

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 appear 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 : Vieillesse ; Performance ; Sexe ; Triathlon

Keywords: Aging; Performance; Gender; Triathlon

* Auteur correspondant.

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

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 décennie 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,

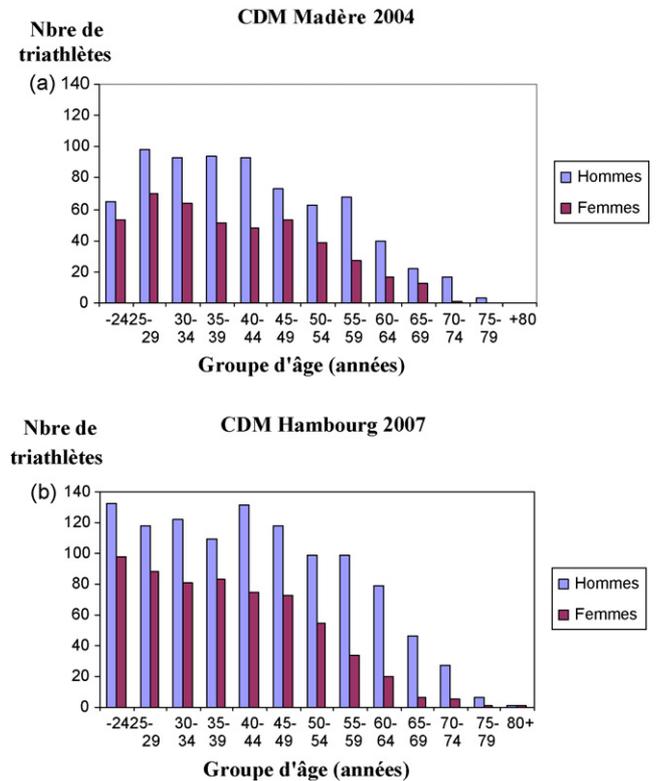


Fig. 1. (a et b) Participation en fonction des catégories d'âge au championnat du monde « groupe d'âge » à Madère 2004 (Fig. 1a) et à Hambourg 2007 (Fig. 1b).

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.

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

^aESS : *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

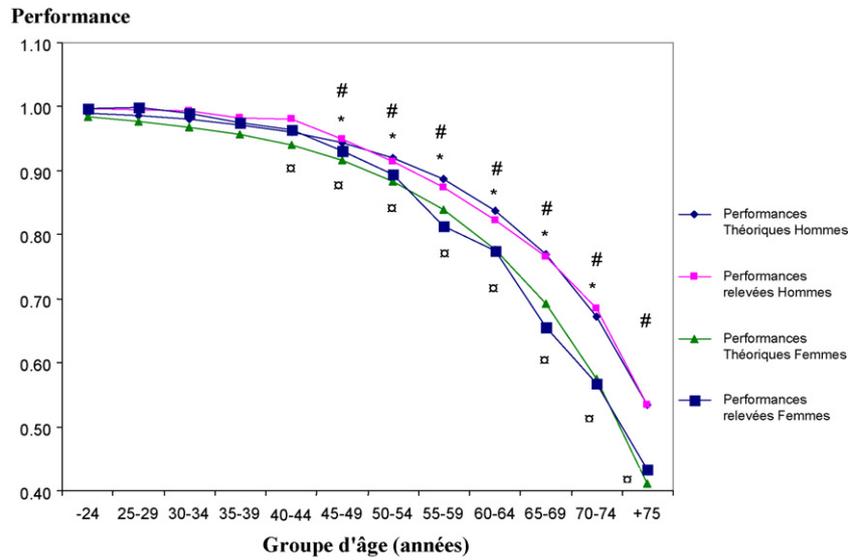
Les valeurs normalisées de performance en fonction de l'âge dans la population homme et femme sont présentées Tableau 2. Un effet significatif de l'âge sur la performance en triathlon est observé quel que soit le sexe (Fig. 2). Par ailleurs, un effet significatif d'interaction entre l'âge et le sexe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

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 décennie 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 décennie, 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 décennie chez les hommes et 12 % par décennie 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 décennie chez les hommes et chez les femmes de 45 à 70 ans [10,13,20,27,29], puis de 15 % par décennie 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 décennie est constatée pour une population sédentaire [27,29] alors que chez les hommes très entraînés, le déclin est de 5 à 7 % par décennie 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 $2,5 \text{ mM l}^{-1}$ 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, Rütter 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. Vieillesse, 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 Review: dynamic exercise 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, Murphy AJ, Pineau MJ. The effects of ageing on respiratory muscle function and performance in older adults. *J Sci Med Sport* 2007;10:36–44.