



HAL
open science

Evolution des performances sportives : apport de l'épidémiologie pour l'analyse des performances sportives et des influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales sur les progressions humaines au cours de l'ère olympique.

Nour El Helou

► **To cite this version:**

Nour El Helou. Evolution des performances sportives : apport de l'épidémiologie pour l'analyse des performances sportives et des influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales sur les progressions humaines au cours de l'ère olympique.. Sport. Université Paris V- René Descartes, 2011. Français. NNT : . tel-01788555

HAL Id: tel-01788555

<https://insep.hal.science//tel-01788555>

Submitted on 9 May 2018

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.

**UNIVERSITE PARIS V - RENE DESCARTES
ECOLE DOCTORALE MTCE**

Thèse de Doctorat

Epidémiologie et physiopathologie du sport

Mlle Nour EL HELOU

**EVOLUTION DES PERFORMANCES SPORTIVES: APPORT DE
L'EPIDEMIOLOGIE POUR L'ANALYSE DES PERFORMANCES SPORTIVES ET
DES INFLUENCES PHYSIOLOGIQUES, TECHNOLOGIQUES, GENETIQUES ET
ENVIRONNEMENTALES SUR LES PROGRESSIONS HUMAINES AU COURS DE
L'ERE OLYMPIQUE.**

Thèse dirigée par: Pr. Jean-François Toussaint

Soutenu le 8 Février 2011

Membres du Jury : Pr. Jean-Claude Ameisen
Pr. Gerard Bréart
Pr. Olivier Hermine
Pr. Daniel Rivière
Pr. Pierre Rochcongar
Pr. Jean-François Toussaint



**UNIVERSITE PARIS V - RENE DESCARTES
ECOLE DOCTORALE MTCE**

Thèse de Doctorat

Epidémiologie et physiopathologie du sport

Mlle Nour EL HELOU

**EVOLUTION DES PERFORMANCES SPORTIVES:
APPORT DE L'EPIDEMIOLOGIE POUR L'ANALYSE DES PERFORMANCES
SPORTIVES ET DES INFLUENCES PHYSIOLOGIQUES, TECHNOLOGIQUES,
GENETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR LES PROGRESSIONS
HUMAINES AU COURS DE L'ERE OLYMPIQUE.**

Thèse dirigée par: Pr. Jean-François TOUSSAINT

Soutenue le 8 Février 2011

Membres du Jury : Pr. Jean-Claude AMEISEN
Pr. Gérard BREART
Pr. Olivier HERMINE
Pr. Daniel RIVIERE
Pr. Pierre ROCHCONGAR
Pr. Jean-François TOUSSAINT

RESUME

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'évolution des performances sportives au cours de l'ère olympique et tenter d'en interpréter les influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales.

La modélisation mathématique des performances sportives quantifiables montre des évolutions similaires dans toutes les épreuves : elles suivent une loi de progression multi-exponentielle par séries scandée par les événements historiques. Cette vision intégratrice permet la découverte d'un phénomène limitant commun à toutes les disciplines, les performances ne peuvent pas continuer à progresser continuellement, certaines ayant déjà cessé de croître. Ces limites observées dans le domaine sportif sont un indicateur des limites physiologiques de l'organisme humain.

Les principaux facteurs qui permettraient de nouvelles améliorations des performances sont les innovations technologiques.

Les prédispositions génétiques des athlètes et leur phénotype qui résulte d'interactions entre leurs gènes et l'environnement leur permettent d'accomplir ces performances sportives maximales. La majorité des records du monde a été battue pas les athlètes de nations qui comptent parmi les grandes puissances mondiales, fournissant un environnement géographique, économique et sociopolitique, favorisant l'épanouissement sportif. Le sport est un indicateur du développement économique et politique d'un pays.

Les résultats de cette thèse analysant un nombre important de données apportent une nouvelle vision sur nos capacités de progression : les performances physiologiques humaines ne s'accroissent pas de manière linéaire.

Mots Clés : Sport, records du monde, limites physiologiques, technologie, génétique, environnement.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study the evolution of athletic performance during the Olympic era and try to interpret the physiological, technological, genetic and environmental influences.

Mathematical modeling of quantifiable sports performance shows similar trends in all events: they follow a piecewise multi-exponential progression punctuated by historical events. This global vision allows the discovery of a limiting phenomenon common to all disciplines, performance can not continue to grow, and some have already stopped growing. These limitations observed in the field of sports are an indicator of physiological limitations of the human species.

The main factors that would allow for further performance improvements are technological innovations.

Furthermore genetic predisposition of athletes and their phenotype resulting from interactions between genes and environment, enable them to perform these maximal athletic performances. The majority of world records were beaten by athletes from nations that are among the major world powers, providing a geographical, economic and socio-political environment promoting the development of sport. Thus we suggest that sport is an indicator of the secular economical and political development of a country.

The results of this thesis analyzing a large number of data provide new insight into progression abilities: human physiological performance does not evolve in a linear way.

Keywords: Sport, world records, physiological limits, technology, genetics, environment.

Intitulé et adresse du laboratoire d'accueil :

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse ont été effectués à l'**IRMES – Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport** - localisé au sein de l'INSEP – Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance.

L'IRMES est dirigé par le Pr. Jean-François Toussaint.

Adresse : 11 Avenue du Tremblay, 75012, Paris.

Email : irmes@insep.fr

Tel : 01.41.74.41.29

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit de mes années passées en tant que doctorante à l'IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport).

Je tiens à remercier en premier lieu mon Directeur de thèse le Professeur Jean-François Toussaint, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant d'encadrer mes travaux et en me permettant d'intégrer l'équipe de recherche de l'IRMES.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, Pr. Jean-Claude AMEISEN, Pr. Gérard BREART, Pr. Olivier HERMINE, Pr. Daniel RIVIERE et Pr. Pierre ROCHCONGAR, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.

Je remercie tout spécialement les membres de l'équipe de l'IRMES, qui ont contribué à rendre ces trois années très intéressantes, tant sur le plan académique que sur le plan humain, et qui m'ont fait bénéficier de leurs idées et de leur savoir-faire si précieux dans un vrai esprit d'équipe. Je pense en particulier à Hélène, Hala, Geoffroy, Stéphane, Valérie, Marion, et tous les autres, je ne vous oublierai jamais.

[Je souhaite également remercier Dr. François Desgorces de l'Université Paris Descartes et Muriel Tafflet de l'INSERM pour leurs généreux conseils et réflexions.](#)

Cette thèse n'aurait pas abouti sans le soutien constant de mes plus chers amis qui ont cru en moi et m'ont encouragé dans tous les moments.

Enfin je remercie du fond du cœur ma famille, mes frères que j'adore et mes chers parents à qui j'exprime ma profonde gratitude pour leur support tout au long de mes années d'études, et sans qui je ne serai pas là aujourd'hui.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	p. 12
ET OBJECTIFS DE LA THESE	
<u>I – PHYSIOLOGIE</u>	p. 16
I.1. Limites physiologiques	p. 21
• Présentation des résultats de l'étude « <i>The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest</i> »	
• Présentation des résultats de l'étude « <i>Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988</i> »	
I.2. Femmes et Hommes	p. 28
• Présentation des résultats de l'étude « <i>Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983</i> »	
I.3. Âge et temps	p. 30
<u>II – TECHNOLOGIE</u>	p. 39
II.1. Patinage de vitesse (Speed Skating)	p. 41
II.2. Natation	p. 43
• Présentation des résultats de l'étude « <i>Technology & swimming: 3 steps beyond physiology</i> ».	
II.3. Cyclisme	p. 47
A. Cyclisme sur piste	p. 47
B. Cyclisme sur route	p. 49
• Présentation de l'étude « <i>Le Tour de France, le Giro, la Vuelta et les grandes courses cyclistes européennes montrent une progression unique de la vitesse dans les 20 dernières années</i> »	
○ Introduction	
○ Méthodes	
○ Résultats	
○ Discussion	
○ Conclusions	
○ Références	
II.4. Perspectives technologiques	p. 63

<u>III – Sport de haut niveau et santé</u>	p. 64
III.1. Mortalité et espérance de vie des cyclistes de haut niveau	p. 65
• Présentation de l'étude qui est actuellement en cours : « <i>Etude de la mortalité des cyclistes de haut niveau</i> »	
○ Données	
○ Résultats préliminaires	
○ Discussion	
○ Conclusion	
III.2. Dopage	p. 76
<u>IV – GENETIQUE</u>	p. 83
IV.1. Gènes identifiés dans la performance sportive	p. 93
IV.2. α-actinine-3 (ACTN3)	p. 85
IV.3. Mutations génétiques	p. 95
• Présentation de l'étude : « <i>Rôle des mutations du gène de l'hémochromatose sur la performance sportive d'endurance en altitude</i> »	
IV.4. Dopage Génique	p. 97
<u>V – ENVIRONNEMENT</u>	p. 99
V.1. Impact de l'environnement sur les performances	p. 100
• Présentation des résultats de l'étude « <i>From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments</i> »	
• Présentation de l'étude qui est actuellement en review : « <i>Impact des paramètres environnementaux sur les performances en marathon</i> »	
○ Introduction	
○ Méthodes	
○ Résultats	
○ Discussion	
○ Conclusions	
○ Références	
V.2. Sport et Développement	p. 117
• Présentation des résultats de l'étude : « <i>Success in Developing Regions : World Records Evolution through a Geopolitical Prism</i> ».	
<u>DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION</u>	p. 121
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	p. 125

<u>ANNEXES</u>	p. 140
<u>Annexe 1</u> : Article original et intégral - The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest.	p. 141
<u>Annexe 2</u> : Article original et intégral - Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988.	p. 147
<u>Annexe 3</u> : Article original et intégral - Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983.	p. 156
<u>Annexe 4</u> : Article original et intégral - Technology & swimming: 3 steps beyond physiology.	p. 166
<u>Annexe 5</u> : Article original et intégral - Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years.	p. 173
<u>Annexe 6</u> : Matériels et Méthodes de l'étude : Rôle des mutations du gène de l'hémochromatose sur la performance sportive d'endurance en altitude.	p. 183
<u>Annexe 7</u> : Article original et intégral - From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments.	p. 184
<u>Annexe 8</u> : Article original et intégral - Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism.	p. 191
<u>Annexe 9</u> : Liste des Publications.	p. 201

INTRODUCTION

La performance humaine est multifactorielle et est déterminée par divers facteurs de l'environnement de l'athlète (la prise en charge et l'encadrement médical, la qualité de l'entraînement physique, la nutrition, la technologie et le dopage), par des facteurs physiologiques (transport d'oxygène, performance et métabolisme musculaire, contrôle cardiovasculaire ou fonctionnement des différentes composantes du système nerveux), par des facteurs biomécaniques et tactiques ; et par d'autres facteurs hors du contrôle de l'athlète (génétique, environnement et conditions climatiques, facteurs socioculturels). Les facteurs psychologiques et neuronaux contribuent aussi au succès des performances sportives par le biais de la solidité mentale, la connaissance de la discipline, la subtilité tactique, la cohésion au sein de l'équipe, le niveau de maturité, l'anticipation et la prise de décision, et la motivation à subir et tolérer la douleur pendant l'entraînement et la compétition. L'ambition de la victoire est également une caractéristique additionnelle d'un champion. La multiplicité des facteurs mis en jeu dans l'établissement de la performance explique la diversité observée des résultats chez les athlètes de haut niveau [1-8].

