

Le déclin de la capacité des fonctions physiologiques avec l'âge : une étude longitudinale sur les pics de performance en natation

ANTHONY J. DONATO,¹ KATHLEEN TENCH,² DEBORAH H. GLUECK,²
DOUGLAS R. SEALS,^{1,3} IRATXE ESKURZA,¹ AND HIROFUMI TANAKA¹

¹Department of Kinesiology and Applied Physiology, University of Colorado at Boulder,
Boulder 80309; and Departments of ²Preventive Medicine and Biometrics, and

³Medicine, University of Colorado Health Sciences Center, Denver, Colorado 80262

Déposé le 16 mai 2002 ; dernière version en date du 14 octobre 2002

Donato, Anthony J., Kathleen Tench, Deborah H. Glueck, Douglas R. Seals, Iratxe Eskurza, et Hirofumi Tanaka.

Le déclin de la capacité des fonctions physiologiques avec le vieillissement : une étude longitudinale sur les pics de performance en natation.

J Appl Physiol 94 : 764-769, 2003. Première édition le 18 octobre 2002 ; 10.1152/jappphysiol.00438.2002.

—Nous avons suivi les performances en natation de 321 femmes et 319 hommes, qui ont participé aux championnats de natation des US Masters, pendant une période de 12 années. Tous ces nageurs étaient classés dans le Top Ten de leur groupe d'âge pendant 3 années (en moyenne 5 ans).

Un modèle de coefficients aléatoires par des mesures répétées a été utilisé pour obtenir une ligne de meilleur ajustement à partir d'un groupe de lignes de régression pour chaque sujet. Les deux performances du 50 m NL et du 1500 m NL diminuent modérément jusqu'à 70 ans, âge à partir duquel une diminution plus rapide est observée à la fois chez les hommes et les femmes.

En comparaison du 1500 m NL, les performances sur le 50 m NL diminuent plus faiblement et plus lentement avec l'âge. Le rythme et l'ampleur de la baisse de la performance en natation avec l'âge étaient plus élevés chez les femmes que chez les hommes sur le 50 m NL ; ces différences selon le sexe n'ont pas été observées sur le 1500 m NL. Dans l'ensemble, la variabilité le long d'une ligne de régression de la population a augmenté de façon marquée avec l'âge. Cette étude longitudinale présente les résultats suivants :

- 1) la performance de nage diminue progressivement jusqu'à 70 ans, âge à partir duquel la baisse devient quadratique ;
- 2) la baisse de performance liée à l'âge est plus importante sur une longue distance, que sur une distance de nage plus courte, suggérant une perte relativement plus faible de la puissance musculaire anaérobie avec l'âge, en comparaison avec l'endurance cardio-vasculaire ;
- 3) un déclin lié à l'âge plus important chez les femmes que chez les hommes est constaté uniquement sur des courtes distance de nage ;
- 4) la variabilité de la baisse de performance liée à l'âge augmente nettement lorsque le vieillissement est prononcé.

Performance de l'exercice et capacité de travail physique

CAPACITÉ PHYSIOLOGIQUE FONCTIONNELLE La CPF (PFC en anglais) se définit comme la capacité à exécuter les tâches physiques de la vie quotidienne et comme la facilité avec laquelle ces tâches peuvent être effectuées ; elle est connue pour diminuer avec l'âge, même chez les adultes en bonne santé (2, 15, 22, 31, 40). Cela peut éventuellement entraîner une augmentation de l'incidence de la morbidité et de la mortalité, ainsi que l'utilisation accrue des services de soins de santé, la perte d'autonomie, et a une incidence sur la qualité de vie (1). En outre, la baisse de CPF peut devenir une menace sérieuse pour les personnes exerçant une profession exigeante physiquement, car les exigences physiques du travail quotidien ne changent pas normalement avec l'âge (42). Cette diminution de CPF peut obliger les travailleurs vieillissants à se rapprocher de leur capacité maximale et peut conduire à un stress important, une fatigue chronique et des problèmes de santé (42).

L'évolution démographique de la population vieillissante des États-Unis se traduira par un nombre croissant de personnes âgées confrontées à des conséquences négatives d'une diminution de la CPF liée à l'âge.

Ainsi, la compréhension du rythme et de l'ampleur de la baisse de la CPF liée à l'âge et des facteurs y contribuant est d'une importance essentielle.

Une façon d'évaluer la CPF chez l'homme est de repérer les changements liés à l'âge dans la réalisation de performances sportives chez les athlètes de haut niveau (6, 39, 40). Le principal avantage expérimental de cette approche réside dans le fait que les facteurs perturbants des niveaux d'activité physique, la composition du corps ou les maladies dégénératives liées à l'âge sont soit absents, soit nettement réduits chez les athlètes hautement entraînés en comparaison avec leurs pairs sédentaires.

Dans ce contexte, l'analyse des performances en natation offre un certain nombre d'avantages pour l'étude du vieillissement et de la CPF. La natation est une activité qui ne fait pas supporter de charge et, par conséquent, a une incidence relativement faible de blessures orthopédiques, même chez les personnes âgées (20, 21). En outre, contrairement à d'autres événements sportifs dans lesquels les participants de sexe masculin sont plus nombreux que leurs homologues féminins, les épreuves de natation attirent un nombre similaire de participants

masculins et féminins chez les adultes.[base de données de l'US Masters Swimming (USMS), Fédération de natation des États-Unis]. Ceci élimine l'influence de ce facteur potentiel d'erreur « sociologique » dans l'interprétation des comparaisons selon le sexe (genre).

