. Le recrutement de *Masters* triathlètes entraînés a permis d'étudier rigoureusement l'impact du vieillissement sur les fonctions physiologiques impliquées dans la performance, tout en contrôlant les effets supplémentaires liés à l'adoption d'un mode de vie sédentaire. Sur une épreuve de triathlon et pour chaque mode de locomotion, le déclin de la performance a une forme exponentielle. Un déclin significatif sur triathlon distance olympique a été observé sur la performance totale à partir de 45 ans chez les *Masters* triathlètes hommes. Il est plus précoce chez les femmes. Il est plus prononcé sur *Ironman* que sur distance olympique. Comparé aux autres modes de locomotion, un moindre déclin des performances en cyclisme est observé. Avant et après un triathlon distance olympique, $\dot{V}O_{2max}$, vVO_{2max}, les vitesses aux seuils ventilatoires et l'efficience énergétique étaient significativement plus faibles chez les *Masters* triathlètes, mais le couple maximal volontaire était similaire pour les deux groupes. 24 heures après la course, une diminution significative et similaire pour les deux groupes a été observée pour $\dot{V}O_{2max}$ et vVO_{2max}. Il n'a pas été observé de différence sur le couple maximal isométrique ou sur l'efficience énergétique de la course à pied en sous maximal. Lors de l'épreuve de triathlon, il n'a pas été observé de différence d'intensité relative d'effort entre les deux groupes. Ces résultats indiquent que chez les sujets bien entraînés, l'intensité relative de l'effort sur l'ensemble d'un triathlon distance olympique et la fatigue 24 heures après la course semblent indépendant de l'âge. La dernière partie du travail expérimental consistait à mesurer l'impact du vieillissement sur le rendement énergétique du pédalage au sein d'une population de cyclistes et triathlètes tous bien entraînés sur une large tranche d'âge. Un déclin significatif a été caractérisé. Les hypothèses explicatives sont multifactorielles. Une relation entre l'efficience énergétique et la réduction de puissance ou la modification de la composition corporelle avec l'âge a été établie. D'autres hypothèses sont évoquées comme le remodelage du schéma d'activation musculaire et l'expertise du pédalage, les propriétés mécaniques du muscle ou la part du coût énergétique de la ventilation.

Mots clés : *Master* triathlète, vieillissement, performance, efficience, triathlon, locomotion

Effect of aging on the performance factors in triathlon

This thesis is organized in three parts closely related, in order to observe the effect of aging on performance in triathlon, to the study the master triathlete model (i.e. > 40 years) through the performance factors and to measure the impact of aging on the pedaling efficiency. The recruitment of master triathletes regularly trained in endurance allowed the study of ageing, by controlling the cofounding effects of a sedentary lifestyle or pathologies appearance, on physiological systems. The decline in triathlon performance follows the exponential model. In male subjects, performance loss does not appear before 45 years, whereas in female, it appears earlier. Age-related declines in performance were less pronounced for Olympic compared with the Ironman distance. There was a lesser age related decline in cycling performance compared with running and swimming performances. The second part of this thesis aimed to study the master triathlete model (maximal isometric torque and cardio-respiratory parameters) prior to and following an Olympic distance triathlon. Prior to the event $\dot{V}O_{2max}$, vVO_{2max}, speed at ventilatory thresholds and running economy were significantly lower in master athletes, but maximal voluntary torque was similar between groups. 24h following the race, a similar significant decrease in $\dot{V}O_{2max}$ and vVO_{2max}.was observed in both groups. No change was recorded in maximal voluntary torque or submaximal running economy following the event. The results indicate that for well trained subjects, the overall relative exercise intensity during an Olympic distance triathlon and the fatigue effects of the race 24h after seems to be independent to the age. The last part of the experimental work was to measure the impact of ageing on the pedaling efficiency in a population of cyclists and triathletes all well trained on a wide age range. A significant decline was characterized. Explanatory hypotheses are multifactorial. A relationship between energy efficiency and reduction of power or the modification of the body composition with age has been established. Other assumptions are evoked as the remodeling of the pattern of muscle activation and the expertise level of cycling, the mechanical properties of muscle or the share of the energy cost of ventilation.

Keywords: Master triathlete, aging, performance, efficiency, triathlon, locomotion