Le sport est une pratique sociale bien définie qui remonte à la Grèce antique. Elle n'est pas vraiment différente des autres activités humaines : elle se développe historiquement dans des sociétés puissantes et est soumise à des changements continus. Il n'existe pas d'archives des performances sportives de l'antiquité méditerranéenne car le but des compétitions était alors de gagner contre ses adversaires et non de battre un record, la précision des mesures chronométriques ou de distance pour les sauts faisant défaut. Le sport sous sa forme actuelle est une invention des deux derniers siècles. Il s'est développé parallèlement à la progression des nations et, en particulier, de leur économie et de leur influence géopolitique. Les compétitions, initialement amateurs, se sont graduellement professionnalisées et se sont orientées vers le sport-spectacle, plus médiatisé, et mieux rémunéré [9-11].

A partir du 20^e siècle, le domaine de la physiologie de l'exercice a vraiment évolué et au 21^e, la science est devenue une composante majeure du sport, recourant à des domaines de pointe tels que la biologie moléculaire, la biomécanique ou la physique des matériaux. En fait, tous les domaines de la médecine clinique et des sciences appliquées sont concernés de la génétique à la psychologie, en passant par les neurosciences et la technologie [12].

Néanmoins, la compréhension des performances de haut niveau demeure limitée. Ce champ est riche d'opportunités visant à étendre la compréhension des adaptations et des réponses aux stimuli extrêmes, améliorer les prestations des soins médicaux aux athlètes et aider à l'optimisation sécurisée de la performance humaine [12].

Les athlètes ont aujourd'hui à leur disposition des systèmes intégrés d'assistance et de soins médicaux qui tentent de préserver la santé tout en maintenant l'objectif de performance en compétition. Ils favorisent la prévention des blessures dans des conditions de stress physiologique et psychologique élevés [9, 13, 14]. Les athlètes de haut niveau sont des êtres humains complexes et souvent singuliers et leurs capacités physiques, physiologiques, psychologiques et comportementales sont souvent au-delà de la norme [12, 13]. Ils peuvent, par exemple, être dotés d'une capacité pulmonaire totale (volume d'air mesuré lors d'une exploration respiratoire) de 9 litres ou d'une consommation maximale d'oxygène ($VO_2 \text{ max}$) > de 80 ml/kg/min. Ils peuvent endurer plus de 200km de course à pied par semaine ou soulever deux fois leur poids corporel [12].

La protection de la santé de ces athlètes est une préoccupation majeure : ils se soumettent en effet à des volumes d'entraînement importants et sont désormais exposés à des sollicitations extrêmes induisant de nombreuses pathologies. De même, leurs réponses aux thérapeutiques peuvent être différentes de la population générale [12, 13].

Avoir des connaissances des principes de physiologie, nutrition et psychologie du sport est indispensable pour les scientifiques encadrant ces athlètes. Les innovations en sciences du sport pourrait permettre le développement de nouveaux modèles de travail (domaines structurels et opérationnels), de nouveaux traitements et thérapies (pharmacologiques, modalités), des techniques de réhabilitation et de la chirurgie (et d'autres interventions), le développement de modèles de récupération (nutrition, exercice, sommeil, psychologie, et autres). Elles pourraient aussi influencer sur le développement de la performance sportive et aider à comprendre les limites de la performance humaine et les potentiels de son optimisation [12-17].

Objectifs de la thèse

L'objectif principal de ces travaux de recherche est d'étudier l'évolution historique et chronologique des performances sportives. Notre travail porte en particulier sur l'évolution de l'ensemble des meilleures performances et des records du monde de douze disciplines en fonction du temps, au cours de l'ère olympique moderne.

L'évolution du sport reflète les changements de la société. L'augmentation de la taille des individus, par exemple, reflète une plus grande disponibilité des ressources alimentaires. Par conséquent le pool d'athlètes à la fois grands et rapides s'est accru. Ceux-ci sont recrutés et entraînés dans des institutions en constante amélioration [10, 11, 18]. La progression des performances sportives au cours du siècle devient un indicateur de la récente phase d'expansion phénotypique humaine [19].

Les premières questions auxquelles nous avons voulu répondre ont été :

- Quel est l'état des lieux des performances sportives ?
- Celles-ci vont-elles continuer à progresser ?
- Jusqu'ou les athlètes peuvent-ils aller ? Quelles sont leurs limites ?
- Les performances sportives des hommes et des femmes évoluent-elles similairement ?

Nous avons tout d'abord étudié la progression des records du monde de toutes les épreuves de 5 disciplines olympiques quantifiables (Athlétisme, Natation, Patinage de vitesse, Cyclisme sur piste et Haltérophilie) chez les hommes et les femmes.

Nous avons ensuite étudié l'évolution des performances annuelles des 10 meilleurs athlètes mondiaux dans 2 disciplines (Athlétisme et Natation). Nous avons également comparé les progressions féminines et masculines pour mesurer l'écart entre les deux sexes et prédire si les performances se rejoindront.

L'objectif était de comprendre les lois de progression de ces performances en utilisant les outils mathématiques et statistiques de l'épidémiologie moderne.

Dans un second temps, nous avons voulu mesurer les impacts technologiques dans les disciplines qui ont récemment progressé en quantifiant notamment l'impact des combinaisons de natation sur les vitesses de nage.

Nous avons ensuite étudié l'évolution des performances en cyclisme sur route, en analysant les résultats de 11 courses représentatives, incluant les 3 grands Tours Européens. Ce sport populaire progresse-t-il de la même manière que les disciplines olympiques ? Comment les progrès technologiques (matériel et pharmacologie) influencent-ils les performances ?

Puis nous avons entamé une enquête, actuellement en cours, pour étudier la durée de vie des cyclistes ayant participé à ces épreuves. Ces sportifs, soumis à des charges et des volumes d'entraînement très intensifs, peuvent en effet être consommateurs de substances ergogéniques. L'une des grandes questions qui se posent actuellement à leur propos conduit à étudier leur taux de mortalité comparativement à celui de la population générale.

Les sportifs de haut niveau bénéficient presque tous actuellement des techniques d'entraînements les plus développées, ainsi que des progrès en médecine et en technologie : existe-t-il des facteurs génétiques qui jouent un rôle clé dans la performance sportive et qui permettent aux porteurs de génotypes favorables de se différencier des autres et d'accéder aux plus hautes marches des podiums ? Pour répondre à cette question une étude en collaboration avec l'IRMES et les Pr. O. Hermine et G. Dine a été menée pour déterminer notamment la fréquence des mutations du gène HFE chez les membres des équipes de France.

Après avoir analysé les records du monde dans les disciplines olympiques quantifiables, nous avons analysé la progression des records du monde dans les sports dits « outdoor ». Nous avons aussi étudié l'impact des facteurs environnementaux sur une épreuve de plein air difficile et de longue durée comme le marathon. Nous avons déterminé quels sont les paramètres qui ont le plus grand impact direct sur la vitesse de course en marathon.

Enfin dans un contexte plus global nous avons voulu comprendre l'environnement géopolitique du sport contemporain. Pour cela nous avons analysé la distribution géographique et historique du nombre de records du monde et du nombre de médailles olympiques pour répondre aux questions : quels sont les principaux pays détenteurs de records du monde et de médailles olympiques ? Les résultats sportifs sont-ils le reflet des engagements historiques et politiques d'une nation ?

Cette thèse sur publications présente l'ensemble des travaux qui ont apporté des réponses à ces questions.

I – PHYSIOLOGIE

De nombreux facteurs contribuent à la performance d'un athlète et la plupart sont liés à la structure et aux capacités fonctionnelles musculaires, cardiovasculaires ou neurologiques [2, 20]. La section suivante est consacrée à une brève revue bibliographique des propriétés musculaires et des facteurs physiologiques fondamentaux.

Les muscles squelettiques sont formés de deux types de fibres musculaires et leur performance dépend de la majorité du type qui les compose : les fibres de type I (lentes – oxydatives), principalement sollicitées lors d'exercices d'endurance, ont des pics de force et de puissance inférieurs aux fibres de type II (rapides) mais sont plus efficaces en termes d'économie, elles consomment peu d'énergie pour leur activité contractile. Les fibres de type II (rapides ; IIa et IIb) sont capables de produire des pics de force et de puissance supérieurs grâce à leur grande vitesse de contraction, elles sont coûteuses en énergie et sont sollicitées pour les activités rapides de courte durée [2, 20-23]. La proportion de fibres de type I et II varient d'un muscle à l'autre, et dans le même muscle chez des athlètes différents ; un sprinter peut disposer de 75% de fibres rapides alors qu'un coureur de longue distance peut avoir jusqu'à 75% de fibres lentes. Certains sports demandent en même temps de la puissance et de l'endurance et donc un équilibre entre les deux types de fibres ; d'autres sports sont plus spécifiques [20, 24, 25].

La majorité des données disponibles sur les adaptations physiologiques à l'exercice physique concernent les performances en endurance (surtout les courses de longue distance ou le cyclisme sur route) car il est possible, en utilisant des tapis roulants et des ergocycles, de simuler en laboratoire ce qui se passe en compétition.

La consommation maximale d'oxygène, ou VO_2_{max} , est considérée comme le déterminant principal de la performance en endurance ; c'est la limite supérieure du niveau du métabolisme aérobie (production d'énergie maximale par phosphorylation oxydative) [2, 26-29]. Des valeurs très élevées de VO_2_{max} (entre 70 et 85 ml/kg/min) ont été observées chez les athlètes et ont été identifiées comme indicateurs de performance de haut niveau. En général les valeurs féminines sont en moyenne inférieures de 10% aux valeurs masculines en raison d'un taux d'hémoglobine inférieur et d'un taux plus faible de masse maigre. Le taux d'hémoglobine sanguin est un déterminant majeur de la consommation maximale d'oxygène, plus le taux d'hémoglobine augmente, plus la VO_2_{max} augmente, la relation est linéaire ; d'autres déterminants comme le débit cardiaque et la densité capillaire sont également fortement corrélés à la VO_2_{max} , ils augmentent significativement avec l'entraînement et contribuent ainsi à son augmentation [2, 26, 27, 30-33]. Les valeurs de VO_2_{max} chez les athlètes de haut niveau valent 50 à 100% de plus que celles observées chez des sujets sains et jeunes ayant une

activité normale sans que l'on ait pour l'instant départagé l'influence relative de facteurs innés et de paramètres acquis expliquant une telle différence. D'autres adaptations à l'entraînement contribuent à ces valeurs de $VO_2 \text{ max}$ élevées et comprennent l'augmentation du volume d'éjection systolique cardiaque, du volume sanguin ou de la densité capillaire, la densité et la qualité des mitochondries dans les muscles entraînés. L'intensité et la distance de la course déterminent le rythme moyen de l'effort ou le pourcentage de $VO_2 \text{ max}$ [2, 24, 34, 35].