Dans notre précédente étude transversale, trois observations essentielles (40) ont pu être établies :

- 1) La CPF, comme l'étude de performance de haut niveau en natation l'établit, décroît de façon linéaire jusqu'à 70-80 ans, âge à partir duquel le déclin s'accélère de façon exponentielle ;
- 2) le taux et l'ampleur des baisses liées à l'âge dans les deux types de performances courte ou longue distance sont plus importants chez les femmes que chez les hommes ;
- 3) ces différences liées au sexe dans la baisse de la performance de nage avec l'âge sont plus grandes dans les épreuves de courte durée (40).

Cependant, en prenant en compte les limites inhérentes aux comparaisons transversales, nous avons pensé qu'une confirmation de ces observations était nécessaire en se basant sur les conclusions d'une étude longitudinale.

En conséquence, la présente étude a pour but principal de déterminer les effets respectifs et interactifs de l'âge et du sexe sur les performances de natation. En se servant de la base de données de l'USMS Championships, nous avons pu identifier et analyser les performances de 640 nageurs de haut niveau sur une période de 12 années. La baisse de la CPF accompagnant le vieillissement est attribuable à des baisses simultanées des fonctions cardiovasculaires, respiratoires, métaboliques, et neuromusculaires (6, 15, 40). Par conséquent, cette approche utilisant les performances de natation de haut niveau nous permet de mesurer les conséquences du vieillissement (à partir des performances enregistrées) sur le plan de la puissance musculaire, l'endurance musculaire et/ou la capacité aérobie.

MÉTHODES

Analyse des performances de natation.

Les chronos de nage libre ont été recueillis par l'USMS Championships sur une période de 12 ans entre 1988 et 1999 (base de données de l'USMS). Tous les nageurs présents dans la base de données figuraient dans le Top 10 de leur catégorie d'âge, soit pour le 50 NL ou le 1500 NL pendant la période concernée (moyenne sur 5 ans). L'âge des nageurs figurant dans la base de données se situait entre 19 et 85 ans. De la même façon que pour notre étude précédente (40), ce sont les compétitions de nage libre (NL) qui ont été retenues, car il s'agit des épreuves les plus rapides, attirant le plus grand nombre de participants et qui ont connu le moins de changements au niveau des règles et techniques ces dernières années.

Des recherches manuelles détaillées ont été entreprises pour localiser autant de nageurs que possible, qui ont concouru aux mêmes épreuves sur plus de 3 années (Tableau 1). Au final, nous avons identifié et examiné les chronos personnels de 640 individus (321 femmes, 319 hommes). Nous avons recueilli également des informations sur les records du monde masculins et féminins sur le 50 NL et le 1500 NL pour l'année 2001. Cela nous a permis de calculer la part du déclin lié au vieillissement intervenant dans une performance ayant permis d'obtenir un nouveau record du monde.

Statistiques

Pour déterminer les changements longitudinaux liés à l'âge lors d'un chrono de natation, un modèle de coefficients aléatoires avec mesures répétées a été utilisé pour obtenir une ligne de meilleur ajustement à partir d'un groupe de courbes de régression pour chaque sujet. (17). Nous avons ajusté une courbe de régression de la population pour chaque événement en utilisant un modèle mixte de coefficients aléatoires par des mesures répétées avec le chrono de natation (en minutes) ainsi que les variables de sortie (17). Le modèle mixte comprend à la fois des effets fixes et des effets aléatoires.

La composante fixe décrit la relation entre le temps de nage et l'âge de la population, tandis que les effets aléatoires correspondent à la variabilité des sujets autour de la ligne de population.

Nous avons ajusté des modèles séparés pour estimer les chronos de natation pour les 1500 NL et les 50 NL. Pour chaque performance de natation, nous avons pris en compte le sexe comme élément distinctif pour les chronos et l'âge, en ajustant deux lignes avec ordonnées séparées, pentes, termes quadratiques et paramètres quadratiques supplémentaires pour les sujets âgés de plus de 70 ans, considérés comme des effets fixes.

Plusieurs facteurs sont à l'origine de l'introduction de termes quadratiques et de termes quadratiques spécifiques

aux plus de 70 ans. Dans les deux cas, les premières indications issues des données brutes indiquent une légère baisse des chronos entre 19 et 30 ans, suivie d'une augmentation progressive (des chronos) jusqu'à l'âge de 70 ans, et une accélération prononcée à la fois au niveau des temps et de la variabilité après 70 ans. Si nous nous étions contentés d'un modèle de régression linéaire (par exemple un modèle avec seulement une ordonnée et une pente), la ligne de régression décrirait une relation où les modifications des performances ne varieraient pas selon l'âge.