Le pourcentage de $VO_2 \text{ max}$ maintenu définit l'intensité de l'exercice ; au delà d'une certaine intensité (75-90% du $VO_2 \text{ max}$ chez les athlètes de haut niveau ; environ 60% du $VO_2 \text{ max}$ chez les sujets sédentaires), le métabolisme anaérobie (glycolytique) devient important car la beta-oxydation des lipides est insuffisante pour répondre à la demande musculaire en ATP. La glycolyse et la glycolyse sont alors stimulées et au total le taux de livraison du pyruvate dans les mitochondries dépasse progressivement leur capacité à l'oxyder, ce qui conduit à la production accélérée d'acide lactique [2, 26, 28, 36, 37]. Les capacités oxydatives du muscle déterminent principalement ce seuil, les athlètes d'endurance ont des seuils de lactate doublement élevés en raison de leur $VO_2 \text{ max}$ supérieure et de la survenue d'un seuil atteint à des pourcentages plus élevés ; ils peuvent donc maintenir leur vitesse ou leur puissance plus longtemps pendant l'effort. Les sujets entraînés sont en mesure de mieux tolérer l'exercice au delà de leur seuil de lactate, ils possèdent une densité capillaire musculaire élevée qui leur permet de mieux tolérer le métabolisme anaérobie et la production d'acide lactique, la $VO_2 \text{ max}$ est directement influencée par la densité capillaire, indépendamment du rôle des capillaires dans le transport d'oxygène, dans la réduction des gradients de diffusion, et aussi dans l'élimination des déchets et la limitation de l'acidose dans les muscles actifs [2, 29, 38, 39].

Quand la durée de l'exercice se prolonge au-delà de 2h le problème devient celui de la disponibilité de l'énergie ; les réserves en glucides peuvent être limitantes car elles sont comparativement plus faibles que les réserves en lipides. En termes d'énergie potentielle, même un coureur ayant un pourcentage de graisse corporelle à la limite inférieure (indépendamment de son poids), stocke suffisamment d'acides gras pour ravitailler l'équivalent de quatre marathons ou plus [2, 29, 40].

Lorsque le glycogène musculaire est épuisé, la capacité modeste du muscle actif d'absorber le glucose sanguin (via la fonction hépatique ou l'alimentation) limite le taux de génération d'ATP par oxydation et donc la performance. La diminution des concentrations de glucose sanguin provoquerait des symptômes d'hypoglycémie qui limiteraient la capacité de l'individu à continuer l'exercice. Pour éviter l'hypoglycémie et les déplétions des stocks de glycogène durant la course, un certain nombre de stratégies alimentaires pré-compétition et des stratégies

de remplacement de l'énergie perdue durant l'exercice ont été développées. Suivre ces stratégies de manière optimale permettrait d'augmenter les réserves de glycogène musculaire avant l'exercice, d'éviter l'hypoglycémie et de prolonger la durée de l'exercice au seuil de lactate [2, 29, 40].

Un autre facteur qui contribue de manière importante, à la performance en endurance est l'efficacité ou l'économie d'énergie. L'économie de l'exercice est le coût en oxygène d'un exercice effectué à une intensité sous-maximale stable : c'est le ratio entre le travail effectué et l'énergie consommée pour faire ce travail. Il existe des variations considérables entre les individus du coût en oxygène d'un exercice à une intensité donnée : autour de 30-40% entre les coureurs, et autour de 20-30% entre les cyclistes, et c'est ce facteur qui fait la différence parmi les athlètes qui sont homogènes en termes de $VO_2 \text{ max}$; et il existe des variations entre athlètes et sédentaires, l'efficacité musculaire et l'économie de course pourraient s'améliorer d'environ 1-3% par an avec l'entraînement régulier [2, 26, 28, 29]. Tous les mouvements ont des coûts énergétiques, ainsi le mouvement le plus efficace ou le plus habile est celui qui est optimal en termes de réalisation de l'objectif au moindre coût [4]. Plusieurs facteurs physiologiques déterminent l'économie de l'exercice dont le pourcentage de fibres de type I dans les muscles (qui semblent avoir des propriétés contribuant à l'économie d'énergie), la morphologie et l'élasticité musculaire et la mécanique des articulations dans le transfert efficace de l'ATP à une vitesse de course donnée [2, 23, 26, 28].

Concernant les performances de puissances ou anaérobies, les entraînements chroniques de résistance augmentent la force musculaire ; ces améliorations sont attribuées à une série d'adaptations neurologiques et morphologiques.

Les principales adaptations morphologiques impliquent une augmentation de la taille et le nombre des myofibrilles. La prolifération des cellules satellites et leur fusion ultérieure avec les fibres existantes semblent être intimement impliquées dans la réponse hypertrophique, typique des fibres de type II. D'autres adaptations morphologiques possibles comprennent l'hyperplasie, les changements du type de fibres musculaires, de l'architecture musculaire, de la densité des myofilaments et de la structure du tissu conjonctif et des tendons [29, 41].

A quels niveaux (perceptifs, cognitifs ou moteurs) les compétences de l'athlète se manifestent-elles ? La compétence est un niveau élevé de performance dans une tâche technique, acquis par la pratique ou l'entraînement, dont l'apprentissage est guidé par les succès comme par les erreurs. L'amélioration par la pratique est applicable à des activités cognitives et se produit sur de longues périodes de temps [4, 29]. Les adaptations neurologiques, qui incluent l'apprentissage et la coordination intermusculaire, viennent de la spécificité de l'entraînement

[41]. Les propriétés neuronales distinguent les sportifs élités des amateurs, comme la capacité à prendre des décisions prédictives plutôt que réactives dans des situations de compétitions, la prise de décision et le plan d'action étant étroitement interdépendants [4, 29]. Un athlète qualifié est considéré comme une personne qui a acquis des modèles d'anticipations et de réactions à différentes situations, qui lui permettent de planifier les meilleures actions dans un contexte donné ; de plus les athlètes ont une plus grande attention visuelle sélective que les non-sportifs [4]. Le principe clé est celui d'augmenter l'automatisme des mouvements ; les processus automatiques sont plus rapides, plus habiles, sans effort, demandent une moindre capacité attentionnelle, et sont difficiles à perturber délibérément. L'atteinte de l'automatisme est un indicateur d'un niveau élevé de compétences [42, 43]. Le sport de haut niveau est pratiqué sous la pression extrême du temps. L'une des principales caractéristiques de la haute performance est la capacité à réagir à des situations spécifiques dans le temps le plus court ; cette capacité se manifeste souvent dans les scénarios exigeant des choix complexes, comme par exemple faire la bonne passe dans un sport d'équipe [44]. Un athlète expérimenté est en mesure de prédire comment un scénario de compétition se déroulera en se basant sur sa compréhension détaillée des probabilités de situations, sa capacité d'anticiper l'effet de la cinématique du corps de l'adversaire, sur la trajectoire du ballon, a été décrite dans de nombreux sports [4, 29, 45, 46]. Les informations acquises lui permettant d'anticiper, sont liées à des structures de mémoire très développées spécifiques au domaine ; une étude récente a constaté que les joueurs de basket-ball professionnels pourraient prédire le résultat d'un tir, mieux que les spectateurs professionnels ou les novices en observant uniquement la cinématique de l'action du tir avant que le ballon ne soit lâché [4, 47].

Les compétences physiques ont des composantes sensorielles et motrices interdépendantes, les athlètes élités montrent non seulement une précision accrue dans l'exécution, mais aussi des performances supérieures au niveau de la perception, l'anticipation et la prise de décision [4, 29, 47]. Ces meilleures performances sont spécifiques à une tâche et dépendent d'un entraînement intensif, et dans une certaine mesure, des différences interindividuelles innées [4]. Il existe des preuves de changements structurels et physiologiques dans le cortex sensoriel et moteur avec l'entraînement: des changements analogues dans le cortex frontal médial et latéral, le cortex pariétal postérieur et les structures sous-corticales qui accompagnent la perception, la planification et la prise de décision chez les athlètes de haut niveau [4, 29]. La compréhension des mécanismes neuronaux qui distinguent les sportifs élités des autres pourrait fournir une base pour affiner encore les stratégies d'entraînement [4].

I.1. Limites physiologiques

Dans tous les sports, les facteurs qui déterminent la performance sont les facteurs limitant [2, 6, 20]. Le taux de production d'énergie par le muscle est l'un des facteurs qui pourraient limiter les performances ; les deux sources principales d'énergie (aérobie et anaérobie) contribuent de manière proportionnelle selon le type d'activité [20]. Durant les activités de faible intensité le métabolisme aérobie est le fournisseur principal d'énergie ; au fur et à mesure que l'intensité augmente, le système aérobie atteint ses capacités maximales de production d'énergie, la $VO_2 \text{ max}$ est atteinte [2, 20]. Au-delà de cette intensité l'énergie supplémentaire est fournie par le métabolisme anaérobie, cependant ce système énergétique est de courte durée [20, 29]. Ainsi, dans les sports d'endurance, la $VO_2 \text{ max}$ d'un athlète définit sa limite supérieure de productivité d'énergie : il est admis qu'il existe une limite physiologique à la capacité du corps à consommer de l'oxygène. A des intensités élevées, la VO_2 atteint un maximum au-delà duquel l'effort ne peut s'accroître. La $VO_2 \text{ max}$ est en partie limitée par la capacité du système cardiorespiratoire à transporter l'oxygène vers les muscles [20, 26]. Le trajet de l'oxygène à partir de l'atmosphère jusqu'à la mitochondrie contient une série d'étapes dont chacune pourrait représenter un obstacle et une limite physiologique potentielle: la capacité de diffusion pulmonaire, le débit cardiaque maximal (70 à 85% de la limitation), la capacité de transport de l'oxygène sanguin (qui dépend du taux d'hémoglobine) et les caractéristiques des muscles squelettiques (densité capillaire et taux d'enzymes mitochondriales). La capacité de diffusion pulmonaire pourrait en effet être un facteur limitant de la $VO_2 \text{ max}$ dans certaines circonstances ; pendant un exercice maximal, la saturation artérielle en O_2 (% SaO_2) reste autour de 95%, un équilibre alvéolo-artériel n'est pas complet en raison de la rapidité du passage des globules rouges dans le capillaire pulmonaire durant les exercices à intensité élevée. Les athlètes de haut niveau sont plus susceptibles de subir une désaturation artérielle en O_2 lors d'un exercice, leur débit cardiaque maximal étant plus élevé, ceci conduit à une diminution du temps de transit des globules rouges dans le capillaire pulmonaire. Par conséquent, il n'y a pas assez de temps pour saturer le sang avec l' O_2 avant sa sortie du capillaire pulmonaire. Des études expérimentales ont montré que les athlètes respirant un air enrichi en oxygène pendant un test de $VO_2 \text{ max}$ observent une augmentation des valeurs de leur $VO_2 \text{ max}$ ainsi qu'une augmentation de leur saturation artérielle en O_2 par rapport à l'air ambiant [26]. La possibilité d'augmenter la capacité d'exercice de cette manière montre la présence d'une limitation pulmonaire.

La VO_2_{max} a moins d'influence dans les sports de courte durée et d'intensité élevée où l'énergie est principalement fournie par le métabolisme anaérobie [20]. D'autres facteurs comme l'efficacité mécanique, le recrutement des unités motrices, le seuil de lactate ou des facteurs psychologiques pourraient poser une limite aux performances [2, 20]. Dans les exercices de résistance, l'hypertrophie et l'augmentation de la puissance musculaires qui résultent de l'entraînement, n'augmentent plus au-delà d'un certain seuil [41].

La modélisation ainsi que les techniques de simulation ont été utilisées pour observer l'évolution des performances sportives et identifier les limites humaines [15-17, 20, 48].

Les records du monde révèlent le potentiel maximal de l'espèce humaine à un moment donné [1, 12, 13, 17, 49, 50].

L'analyse des records du monde montre la progression de la performance humaine et reflète nos limites physiologiques. Notre première étude [17] a porté sur l'analyse de 3263 records du monde (RM) dans 147 épreuves olympiques issues des 5 disciplines quantifiables (athlétisme, natation, haltérophilie, patinage de vitesse et cyclisme sur piste) de 1896 jusqu'en 2007 (Cf annexe 1). Les données analysées dans cette étude et dans les études abordées dans cette thèse, ont été recueillies par les membres de l'équipe IRMES sur les sites internet officiels des fédérations internationales de chaque discipline (IAAF, FINA...).

L'approche méthodologique développée dans cette étude est originale n'avait pas été utilisée précédemment. Les modèles antérieurs n'ont pas été retenus. En effet les modèles de régression linéaire ajustés par année [51, 52] ont été largement critiqués en raison de leur inexactitude et de leur incohérence physiologique [15, 16, 53]. Par ailleurs, le modèle sigmoïde utilisé par Nevill et Whyte [15, 16] ne tient pas compte des variations entre les performances ni des influences historiques ou techniques sur les paramètres biologiques. Il n'a été utilisé que sur 8 épreuves d'athlétisme et 6 épreuves de natation entre 1957 et 2006. Toutefois, ce dernier est plus précis que les modèles linéaires et s'ajuste bien à la progression séculaire des RM et démontre déjà que le potentiel physiologique humain est limité.

Cependant les sauts (longueur, hauteur, perche), les lancers (poids, javelot, marteau, disque) et les épreuves d'haltérophilie n'ont pas pu être modélisés par la « courbe en S » ou la fonction logistique appliquée par Nevill et Whyte [15, 16] ; ce modèle étant limité car il ne tient pas en compte :

- L'aspect non monotone de l'évolution des RM dû aux modifications des règlements dans certaines épreuves: en lancer du javelot (chez les hommes et femmes) et dans toutes les épreuves d'haltérophilie (1996 : année de remise à zéro des RM).
- L'impact des 2 guerres mondiales (où la progression des RM est suspendue en général).
- L'impact majeur de facteurs technologiques, tels que les combinaisons (introduites en 1999 et 2008 en natation)

Ces trois points suggèrent une préférence pour le modèle multi-exponentiel par série développé dans cette étude, basé sur toutes les disciplines olympiques quantifiables et qui tient en compte des fluctuations locales relatives à l'impact des guerres mondiales ainsi que des modifications des règles et des innovations technologiques.

Pour chaque épreuve la série de RM a été divisée en périodes, modélisées par la fonction suivante :

$$y_j(t) = \Delta_{WR} \cdot \exp(-a_j \cdot t) + b_j$$

Ce modèle développé nous a permis d'identifier un schéma, ou une loi de progression des RM, qui s'est avérée commune à toutes les épreuves olympiques quantifiables et nous a permis de prédire leurs limites théoriques.

Ce modèle exponentiel décroissant par séries suggère un déclin majeur et constant de la progression des RM avec le temps, avec deux coupures significatives de l'impact des deux guerres mondiales. Toutes les épreuves olympiques mesurables, qu'elles soient aérobies (10000m en patinage) ou anaérobies (haltérophilie), qu'elles sollicitent principalement les muscles des jambes (cyclisme) ou tous les muscles du corps (décathlon), qu'elles soient d'une durée de quelques secondes (lancers en athlétisme) ou de plusieurs heures (50km marche), qu'elles soient chez les hommes ou chez les femmes, chez les athlètes de petite taille (poids mouche) ou chez les grands (100m nage libre), qu'elles soient individuelles ou collectives (relais), toutes les courbes suivent le même schéma de progression, suggérant l'universalité du modèle (Figure A).

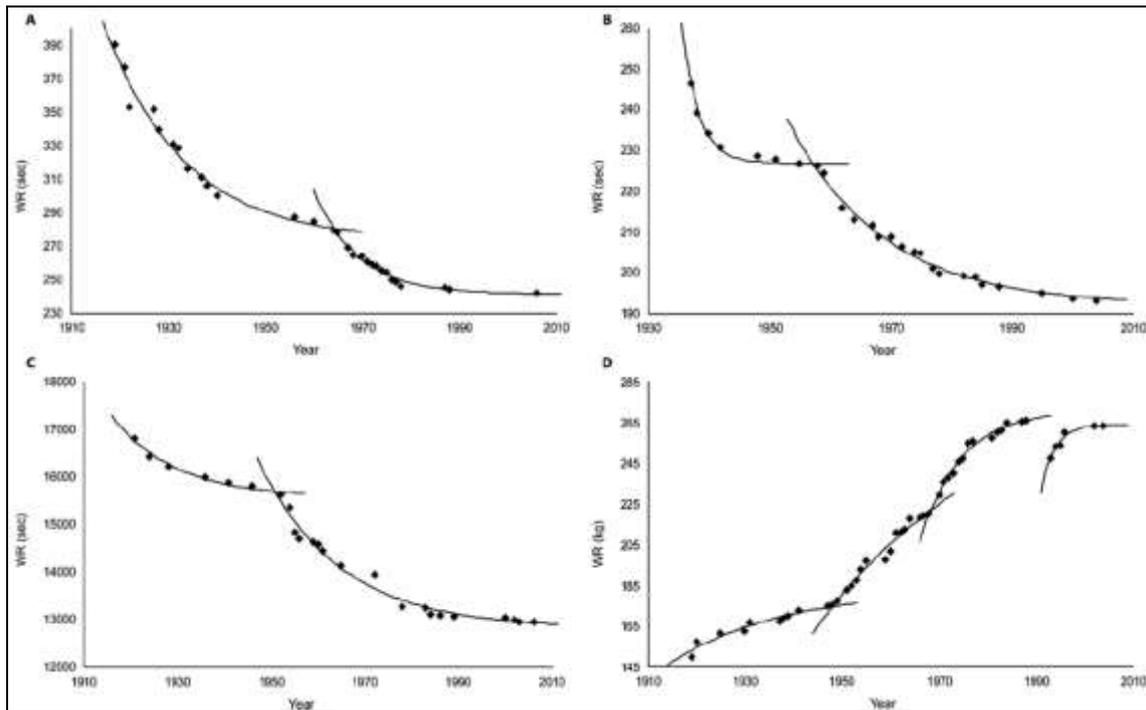


Figure A. Modélisation des records de 4 épreuves. A. 400m nage libre (femmes) avec une courbe bi exponentielle décroissante ($r_i^2 = 0.976$; $r_{ii}^2 = 0.966$); B. Relai 4x100m nage libre (hommes) ($r_i^2 = 0.985$; $r_{ii}^2 = 0.988$); C. 50km marche (hommes) ($r_i^2 = 0.972$; $r_{ii}^2 = 0.977$); D. Epaulé-jeté poids lourds (haltérophilie, hommes) ($r_i^2 = 0.939$; $r_{ii}^2 = 0.937$; $r_{iii}^2 = 0.975$ et $r_{iv}^2 = 0.946$). Les catégories de poids ont été modifiées en 1948, 1968 et 1992 et les contrôles anti-dopage renforcés en 1988-1992 en haltérophilie [17].

Pour comparer notre modèle, nous avons testé le modèle de Nevill et Whyte [15, 16] ou « la courbe en S » sur les 147 épreuves olympiques testées dans notre étude. Le modèle a été ajusté avec succès sur 90% des épreuves, 15 épreuves (10%) n'ont pu être modélisées en raison de non-convergence:

- Haltérophilie femmes : épreuve d'épaulé-jeté, catégories 53 et 58 kg
- Haltérophilie femmes: épreuve de Snatch, catégories 48, 53, 58 et >75kg
- Athlétisme femmes: épreuve de triple-saut

On remarque dans nos résultats qu'à partir des années 1970, une diminution importante du nombre annuel de RM est observée, malgré la guerre froide qui stimule la concurrence sportive entre les blocs de l'est et de l'ouest [54], malgré le développement économique, les avancées technologiques majeures, les progrès en médecine ou en nutrition, et malgré le dopage. Tous ces éléments, ainsi que des modifications du règlement (ou du parcours en cyclisme sur route [55]) ou l'introduction de nouvelles techniques peuvent déclencher de

nouvelles périodes de progression engendrant de nouvelles asymptotes, mais ne modifient pas la structure et l'allure exponentielle de la courbe, qui est commune à toutes les épreuves et tend vers une limite [8, 17, 55].

Le modèle utilisé dans cette étude a une valeur prédictive, chaque période modélisée par la fonction exponentielle a une valeur asymptotique. Les valeurs asymptotiques des records ont ainsi été calculées et, nous observons qu'en 2027, la moitié de ces épreuves devrait atteindre 99,95% de leur valeur asymptotique, et cesseront de progresser ; le débat sur les limites physiologiques humaines émerge désormais clairement.

Comme les records du monde, l'analyse des performances annuelles des 10 meilleurs athlètes (de 1891 à 2008) montre que 64% des 36 épreuves d'athlétisme ne progressent plus (78% des 18 épreuves féminines et 50% des 18 épreuves masculines) (Figure B). La version originale et intégrale de l'article [49] est disponible en annexe 2.