Le terme quadratique nous permet d'ajuster un modèle dans lequel les chronos diminuent d'abord et ensuite augmentent. Le terme quadratique relatif aux plus de 70 ans nous permet même de modéliser un taux de déclin plus rapide après l'âge de 70 ans. Comme effets aléatoires, nous prenons en compte une ordonnée, une pente, un terme quadratique et un terme additionnel quadratique pour les plus de 70 ans, pour chaque sexe. Nous avons utilisé, un processus inversé par étapes, afin de modéliser les effets aléatoires et ensuite les effets fixes. Nous avons comparé le modèle décrit ci-dessus avec un modèle similaire, qui excluait

les termes quadratiques après 70 ans. Nous avons comparé la probabilité de 2 log correspondant aux deux modèles avons remarqué que le modèle le plus complexe était plus intéressant.

De la même façon, nous avons comparé notre modèle d'origine avec un modèle excluant les termes quadratiques, un modèle excluant les termes de pente et un modèle excluant les termes d'ordonnées d'origine (intercept). Si aucune différence significative n'existe entre deux modèles, nous sélectionnons le modèle comportant le moins de paramètres. Nous avons utilisé des contrastes linéaires pour tester les différences entre les sexes dans la performance de nage dans le temps et le taux d'augmentation.

Pour tous les tests, nous avons utilisé une valeur- $p < 0,05$ pour le niveau de signification statistique (probabilité d'obtenir la même valeur).

RÉSULTATS

Le schéma 1 illustre les performances sur le 1500 NL en corrélation avec le vieillissement. Les chronos sur les longues distances augmentent (la performance décroît) de manière curvilinéaire selon l'âge et cela pour les deux sexes. Les chronos correspondant à des performances de haut niveau se maintiennent jusqu'à l'âge de 35 ans. Ensuite les chronos augmentent progressivement jusqu'à l'âge de 70 ans. Par la suite, les temps augmentent de façon considérable, ce qui se caractérise par une forte quadratique ($p < 0,0001$).

Les taux de changements liés à l'âge ne diffèrent pas entre les hommes et les femmes sur le 1500 NL.

Cependant, on a pu constater un chevauchement considérable entre les hommes et les femmes dans la tranche d'âge où les lignes de régression individuelles ont été tracées (Fig. 1B). Pour les deux sexes, la variabilité associée aux chronos de natation augmente de façon significative avec le vieillissement ($p < 0,0001$).

Les évolutions des chronos sur le 50 NL sont décrits sur le schéma 2. Comme pour le 1500 NL, les chronos sur courte distance augmentent de façon curvilinéaire pour les hommes comme pour les femmes. Toutefois, si l'on se réfère aux chronos enregistrés sur le 1500 NL, on peut constater des légères augmentations globales des chronos ($p < 0,0001$). Les augmentations des chronos sur 50 NL sont faibles jusqu'à 70 ans ; par la suite des augmentations sensiblement plus fortes ont pu être observées pour les deux sexes ($p < 0,0001$).

Le taux moyen d'augmentation sur les chronos de 50 NL était bien plus important chez les femmes, que chez les hommes ($p < 0,0001$). Il n'y avait pas ou peu de chevauchement entre les hommes et les femmes à n'importe quel âge sur les temps du 50 NL (Fig 2B). La variabilité inter-individuelle a également augmenté avec l'âge dans le cas du 50 NL ($p < 0,0001$).

Le schéma 3 affiche le taux instantané de variation dans les performances de natation en relation avec les chronos des records du monde actuels. Dans l'ensemble, les chronos de natation augmentent progressivement jusqu'à 70 ans, pour ensuite croître de façon bien plus conséquente. Jusqu'à l'âge de 70 ans, le taux et l'ampleur de l'augmentation des chronos étaient supérieurs sur le 1500 NL (6-12% de variation en pourcentage du chrono correspondant à une performance de natation sur un intervalle de temps fixe) que sur le 50 NL (3-8%) pour les hommes et les femmes ($p < 0,0001$). Sur le 50 NL, l'augmentation du temps était plus importante chez les femmes (15-16%) que chez les hommes (13-14%) après 70 ans ($p < 0,0001$). Sur le 1500 NL, aucune différence liée au sexe n'a été décelée.

DISCUSSION

Les résultats les plus marquants de cette étude longitudinale sont les suivants :

Premièrement, le modèle le mieux adapté a montré que la baisse de performance de natation (augmentation du temps) intervient progressivement jusqu'à 70 ans, âge à partir duquel la baisse devient quadratique.

Deuxièmement, les taux de décroissance de performances de nage en lien avec le vieillissement sont plus importants sur les longues distances que sur les courtes distances.

Troisièmement, par rapport à leurs homologues masculins, les nageuses constatent des baisses plus marquées sur les épreuves de sprint, que sur les épreuves d'endurance.

Quatrièmement, la variabilité de la baisse de performance liée à l'âge augmente nettement lorsque l'on atteint un âge avancé que ce soit sur des épreuves de courte ou longue distance.

Les résultats actuels, qui se basent sur un concept d'étude longitudinale démontrent que

1) la réduction liée à l'âge en ce qui concerne la CPF est biphasique avec un déclin accéléré autour de 70 ans, et

2) le sexe et la durée de l'épreuve interagissent pour déterminer les baisses de CPF liée à l'âge comme le démontrent les performances de natation.

Depuis que le lauréat du prix Nobel A.V. Hill a utilisé des données issues des records mondiaux d'athlétisme dans l'optique d'une meilleure appréhension de la performance physique de haut niveau et de la capacité fonctionnelle chez l'homme dans les années 20 (10), un certain nombre de chercheurs ont étudié les conséquences du vieillissement sur la CPF de l'être humain.

Les sportifs des catégories masters constituent un modèle expérimental efficace car les changements observés au cours des années reflètent essentiellement les résultats du vieillissement physiologique. Dans la présente étude, la CPF calculée d'après la performance de nage, a diminué en lien avec le vieillissement des nageurs de façon curvilinéaire suivant grosso modo deux taux différenciés chez les hommes et les femmes. Plus précisément, la performance de natation a diminué progressivement jusqu'à 70 ans, âge à partir duquel le déclin s'accélère nettement.

On ne sait pas expliquer pourquoi la CPF connaît un déclin accéléré après l'âge de 70 ans. Nos résultats, cependant, sont cohérents avec des études antérieures menées dans le domaine de la capacité fonctionnelle et le vieillissement.

Par exemple, on constate que, dans le cas de randonneurs de loisirs, la vitesse de marche diminue relativement peu jusqu'à l'âge de 60-70 ans, mais ensuite la baisse peut être brutale (11).

En outre, la force musculaire, évaluée par la capacité d'haltérophilie olympique, diminue linéairement jusqu'à environ 70 ans, après quoi les taux augmentent de façon significative (24). Ainsi, il peut être tentant d'avancer que des changements fondamentaux dans les processus biologiques du vieillissement se produisent autour de l'âge de 70 ans, comme cela a déjà été suggéré par Joyner (15).

Une explication pourrait également venir du fait qu'il s'agit d'un âge où se produisent des changements dits « bio-comportementaux » (par exemple, la baisse de la motivation pour continuer à s'entraîner à des niveaux élevés). Il est à noter que la réduction de l'activité spontanée, en lien avec le vieillissement, représente l'un des changements de type bio-comportemental liés à l'âge. Il s'agit d'une caractéristique commune à de nombreuses espèces animales différentes, car ces changements ont été observés chez les insectes (35), les rongeurs (13), et les humains (8, 12, 29).

De précédentes études transversales comparant des performances sur des exercices de courte et longue durées ont abouti à des résultats contradictoires concernant l'influence de l'âge sur les performances physiques de pointe. Une durée d'exercice plus courte a été associée à une baisse plus importante (25) ou plus faible (37, 40) des performances à un âge avancé.

Nous croyons que les résultats de la présente étude, qui utilise des échantillons d'études longitudinales, donnent davantage de certitude sur cette question. Nous avons constaté que le déclin de la performance de nage était plus important sur une longue distance que sur une courte distance. Nous n'avons pu que spéculer pour expliquer pourquoi la durée de l'effort influe sur le taux de diminution de la CPF.

L'explication la plus probable est que les déterminants physiologiques respectifs des performances de courte et de longue durée baisse différemment avec le vieillissement. La puissance anaérobie des muscles du haut du corps est un déterminant principal du sprint ou du 50 m NL (33, 38), tandis que la consommation maximale d'oxygène contribue de façon importante à la réussite d'une épreuve d'endurance comme le 1500 m NL (7, 19). Dans ce contexte, les résultats de plusieurs études transversales indiquent que la puissance musculaire maximale présente un taux nettement moins rapide de déclin avec l'âge que la capacité aérobie maximale (2, 9, 18). En outre, la fonction musculaire volontaire semble diminuer moins rapidement dans les membres supérieurs en comparaison des membres inférieurs

(9, 23). Ainsi, le ralentissement du taux de déclin de la performance de natation de sprint peut être attribué à un rythme moins rapide de la baisse du pouvoir anaérobie des muscles du haut du corps.

Dans cette présente enquête, et contrairement à notre étude transversale précédente (40), les différences entre hommes et femmes dans le cadre de la baisse de performance suite au vieillissement, apparaissent évidentes seulement dans les événements de courte durée. Il est possible qu'une plus grande baisse de l'intensité et / ou du volume des entraînements en lien avec le vieillissement, se produise davantage chez les femmes que chez les hommes participant à des épreuves de sprint. Mais ce n'est pas vrai pour celles participant à des épreuves d'endurance. Il est possible que les déclins liés au le vieillissement dans les déterminants physiologiques d'épreuve sprint ou d'épreuve d'endurance peuvent se produire à des taux différents chez les hommes et les femmes. À cet égard, il convient de noter que les taux (en %) de déclin de la consommation maximale d'oxygène (correspondant à un déterminant majeur de la performance de la nage d'endurance) sont similaires entre les hommes et les femmes (12).

Les femmes semblent constater une réduction plus importante au niveau de la force musculaire et de la puissance (soit un facteur déterminant de la performance de sprint), en particulier dans les membres supérieurs, par rapport aux hommes (28, 30, 34).

Les plus grandes diminutions de la force musculaire chez les femmes semblent être dues à une plus grande réduction de la force maximale volontaire par surface de section transversale (28).

La variabilité de la baisse de performance liée à l'âge augmente nettement lorsque l'on atteint un âge avancé que ce soit sur des épreuves de courte ou longue distance.

Une telle variabilité a déjà été constatée pour des expressions particulières de la fonction physique dans la population générale des adultes en bonne santé (14, 26). Les résultats de la présente enquête étendent ces observations aux athlètes hautement entraînés qualifiés et suggèrent que, même au sein d'une population physiquement d'élite d'êtres humains en bonne santé, il peut y avoir des différents niveaux marqués de vieillissement « réussis » (32), si l'on se fie à la CPF.