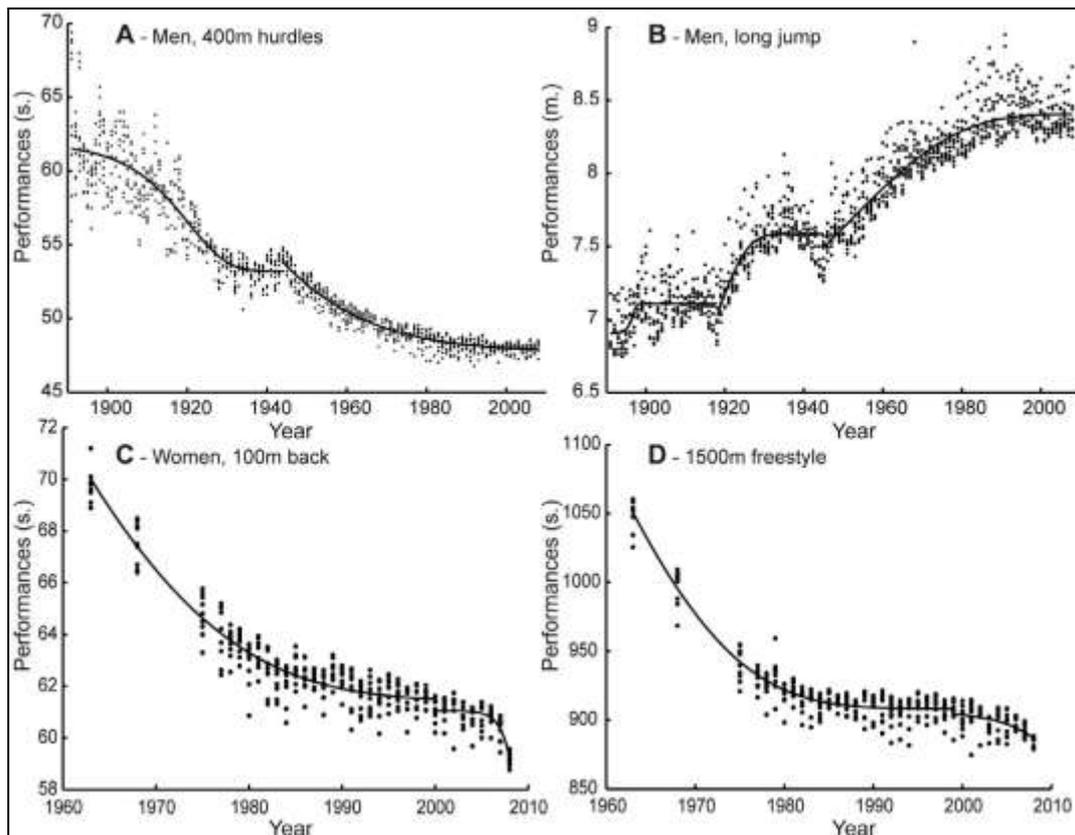


Figure B. Modélisation des performances des 10 meilleurs athlètes dans 4 épreuves. A. 400m haies (hommes - athlétisme) ($R^2_{i} = 0.77$; $R^2_{ii} = 0.91$), épreuve encore en progression. B. Saut en longueur (hommes) ($R^2_{i} = 0.22$; $R^2_{ii} = 0.55$; $R^2_{iii} = 0.81$), a cessé de progresser depuis 2001. C. 100m dos (natation - femmes) ($R^2_{i} = 0.90$; $R^2_{ii} = 0.63$). D. 1500m nage libre (hommes) ($R^2_{i} = 0.92$; $R^2_{ii} = 0.31$). Peu de données sont disponibles pour la natation (C. et D.) entre 1963 et 1977. Avant l'introduction des combinaisons en natation, la courbe C était encore en progression alors que la courbe D avait cessé de progresser depuis 1992. De nouvelles progressions apparaissent (en 2000 (C), et en 1999 (D)) en natation, suite à l'introduction des combinaisons [49].

L'année moyenne où est détecté l'arrêt de progression des performances est en 1992 (± 8 ans ; 1991 pour les femmes; 1994 pour les hommes). Les épreuves qui progressent encore sont les courses de longue et moyenne distance. Par contre en natation 100% des épreuves observent une amélioration de 1999 à 2008, année de l'étude, et la progression rapide la plus récente a été observée en 2000, année qui coïncide avec l'introduction des combinaisons de 1ère génération. Auparavant, les performances avaient cependant déjà cessé de progresser dans 16 des 34 épreuves de natation (8 épreuves féminines et 8 masculines) depuis l'année 1990 (1988 ± 5 pour les femmes et 1991 ± 4 pour les hommes) [49].

Le modèle de Gompertz appliqué pour l'analyse des 10 premiers athlètes dans 2 disciplines révèle que les performances en athlétisme stagnent, tandis que les épreuves de natation

progressaient jusqu'en 2008, suggérant que la différence entre les deux disciplines était principalement liée à l'introduction d'un biais technologique en natation.

Ces analyses épidémiologiques et la modélisation des performances sportives sont de nouveaux outils de description de la dynamique physiologique des sportifs de haut niveau ; elles suggèrent que la progression des performances sportives atteindra bientôt ses limites [17, 49].

I.2. Femmes et Hommes

Les performances sportives chez les hommes comme chez les femmes suivent les mêmes lois de progression et tendent vers une asymptote [17, 49].

L'analyse de l'écart entre les performances masculines et féminines dans les 5 disciplines olympiques quantifiables a montré que l'écart des performances entre les sexes a progressivement diminué depuis le début du siècle et qu'il est stable depuis 1983, suggérant que les femmes ne rattraperont pas le niveau des performances masculines [56]. Cette tendance générale a été observée parmi les athlètes de toutes les disciplines, pour les records du monde comme pour les dix meilleures performances. La version originale et intégrale de l'article est disponible en annexe 3.

L'inscription des épreuves féminines au calendrier international et leur reconnaissance sportive ont eu lieu bien après celles des hommes : en athlétisme, 28 ans séparent les premiers RM masculins (en 1914 en moyenne) des premiers records féminins (1942) d'où l'observation d'une amélioration des performances féminines plus rapide que celle des performances masculines au milieu du 20^e siècle; dans les années 1950 les femmes ont bénéficié de l'amélioration des techniques d'entraînement développées à partir de l'expérience masculine. Ensuite, comme les hommes, elles ont bénéficié des progrès de la médecine et de la nutrition [48, 52, 56].

Par contre en natation les femmes ont débuté les compétitions bien plus tôt qu'en athlétisme, 5 ans seulement séparent les premiers records masculins (en 1927 en moyenne), des premiers records féminins (1932).

Dans certaines épreuves l'écart pourrait changer, et pourrait correspondre à l'amélioration des performances masculines (les hommes ayant encore une certaine marge de progression potentielle) [49], parallèlement à une régression ou une stagnation des performances féminines [48]. Le dopage est suspecté d'avoir accéléré la réduction des écarts entre les hommes et les femmes surtout dans les années 1970 et 1980 en raison de l'implication des sportives des pays de l'Est dans les programmes de dopage d'état [54, 56-58].

Les écarts entre les RM des hommes et des femmes sont stables et fixes depuis maintenant 26 ans (en moyenne à $10,0\% \pm 2,9\%$) (Figure C) [48]. Cette évolution restera figée à la condition que l'ensemble des paramètres concourant à l'écart observé soit maintenu. Par exemple, en cas de désinvestissement massif dans le monde sportif, d'athlètes du même sexe, un recul des performances pourrait être observé et ce recul pourrait être non uniforme entre les deux sexes.

Un désistement massif a déjà été observé dans le sport : les athlètes scandinaves masculins de demi-fond (athlétisme) ont abandonné les épreuves de 1500m à partir des années 1990 lorsque leurs performances avaient déjà atteint des plateaux depuis plus de 10 ans et que les athlètes d'origine africaine avaient pris la relève en termes d'amélioration des performances et de records battus en demi-fond.

Les femmes et les hommes ayant atteint leurs limites, ils évoluent maintenant parallèlement, dans le même sens (Figure C). Sans une amélioration technologique spécifiquement dédiée à un sexe ou à l'autre, la stabilisation de l'écart persisterait.

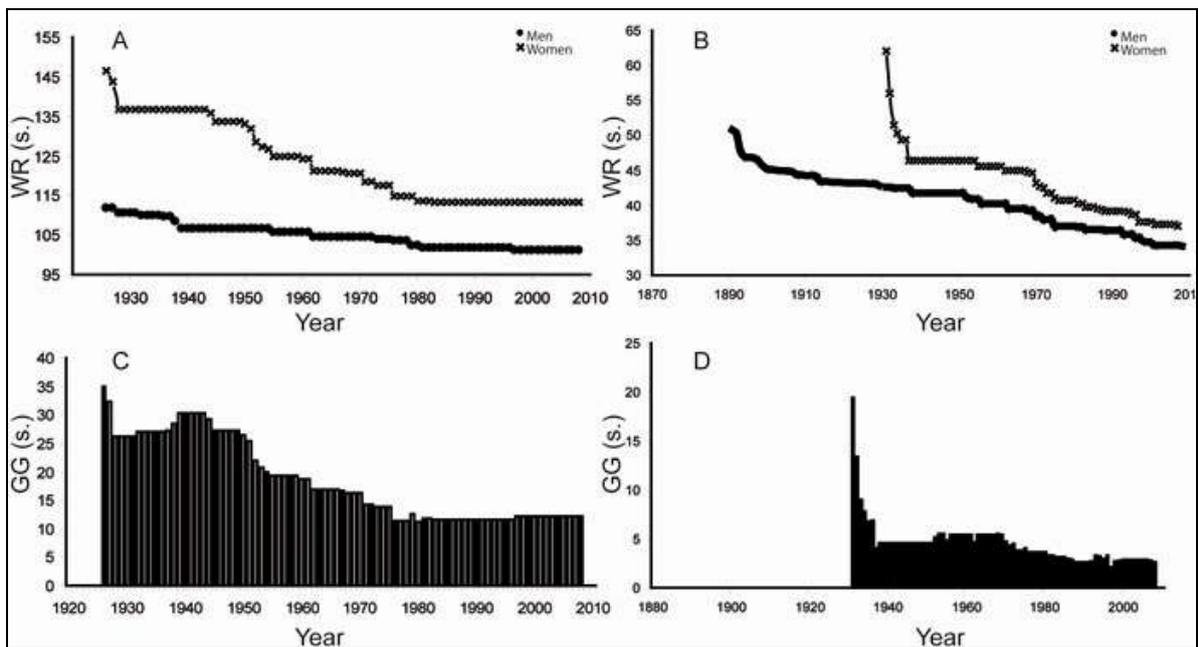


Figure C. Evolution de l'écart entre les sexes au cours de l'ère Olympique pour les records du monde. A. 800m (athlétisme) B. 500m (patinage de vitesse) C. 800m (athlétisme) D. 500m (patinage de vitesse) [56].

I.3. Âge et temps

Le déclin des performances sportives chez les élites est inévitable avec l'âge quel que soit le type de sport. La performance croît puis décroît de manière exponentielle avec le temps (Figures D et E) [20, 28, 59-63].