Les effets du vieillissement sur la CPF de l'homme ont été examinés en utilisant des approches transversales et longitudinales. Les deux modèles d'étude ont des limites inhérentes, et méthodologiques pouvant influencer sur l'indépendance de la CPF par rapport au processus de vieillissement en soi. Par exemple, des comparaisons transversales sont influencées par des facteurs génétiques et constitutionnels (par exemple, la différence de cohorte), alors que des modèles longitudinaux peuvent être biaisés par l'effet de la pratique / répétition et l'évolution des facteurs de style de vie au sein des sujets individuels (par exemple, la réduction du volume de l'entraînement en raison d'une blessure, d'une augmentation du poids corporel en raison de changements alimentaires, etc.) (3).

Nous avons considéré que nos approches complémentaires utilisant à la fois des approches transversales (40) et longitudinales (étude en cours) permettraient de réduire autant que possible ces limites respectives. Bien que

nous sommes incapables de comparer quantitativement les résultats actuels avec les résultats précédents en raison de l'utilisation de différentes techniques statistiques, les résultats de cette étude longitudinale sont généralement et qualitativement compatibles avec les résultats d'enquêtes sur les interactions entre l'âge et le sexe sur la CPF.

Comme nous l'avons démontré ici, il est tentant de supposer que des études transversales bien menées, qui sont plus faciles à réaliser, peuvent produire des résultats similaires en qualité à défaut de quantité, à ceux d'études longitudinales, quand la relation entre l'âge et la CPF est prise en compte. Il est tentant de supposer que les principaux déterminants de CPF sur une courte ou une longue durée (force musculaire et consommation maximale d'oxygène) montrent également des taux similaires de baisse avec l'âge, s'ils sont examinés de façon transversale ou de façon longitudinale (8, 16, 24).

En raison du rôle majeur que l'exercice régulier joue dans la détermination de la CPF (par exemple, la consommation maximale d'oxygène), il est tentant de spéculer que le taux de déclin de la performance de natation avec l'âge peut refléter la diminution du volume global d'entraînement. Bien que le manque de données complètes nous empêche de tirer des conclusions définitives, il peut être intéressant de comparer les données des performances en matière de course à pied et de natation.

Les données empiriques suggèrent que le volume d'entraînement des nageurs masters plus âgés est considérablement plus bas que ceux des masters plus jeunes (36), alors que bon nombre des meilleurs coureurs vétérans continuent à s'entraîner à un niveau soutenu au moins jusqu'à la cinquantaine (27). Contrairement à cette tendance, nous avons précédemment constaté que l'ampleur de la réduction globale de la performance de natation avec l'âge est inférieure à celle observée en course à pied (39, 40). Ainsi, les informations sur le volume d'entraînement ne semblent pas expliquer la baisse liée à l'âge de la CPF. Une explication plus plausible pour la moindre baisse liée à l'âge en natation par comparaison avec les performances en course à pied pourrait correspondre à une plus grande dépendance à la technique biomécanique en natation ; comme en témoigne la forte corrélation entre la performance de nage libre et de la distance par mouvement de bras (5). Une observation intéressante a été faite dans une étude de cas d'un nageur qui a obtenu ses meilleurs temps de nage libre à 50 ans bien qu'il était déjà un nageur universitaire accompli (4, 41).

En conclusion, les résultats actuels longitudinaux soutiennent l'hypothèse que le sexe et la durée de l'effort représentent au moins deux facteurs importants qui affectent sélectivement la CPF au cours du vieillissement d'adultes en bonne santé. Nos résultats confirment également qu'une réduction accélérée de la CPF après 70 ans existe chez les hommes et les femmes.

Enfin, la variabilité interindividuelle de CPF augmente nettement avec l'âge, compatible avec différents taux de vieillissement chez les individus dans les déterminants physiologiques primaires de la CPF.

Nous remercions Walt Reid, Président de l'USMS Records / Tabulation.

Cette étude a été financée en partie par l'Institut national sur le vieillissement Prix AG-00847 et AG-13038.

REFERENCES

1. **American Heart Association.** *Heart and Stroke: Statistical Update*. Dallas, TX: Am. Heart Association, 2000.
2. **Buskirk ER and Hodgson JL.** Age and aerobic power: the rate of change in men and women. *Fed Proc* 46: 1824-1829, 1987.
3. **Costa PT and McCrae RR.** Design and analysis of aging studies. In: *Handbook of Physiology. Aging*. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc., 1995, sect. 11, chapt. 2, p. 25-36.
4. **Costill DL.** *Inside Running: Basics of Sports Physiology*. Indianapolis, IN: Benchmark, 1986.
5. **Craig AB and Pendergast DR.** Relationship of stroke rate, distance per stroke, and variation in competitive swimming. *Med Sci Sports Exerc* 11: 278-283, 1979.
6. **Dempsey JA and Seals DR.** Aging, exercise, and cardiopulmonary function. In: *Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine: Volume 8 Exercise in Older Adults*, edited by Lamb DR, Gisolfi CV, and Nadel E. Carmel, IN: Cooper Publishing, 1995, p. 237-304.
7. **Eriksson BO, Holmer I, and Lundin A.** Physiological effects of training in elite swimmers. In: *Swimming Medicine IV*, edited by Eriksson BO and Furberg B. Baltimore, MD: University Park Press, 1978, p. 177-187.
8. **Eskurza I, Donato AJ, Moreau KL, Seals DR, and Tanaka H.** Changes in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained women: 7-yr follow-up. *J Appl Physiol* 92: 2303-2308, 2002.
9. **Grimby G and Saltin B.** The aging muscle. *Clin Physiol* 3: 209-218, 1983.
10. **Hill AV.** The physiological basis of athletic records. *Lancet* 209: 483-486, 1925.
11. **Himann JE, Cunningham DA, Rechnitzer PA, and Paterson DH.** Age-related changes in speed of walking. *Med Sci Sports Exerc* 20: 161-166, 1988.
12. **Holloszy JO and Kohrt WM.** Exercise. In: *Handbook of Physiology*.

- Aging*. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc., 1995, sect. 11, chapt. 24, p. 633–666.
13. **Holloszy JO, Smith EK, Vining M, and Adams S.** Effect of voluntary exercise on longevity of rats. *J Appl Physiol* 59: 826–831, 1985.
 14. **Hultsch DF, MacDonald SW, and Dixon RA.** Variability in reaction time performance of younger and older adults. *J Gerontol Psychol B Sci Soc Sci* 57: P101–P115, 2002.
 15. **Joyner MJ.** Physiological limiting factors and distance running: influence of gender and age on record performances. *Exerc Sport Sci Rev* 21: 103–133, 1993.
 16. **Kallman DA, Plato CC, and Tobin JD.** The role of muscle loss in the age-related decline of grip strength: cross-sectional and longitudinal perspectives. *J Gerontol* 45: M82–M88, 1990.
 17. **Laird NM and Ware JH.** Random-effects models for longitudinal data. *Biometrics* 38: 963–974, 1982.
 18. **Larsson L, Grimby G, and Karlsson J.** Muscle strength and speed of movement in relation to age and muscle morphology. *J Appl Physiol* 46: 451–456, 1979.
 19. **Lavoie JM and Montpetit RR.** Applied physiology of swimming. *Sports Med* 3: 165–189, 1986.
 20. **Levy CM, Kolin E, and Berson BL.** Cross training: risk or benefit? An evaluation of injuries in four athlete populations. *Sports Med* 3: 1–8, 1986.
 21. **Levy CM, Kolin E, and Berson BL.** The effect of cross training on injury incidence, duration, and severity (part 2). *Sports Med* 3: 1–8, 1986.
 22. **Martin JC, Farrar RP, Wagner BM, and Spirduso WW.** Maximal power across the lifespan. *J Gerontol* 55: M311–M316, 2000.
 23. **McDonagh MJN, White MJ, and Davies CTM.** Different effects of ageing on the mechanical properties of human arm and leg muscles. *Gerontology* 30: 49–54, 1984.
 24. **Meltzer DE.** Age dependence of Olympic weightlifting ability. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1053–1067, 1994.
 25. **Moore DH.** A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature* 253: 264–265, 1975.
 26. **Narici MV, Bordini M, and Cerretelli P.** Effect of aging on human adductor pollicis muscle function. *J Appl Physiol* 71: 1277–1281, 1991.
 27. **Ogawa T, Spina RJ, Martin WH, Kohrt WM, Schechtman KB, Holloszy JO, and Ehsani AA.** Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation* 86: 494–503, 1992.
 28. **Phillips SK, Rook KM, Siddle NC, Bruce SA, and Woledge RC.** Muscle weakness in women occurs at an earlier age than in men, but strength is preserved by hormone replacement therapy. *Clin Sci (Lond)* 84: 95–98, 1993.
 29. **Pollock ML, Mengelkoch LJ, Graves JE, Lowenthal DT, Limacher MC, Foster C, and Wilmore JH.** Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. *J Appl Physiol* 82: 1508–1516, 1997.
 30. **Porter MM, Vandervoort AA, and Lexell J.** Aging of human muscle: structure, function, and adaptability. *Scand J Med Sci Sports* 5: 129–142, 1995.
 31. **Rogers MA and Evans WJ.** Changes in skeletal muscle with aging: effects of exercise training. *Exerc Sport Sci Rev* 21: 65–102, 1993.
 32. **Rowe JW and Kahn RL.** Human aging: usual and successful. *Science* 237: 143–149, 1987.
 33. **Sharp RL, Troup JP, and Costill DL.** Relationship between power and freestyle swimming. *Med Sci Sports Exerc* 14: 53–56, 1982.
 34. **Skelton DA, Greig CA, Davies JM, and Young A.** Strength, power and related functional ability of healthy people aged 65–89 years. *Age Ageing* 23: 371–377, 1994.
 35. **Sohal RS and Buchan PB.** Relationship between physical activity and life span in the adult housefly, *Musca domestica*. *Exp Gerontol* 16: 157–162, 1981.
 36. **Stocker D, Pink M, and Jobe FW.** Comparison of shoulder injury in collegiate and master level swimmers. In: *Biomechanics and Medicine in Swimming VII*, edited by Troup JP, Hollander AP, Strasse D, Trappe SW, Cappaert JM, and Trappe TA. London: E&FN Spon, 1996, p. 90–95.
 37. **Stones MJ and Kozma A.** Adult age trends in athletic performance. *Exp Aging Res* 7: 269–280, 1981.
 38. **Tanaka H, Costill DL, Thomas R, Fink WJ, and Widrick JJ.** Dry-land resistance training for competitive swimming. *Med Sci Sports Exerc* 25: 952–959, 1993.
 39. **Tanaka H and Higuchi M.** Age, exercise performance, and physiological functional capacities. *Adv Exerc Sports Physiol* 4: 51–56, 1998.
 40. **Tanaka H and Seals DR.** Age and gender interactions in

physiological functional capacity: insight from swimming performance.
J Appl Physiol 82: 846–851, 1997.