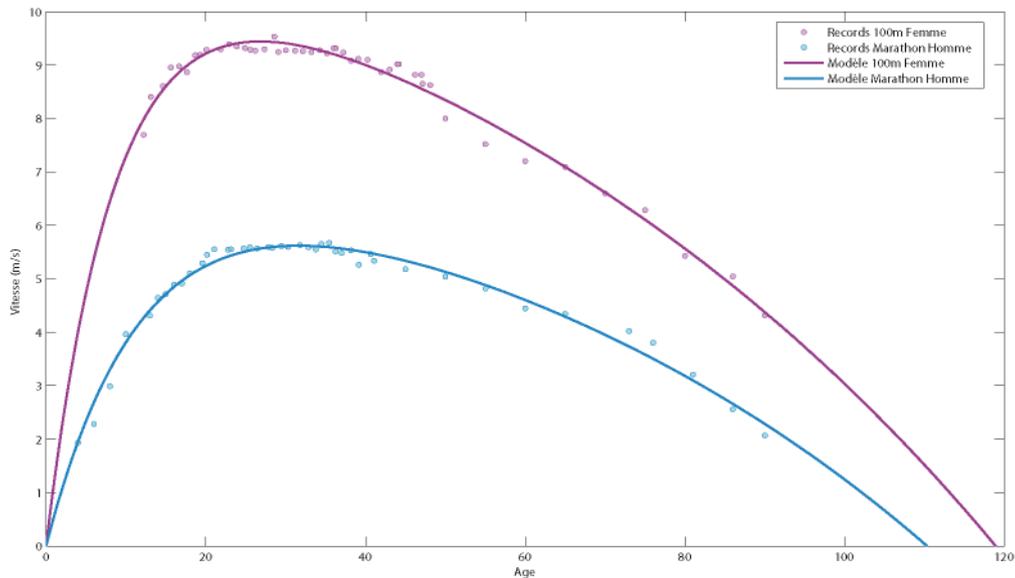


Figure D. Records de vitesse par âge, en athlétisme dans 1 épreuve de longue distance (marathon Hommes ; pic à l'âge de 31,6 ans) et une épreuve de vitesse (100m Femmes ; pic à l'âge de 26,8 ans) [61].

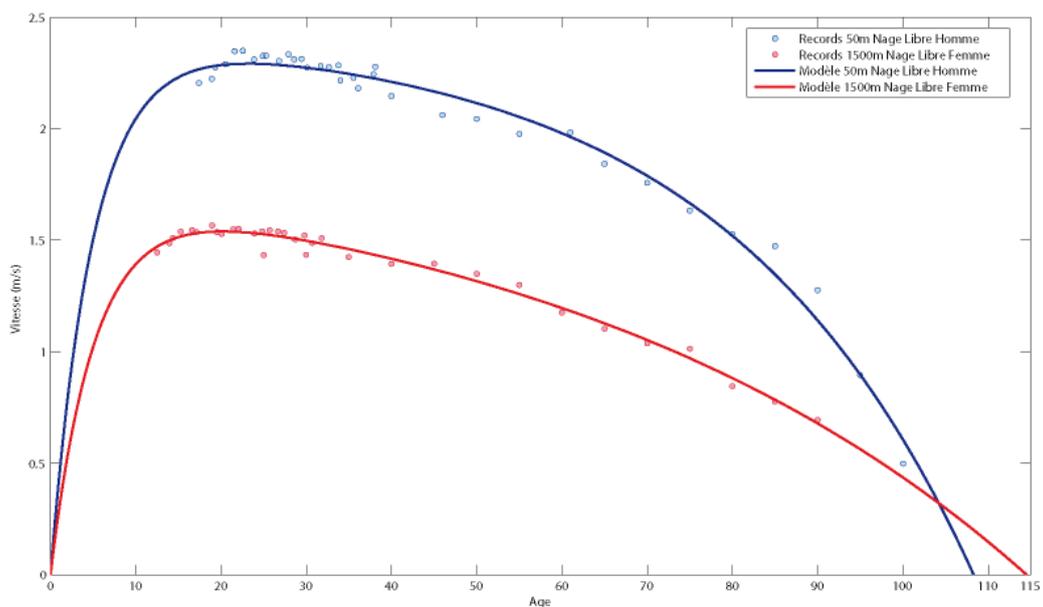


Figure E. Records de vitesse par âge, en natation dans 1 épreuve de longue distance (1500m nage libre, Femmes ; pic à l'âge de 20,2 ans), et 1 épreuve de vitesse (50m nage libre, Hommes ; pic à l'âge de 23,1 ans) [61].

Les performances sportives en fonction de l'âge suivent un modèle similaire pour tous les individus (athlètes d'endurance ou de force, élites et non-élites, population générale) et sont décrites par des lois de croissance-décroissance avec des pics de performances entre l'âge de 20 et 32 ans (Figures D et E). On retrouve cette fonction dans tous les sports : natation, athlétisme, tennis, basket-ball, escrime ... [28, 61, 62].

Le déclin des performances et des capacités fonctionnelles avec l'âge est attribuable à une réduction générale des fonctions cardio-vasculaires, respiratoires, métaboliques, neuromusculaires et cognitives [28, 59]. Les changements des déterminants physiologiques contribuant à cette baisse avec l'âge sont exposées en figure F.

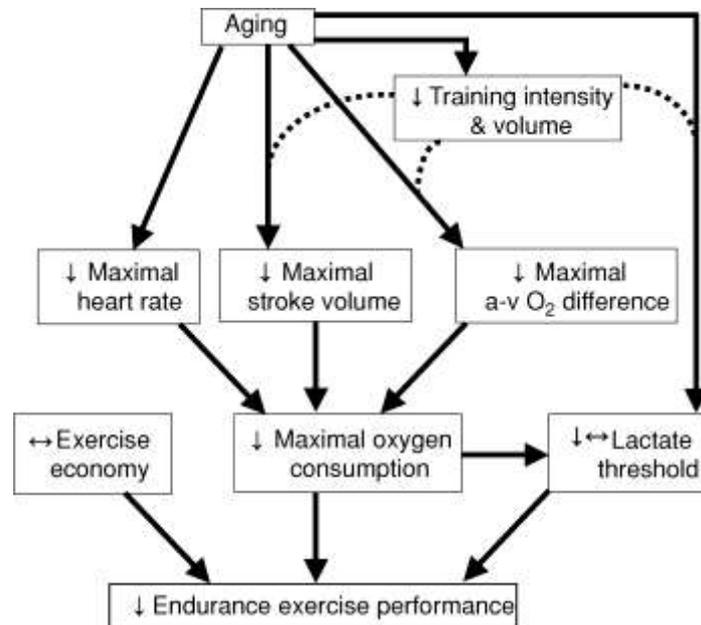


Figure F. Facteurs et mécanismes physiologiques contribuant à la réduction de la performance en endurance avec l'avancement en âge chez les adultes en bonne santé [28].

Le vieillissement se caractérise par une baisse progressive de la masse et de la force musculaires, des capacités d'adaptation et des mécanismes de régulation dont les conséquences sont la perte d'autonomie [59, 64, 65]. La perte de masse musculaire (sarcopénie) induite par le vieillissement conduit donc à un déclin des performances physiques [20]. Entre l'âge de 24 ans et 50 ans, on observe une diminution de 10% de la masse musculaire totale ; et au delà de 50 ans le muscle perd entre 0,5% et 1,4% de sa masse par an, totalisant ainsi une perte supplémentaire de 30% entre 50 et 80 ans [20]. La diminution de la masse musculaire est associée à une atrophie des fibres musculaires spécialement les

fibres de type II (rapides) [20, 64]. La force musculaire chez l'homme comme chez la femme atteint son pic entre l'âge de 20 et 30 ans. La perte de masse musculaire et l'atrophie des fibres de type II après l'âge de 60 ans sont associées à une diminution de la force musculaire à un rythme de 15% ou plus par décennie (-1,5% par an) [20, 60]. La puissance musculaire (Puissance = Force x Vitesse) diminue plus rapidement que la force musculaire ; la diminution de la puissance est associée à la perte de masse mais pourrait être aussi associée au changement d'activité neuronale et aux changements des propriétés intrinsèques du muscle [20, 64]. Une diminution de la capacité aérobie est également observée avec le vieillissement : la $VO_2 \text{ max}$ diminue d'environ 10% par décennie après l'âge de 25-30 ans chez les hommes et femmes sédentaires en bonne santé [20, 28]. La diminution inévitable de la $VO_2 \text{ max}$ avec l'âge est responsable de la réduction correspondante de la performance en endurance [28, 66] mais le principal facteur contribuant à la diminution du $VO_2 \text{ max}$, comme de tous les autres paramètres de performance avec l'âge, est tout simplement le temps [19, 61, 67].

Les athlètes de haut niveau qui deviennent sédentaires après leur carrière ont une diminution supérieure à la normale de la capacité maximale aérobie avec l'âge, alors que s'ils continuent de s'entraîner régulièrement, ils peuvent maintenir transitoirement leurs capacités [28]. La diminution du $VO_2 \text{ max}$ en fonction de l'âge chez les athlètes pratiquant des sports d'endurance semblent être due à des paramètres centraux (fréquence et débit cardiaques maximaux, volume d'éjection systolique maximal) et à des facteurs périphériques (extraction de l'oxygène mesurée par la différence maximale artériovoineuse en O_2) (Figure F ; Table A ; Table B).

	Young men (28 years)	Older men (60 years)	Age-related change (%)
Oxygen consumption ($\text{ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$)	68.2	49.4	28
Cardiac output (l min^{-1})	27.0	21.7	20
Stroke volume (ml beat^{-1})	147	132	10
Heart rate (beats min^{-1})	184	165	10
a-v O_2 difference (ml (100 ml)^{-1})	16.7	15.2	8

Table A. La consommation d'oxygène et de ses déterminants lors de l'exercice maximal chez les athlètes d'endurance, hommes [28].

Le débit cardiaque maximal diminue avec l'âge chez les adultes sédentaires proportionnellement à la baisse de la consommation maximale d'oxygène, il est inférieur chez les athlètes vétérans par rapport aux athlètes plus jeunes (Table A) suite à la diminution du volume maximal d'éjection systolique et de la fréquence cardiaque maximale [28].

La fréquence cardiaque maximale diminue avec l'âge à un taux d'environ 0,7 battements/min/an chez les personnes sédentaires, chez les personnes physiquement actives et chez les athlètes entraînés [28, 68]. Une vitesse de conduction plus lente, une sensibilité réduite du nœud sinusal à la stimulation β -adrénergique et une diminution de la fréquence cardiaque intrinsèque sont parmi les mécanismes qui contribueraient à la réduction de la fréquence cardiaque maximale avec le vieillissement [28, 66].

Le volume d'éjection systolique maximal chez les athlètes d'endurance âgés est de 10 à 20% inférieur à celui observé chez les jeunes athlètes d'endurance. La rigidité artérielle qui augmente avec l'âge, même atténuée par l'entraînement en endurance, pourrait contribuer à la réduction du volume d'éjection systolique maximal [28, 69].