41. **Wilmore JH and Costill DL.** *Training for Sport and Activity: Third Edition.* Dubuque, IA: William C. Brown, 1988.

42. **World Health Organization Study Group.** *Aging and Working Capacity.* Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1993

Tableau 1. Nombre de nageurs divisé en années de participation aux compétitions de natation masters

| Nombre D'années | Nombre de femmes | | Nombre d'hommes | |
|-----------------|------------------|------------|-----------------|------------|
| | 50 m | 1,500 m | 50 m | 1,500 m |
| 3 | 60 | 50 | 61 | 60 |
| 4 | 23 | 35 | 30 | 23 |
| 5 | 21 | 19 | 23 | 29 |
| 6 | 17 | 11 | 13 | 14 |
| 7 | 13 | 12 | 12 | 17 |
| 8 | 7 | 8 | 13 | 4 |
| 9 | 10 | 5 | 3 | 5 |
| 10 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| 11 | 7 | 4 | 3 | 1 |
| 12 | 5 | 5 | 2 | 0 |
| Total | 168 | 153 | 164 | 155 |

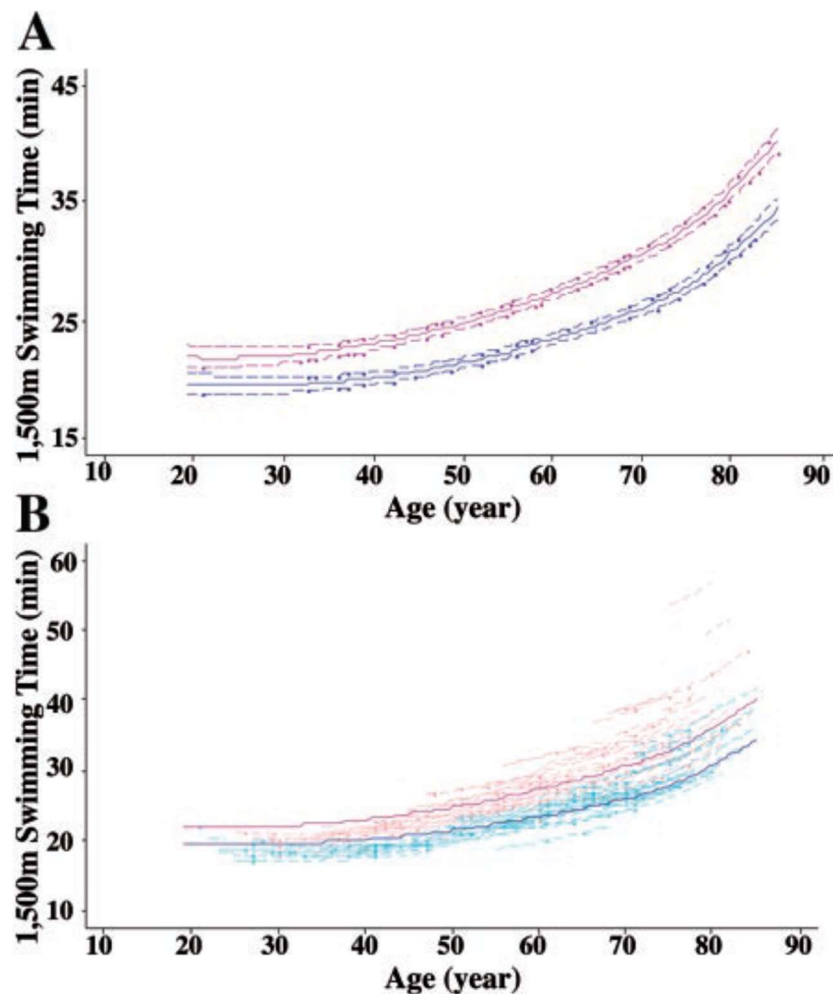


Fig. 1. Les performances enregistrées aux US Masters de natation sur le 1500 m NL selon l'âge. A : moyenne (population) de la ligne quadratique et des intervalles de confiance à 95%. B : ligne quadratique moyenne et lignes de régression individuelles. En rose, les performances féminines ; en bleu, les performances masculines.

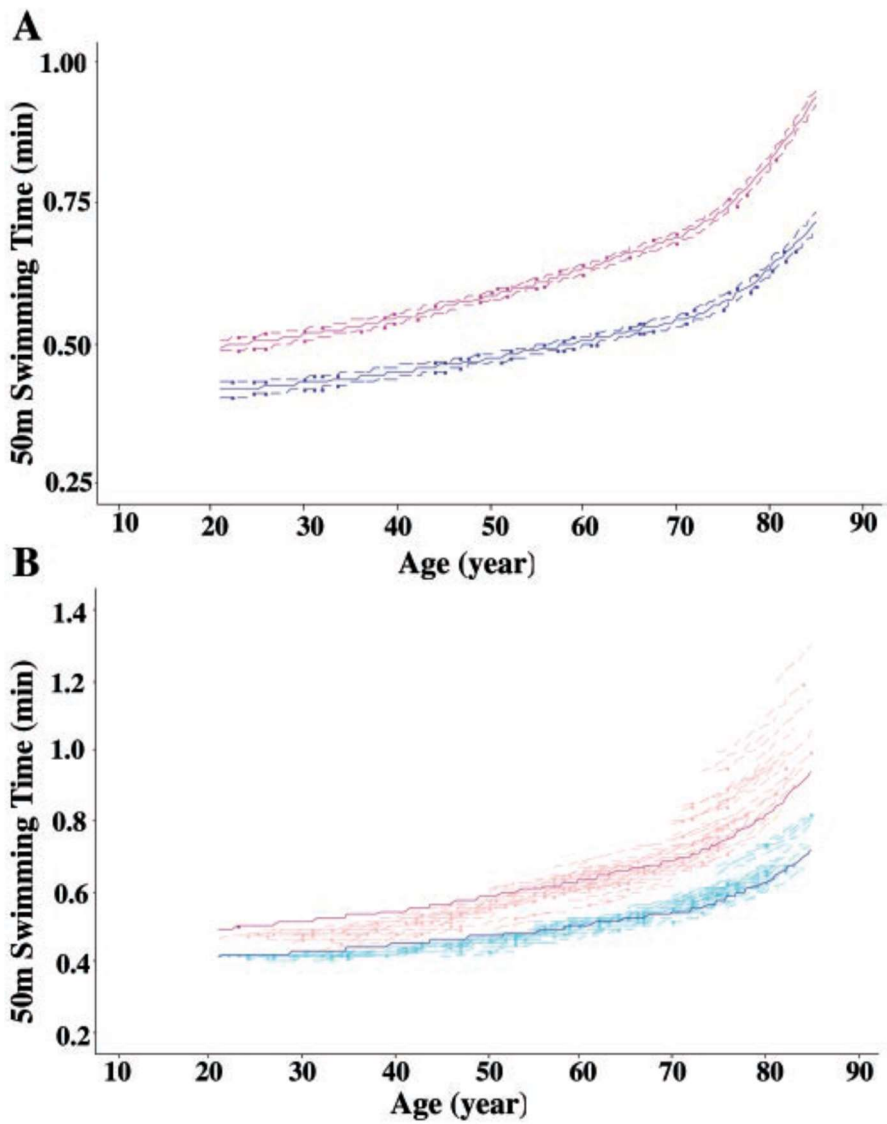


Fig. 2. Les performances enregistrées aux US Masters de natation sur le 50 m NL selon l'âge. A : moyenne (population) de la ligne quadratique et des intervalles de confiance à 95%. B : ligne quadratique moyenne et lignes de régression individuelles. En rose, les performances féminines ; en bleu, les performances masculines

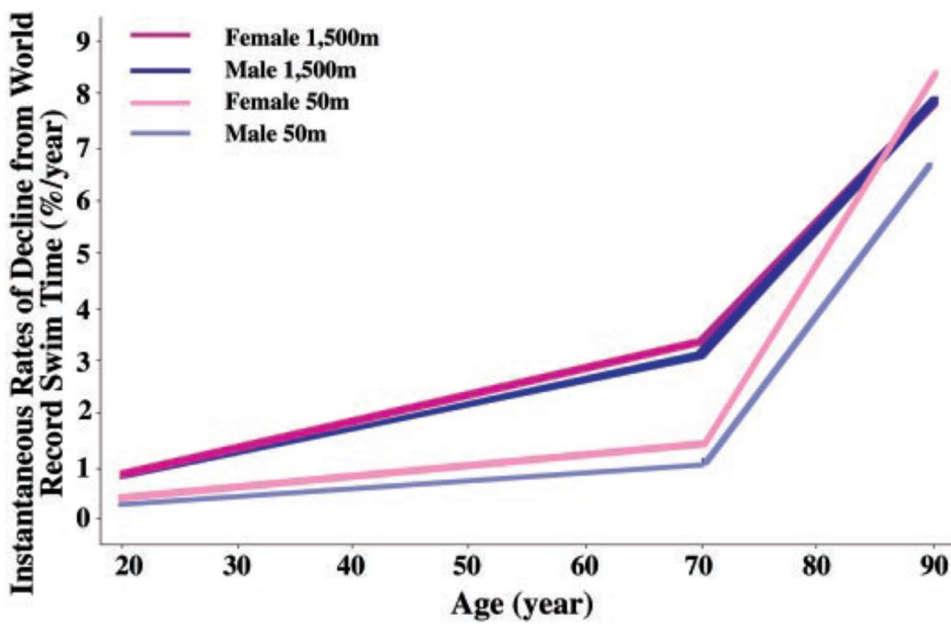


Fig. 3. Le (relatif) taux instantané de changements des performances de natation par rapport au meilleur temps mondial actuel.