La différence maximale artério-veineuse en O_2 reflète la capacité des muscles squelettiques actifs et des muscles respiratoires à extraire et consommer l'oxygène sanguin pour produire de l'ATP pendant un exercice maximal. Chez les sédentaires, cette différence artério-veineuse diminue nettement avec l'âge, en cohérence avec les réductions marquées de la densité capillaire et de l'activité enzymatique mitochondriale observées avec le vieillissement [28, 66]. Le déclin modeste de la différence artério-veineuse (5-10% sur une période d'environ 30 ans) chez les athlètes vétérans semble également contribuer à la diminution de la $VO_{2\max}$ avec l'âge (table A). Il serait plus probable que ce déclin reflète une diminution de la livraison d'oxygène aux muscles actifs (diminution de la perfusion tissulaire) plutôt qu'une diminution de l'extraction d'oxygène par les muscles [28, 70]. La baisse de la différence maximale artério-veineuse en O_2 peut être également secondaire à une perte liée à l'âge de la masse musculaire; la masse maigre influence la $VO_{2\max}$ via un effet sur la fonction circulatoire centrale impliquant le volume sanguin, le volume d'éjection systolique et le débit cardiaque [28, 71].

Les résultats de plusieurs études longitudinales ont confirmé que l'économie d'énergie ne change pas avec l'âge chez les athlètes vétérans entraînés en endurance, ainsi les diminutions de l'économie de l'exercice ne contribuent pas significativement à la diminution de la performance avec l'âge. Le maintien des fibres musculaires de type I avec le vieillissement pourrait contribuer à l'économie de l'exercice préservée chez les athlètes vétérans. Enfin, les vitesses et puissances atteintes au seuil de lactate diminuent avec l'âge chez les athlètes d'endurance. Cependant lorsque le seuil lactique est exprimé en fonction du pourcentage de la $VO_{2\max}$, il semble ne pas changer avec l'âge, suggérant que la contribution de la baisse du seuil de lactate à la diminution de la performance est secondaire à la diminution de la $VO_{2\max}$ [28, 72, 73].

Même si le déclin des performances sportives de haut niveau avec l'âge est inévitable, ceci ne veut pas dire que l'entraînement et la continuité de la pratique régulière d'une activité physique n'est pas bénéfique en terme de maintien des capacités fonctionnelles et musculaires et de maintien d'un bon niveau de forme physique.

En effet la sédentarité favorise un déclin plus rapide du statut fonctionnel et de la condition physique. La pratique régulière d'une activité physique apporte des bénéfices pour la santé et permet de retarder ou de ralentir certains processus délétères liés au vieillissement [20, 28, 63, 66, 74]. De plus l'exercice physique utilisé comme une mesure thérapeutique ou prophylactique est un sujet d'intérêt particulier dans la recherche portant sur la sarcopénie ; en effet l'entraînement régulier aurait des effets positifs sur les muscles squelettiques des adultes de tous âges, dont l'augmentation de la force et de la masse musculaires, l'augmentation de la synthèse des protéines, des changements dans la composition de la chaîne lourde de myosine, et l'augmentation de la proportion de cellules satellites [60, 75]. Les personnes actives ont des capacités cardiovasculaires et respiratoires supérieures, sont moins résistantes à l'insuline et ont une ré-amélioration des fonctions mitochondriales (réduites par l'âge) comparées aux personnes sédentaires [63, 65]. L'exercice est sans doute le moyen le plus simple et le plus efficace d'augmenter le nombre et d'améliorer la fonction des mitochondries ; les exercices d'endurance stimuleraient la biogenèse mitochondriale, augmenteraient l'expression et l'activité des enzymes mitochondriales et augmenteraient la capacité du métabolisme oxydatif des tissus [76].

De nombreux facteurs présumés contribuent à la longévité et au vieillissement : des facteurs inflammatoires et immunitaires, des éléments de réponse au stress, des médiateurs dans les métabolismes glucidiques et lipidiques, des composantes de la réparation de l'ADN et la prolifération cellulaire et des haplogroupes de l'ADN mitochondrial [77]. Il a été suggéré que les baisses liées à l'âge du nombre et des fonctions mitochondriales affectent non seulement la fonction physique mais jouent aussi un rôle majeur dans la régulation de la durée de vie. La pratique régulière d'exercices aérobies et un régime alimentaire sain peuvent augmenter l'espérance de vie grâce à des effets sur la mitochondrie [76]. Les gènes prédisposant à certaines conditions morbides, qui se manifestent en général plus tôt [77], coexistent avec des gènes plus particulièrement associés avec la longévité [78, 79] et sont en interaction permanente les uns avec les autres ainsi qu'avec l'environnement.

La pratique d'une activité physique semble améliorer l'immunité [80]. Les réponses immunitaires et inflammatoires optimales semblent être un élément vital pour la longévité

mais pas le seul, puisqu'il n'est pas encore clair si la longévité est une conséquence d'une bonne fonction immunitaire ou bien si les individus ayant des taux de survie élevés possèdent des facteurs génétiques et non génétiques qui les ont aidés à préserver un bon fonctionnement du système immunitaire jusqu'à des âges avancés. Il faudrait approfondir les recherches pour savoir comment le vieillissement affecte le système immunitaire et vice-versa comment le système immunitaire module le vieillissement à long terme [77].

Les athlètes pratiquant un sport de force (anaérobie) régulier ont une architecture, une masse et une fonction musculaires significativement supérieures, ainsi que des caractéristiques de contraction et une histologie musculaires significativement supérieures à celles des personnes sédentaires du même âge, et elles sont mêmes équivalentes à celles des plus jeunes [60, 75].

Les exercices de résistance pourraient donc être utilisés dans le traitement de la sarcopénie pour rétablir (mais avec des capacités limitées) la masse et la fonction musculaires chez les personnes âgées (Table B) et ainsi retarder ou minimiser leur perte ; le gain de force musculaire, même à un âge avancé, varierait entre 8 et 74% selon le type de muscle et l'état de la fonction musculaire [60, 65, 74, 75].

Le rôle de l'exercice dans la prévention de la détérioration des capacités et des fonctions physiologiques liée à l'âge a été étudié chez les athlètes vétérans (*masters*) qui expriment un phénotype maximal, repoussant transitoirement les effets physiologiques du vieillissement en raison de leur participation permanente à des exercices de haute intensité [28, 60]. Le nombre d'athlètes vétérans ne cesse d'augmenter, ils s'efforcent de maintenir et, dans certains cas, améliorent encore un peu les performances atteintes à un plus jeune âge. En effet, la performance maximale à l'effort des athlètes Masters continue d'augmenter chaque année [28, 60].

	Master Endurance Athletes	Young Endurance Athletes	Older Sedentary	Young Sedentary
Age (y)	61.5 ± 4.2	24.0 ± 3.4	59.7 ± 3.8	26.5 ± 3.5
VO _{2max} (ml/kg/min)	51.5 ± 4.5	65.4 ± 3.3	34.5 ± 3.3	44.6 ± 3.3
HR max (bpm)	170 ± 15	195 ± 7	170 ± 12	186 ± 12
LBM (kg)	56.6 ± 5.4	62.5 ± 6.0	63.3 ± 6.1	67.9 ± 6.1
% Body fat	15.4 ± 3.4	9.3 ± 3.4	22.0 ± 2.8	17.0 ± 3.4
Muscle fiber %	62.2 ± 13.8 Type I 37.8 ± 14.1 Type II	65.0 ± 11.2 Type I 35.0 ± 11.8 Type II	58.0 ± 15.0 Type I 42.0 ± 14.3 Type II	49.8 ± 10.4 Type I 52.2 ± 12.7 Type II
Muscle fiber area (µm ²)	5052 ± 1536 Type I 4447 ± 945 Type II	4658 ± 723 Type I 5755 ± 1651 Type II	4855 ± 1166 Type I 3885 ± 608 Type II	4234 ± 1145 Type I 5360 ± 957 Type II
<i>Note:</i> Average values calculated from multiple sources, mean ± SD (standard deviation). HR = heart rate; LBM = lean body mass.				

Table B. Comparaisons physiologiques entre athlètes et sédentaires chez les hommes jeunes et âgés [60].

L'influence des sports d'endurance sur les changements musculaires liés à l'âge a été plus fréquemment étudiée que l'influence des sports de force [60]. Cependant, plusieurs études ont suggéré que l'exercice d'endurance n'est pas suffisant pour maintenir la masse et la fonction musculaires avec l'âge, en montrant même que les sujets âgés entraînés en endurance ont les mêmes masses et forces musculaires (valeurs absolues) que les sujets âgés sédentaires [60]. Mais en exprimant la force musculaire par unité de masse maigre, les sujets âgés entraînés ont démontré une force supérieure aux sujets sédentaires, ce qui suggère que l'entraînement en endurance peut réduire la perte de force relative avec l'âge [60]. De plus ceci pourrait refléter l'adaptation des muscles des membres inférieurs (plus impliqués dans ces exercices) à l'entraînement chronique plutôt que l'incapacité de l'exercice d'endurance à influencer les changements liés à l'âge [60, 63]. Toutefois il est probable que l'influence de l'exercice d'endurance sur la masse et la force musculaire diminue au-delà de l'âge de 70 ans ; si on regarde par exemple les performances en marathon, on remarque un déclin aigu des performances après l'âge de 70ans [59-61, 63].

L'entraînement régulier ralentirait la perte de force et de puissance associées au vieillissement, et aiderait à maintenir la $VO_{2\text{ max}}$ (Table A); en effet les athlètes âgés entraînés auraient une diminution du $VO_{2\text{ max}}$ de 5% seulement par décennie (0.5% par an) alors que chez les sédentaires on observe une diminution du $VO_{2\text{ max}}$ de 1% par an et une diminution $VO_{2\text{ max}}$ de 1.5% par an chez les personnes de plus de 70 ans [20, 60, 63]. Les meilleures performances chez les athlètes âgés sont observées sur les épreuves de longue distance [20, 61, 67]. Etant donnée l'atrophie des fibres rapides observée avec le vieillissement, il n'est pas surprenant de voir qu'un grand nombre d'athlètes âgés choisissent de participer aux épreuves d'endurance qui dépendent des fibres musculaires lentes [20]. Des centaines de marathons sont organisés chaque année dans le monde, regroupant parfois plus de 30000 participants dont une part importante a plus de 50 ans (Figure G) [28, 63].

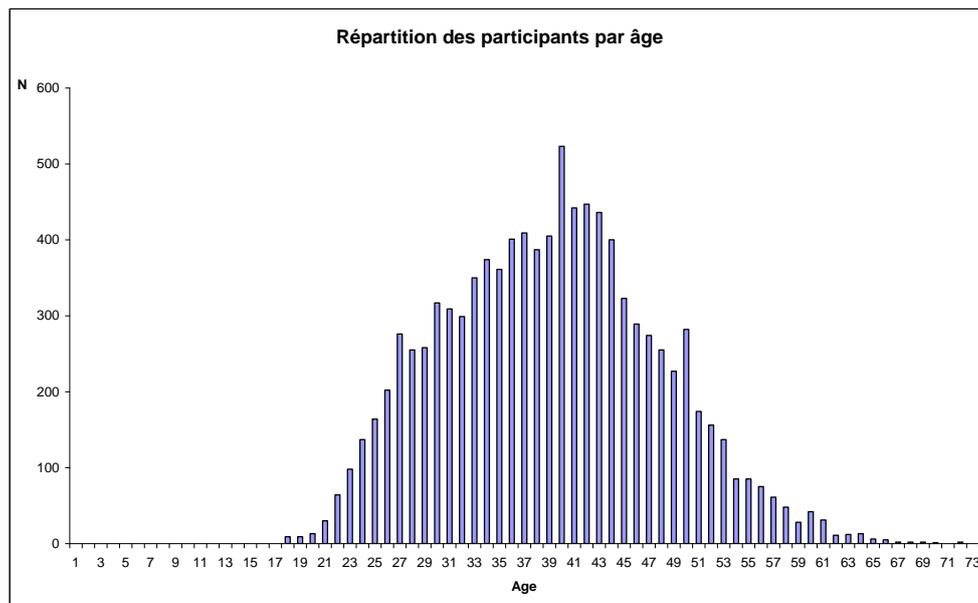


Figure G. Répartition par âge, des participants (hommes et femmes) au Marathon de New York en 2007: les coureurs ont entre 18 et 72 ans, avec un pic de participation à l'âge de 40ans, suivi par un léger pic à l'âge de 50ans. Il semblerait que lorsqu'une personne atteint un cap (quarantaine, cinquantaine) elle se lance le défi de participer et de courir le marathon [Données IRMES].

Ces données suggèrent que les exercices d'endurance sont insuffisants pour une maintenance optimale de la masse musculaire totale du corps et que les athlètes d'endurance pourraient bénéficier de l'ajout d'exercices de résistance à leur programme d'entraînement, qui combinerait endurance et résistance [60]. Il est important de noter que les bénéfices de l'exercice sont perdus au bout de 3 mois d'arrêt et qu'une activité physique régulière est essentielle pour le maintien des fonctions musculaires et de la condition physique [65]. Il serait important d'identifier le seuil minimal d'exercice nécessaire pour retarder le vieillissement ou alors suivre les recommandations déjà établies dont le consensus est de 30 minutes d'activité physique modérée au moins 5 fois par semaine (150 minutes par semaine) qui ne sont pas respectées par plus de 50% de la population générale [65, 81-83].

L'entraînement peut atténuer, retarder ou ralentir les processus du vieillissement, mais il ne l'empêche pas, et il n'empêche pas la baisse de la capacité aérobie, il existe donc des limites fixées par l'âge ; il est difficile d'imaginer un athlète de 50 ans courir le 100m plus rapidement qu'un athlète de 30 ans. L'avancement de l'âge est une limite inévitable aux performances sportives (Figures D et E) quel que soit le type de sport [28, 61, 63, 76]. En plus de la perte de masse musculaire et de la diminution du $VO_2 \text{ max}$ pour un même exercice, l'effort déployé pour l'accomplir n'est pas le même chez les jeunes et chez les plus âgés, la

fraction d'utilisation (le pourcentage) de VO_2_{max} durant cet exercice est plus élevé chez les vétérans [63].

En résumé, les athlètes vétérans d'endurance sont capables de performances remarquables et représentent un exemple unique de limitations des effets du vieillissement [28]. Néanmoins, il est inévitable que leurs performances sportives diminuent avec l'âge parallèlement aux performances de la population générale, tout en gardant des capacités physiques plus élevées. Le modèle de l'athlète Masters continue d'être une riche source d'information sur les capacités de l'être humain à maintenir des performances maximales malgré le vieillissement [28].

Malgré les multiples interventions de l'homme pour améliorer la santé, éviter les décès prématurés et prolonger l'espérance de vie, il semble que nous sommes, à ce stade, impuissants face aux temps qui passe et aux nombreux changements cellulaires délétères qui conduisent à un phénotype de sénescence et finalement à la mort [19, 76].

II – TECHNOLOGIE

Pendant des décennies, les athlètes ont cherché à maximiser leurs performances par le biais de l'augmentation de la force musculaire, de la vitesse et de la puissance, identifiant les équipements et les techniques d'entraînement qui améliorent les performances [20]. Avec l'expansion des connaissances en physiologie musculaire et en biomécanique, avec les techniques d'entraînement plus pointues et les avancées technologiques dans les matériels et

équipements sportifs, les athlètes ont repoussé leurs limites et ont fixé de nouveaux seuils qui déterminent les performances maximales. Les sciences et nouvelles technologies jouent un rôle de plus en plus important en permettant aux athlètes d'augmenter et d'optimiser leur performance. Les équipements et matériels développés pour la performance optimisent les propriétés intrinsèques du muscle, améliorent la transmission de la force musculaire à son environnement ou préviennent les blessures [20]. La technologie permet également, par le biais de la modélisation par exemple, d'observer l'évolution des performances sportives, d'identifier les limites humaines et de prédire les futures performances [17].

La compétition sportive se tourne davantage vers la technologie et vers les industries permettant ces innovations. On l'observe dans plusieurs sports : patinage de vitesse, cyclisme, natation... où les innovations technologiques récentes ont révolutionné les performances [20, 84].

II.1. Patinage de vitesse (Speed Skating)

Sport Olympique depuis 1924, il subit plusieurs changements au niveau du matériel et du style de patinage. La perte de vitesse en patinage est majoritairement due aux forces de frottement (80% à cause de la résistance de l'air et 20% en raison du frottement du patin sur la

glace) et de nombreuses avancées technologiques ont permis la réduction de ces frictions [20, 85, 86].

Modification de l'environnement sportif

L'introduction des patinoires de 400m artificiellement réfrigérées et entièrement couvertes en 1987 a permis de diminuer considérablement la friction de la glace pour un entraînement sur des distances olympiques [85]. La disponibilité de ces équipements tout le long de l'année a massivement augmenté le nombre total d'heures d'entraînement spécifique. Dans les années 1950, les athlètes ne pouvaient patiner que pendant 3 mois de l'année (environ 60 jours de patinage par an, souvent avec des séances abrégées en raison de conditions météorologiques très dures). Avec l'avènement des patinoires couvertes dans les années 1980, le nombre de jours de patinage par an des patineurs professionnels a considérablement augmenté à plus de 200 jours par an, ce qui a largement contribué à l'amélioration des performances [85].

Modification des outils de la performance

(i) Tenues

Dans les premières compétitions les patineurs portaient un maillot en tricot, un pantalon bien serré et souvent un bonnet de laine. Cette tenue a été remplacée en 1974 par une combinaison d'une pièce en lycra, collée le long du corps. Ces combinaisons ont été améliorées en 2002 avec l'ajout de patches lisses pour réduire davantage les forces de frottement de l'air [85, 86].

(ii) Patins

En 1997 apparaît un nouveau système à ressorts dans les patins, les klaps (ou klapskates). Ce système réduit la friction de la glace, en permettant à la lame de rester maintenue à plat sur la glace tout le long du mouvement de glisse pendant l'extension de la cheville [20, 85, 87]. L'amélioration de la vitesse est due à l'augmentation du nombre de mouvements de glisse et à l'augmentation du travail mécanique effectué par le muscle (quadriceps) durant le mouvement de glisse donc à l'amélioration de l'efficacité. L'avantage majeur des klaps est donc de permettre aux quadriceps de générer une force supérieure ainsi qu'un travail mécanique et une puissance musculaire plus importants, élevant le rendement énergétique. Suite à leur autorisation dans les compétitions internationales en 1997, tous les records du monde en patinage de vitesse furent battus lors des Jeux Olympiques de Nagano en 1998 par les patineurs portant les patins à klaps (Figure H). Ces nouveaux patins permettent une amélioration de la vitesse de 5% par rapport aux patins conventionnels [20, 85, 87].

Une étude modélisant les performances en patinage de vitesse a suggéré que le progrès observé dans les records du monde provient à moitié des avancées technologiques et l'autre moitié par l'amélioration physiologique [85]. Davantage de bénéfices pourraient encore être tirés des klaps. En effet des recherches expérimentales et de simulation informatique montrent actuellement que la performance en patinage est influencée par la position du corps de l'athlète. La position optimale varie d'un patineur à un autre, en fonction de son anthropométrie, sa physiologie musculaire et sa biomécanique de patinage [86]. Par conséquent les recherches futures axées sur les klapskates et développant des modèles individuels personnalisés, pourraient améliorer davantage les performances en patinage de vitesse [20].

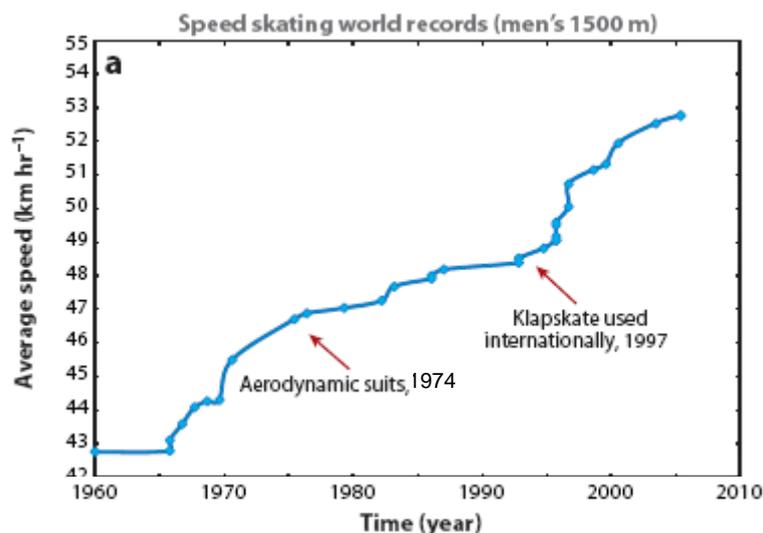


Figure H. Influence des avancées technologiques et des équipements sur les records du monde de vitesse en patinage depuis 1960 dans l'épreuve du 1500m hommes [20].

II.2. Natation

La vitesse maximale d'un nageur est déterminée par l'équilibre entre la propulsion générée par le nageur et par les forces résistantes dans l'eau : forces de frottement, vagues (turbulences) et forces de pression [20, 88, 89]. La plus importante est la pression de

résistance résultant de la différence entre la pression à l'avant et la pression à l'arrière du corps du nageur, qui crée des flux turbulents tout le long du corps. L'ampleur de cette résistance dépend de la forme, de la superficie, de la vitesse et de l'orientation du corps par rapport au flux relatif de l'eau. La résistance due aux vagues est produite lorsque le nageur déplace l'eau et forme des vagues, résultant en une perte d'énergie cinétique. Les forces de frottements sont produites lorsque l'eau s'écoule à la surface du nageur et dépendent de la surface immergée [20, 88, 89].

Modification de l'environnement sportif

La FINA (Fédération Internationale de Natation) autorisa la construction de piscines visant à dissiper les turbulences de l'eau et à minimiser les forces de résistance en incorporant des séparateurs de couloirs dissipant les vagues ou des conduits latéraux pour empêcher leur formation et en augmentant la profondeur des piscines. Tout ceci permet aux nageurs d'accroître leur vitesse.

Modification des outils de la performance

(i) Tenues

Le facteur qui a le plus contribué à l'amélioration des performances fut la combinaison. Conçue dans un tissu très léger, flexible et résistant, avec des panneaux hydrophobes soudés aux ultrasons et moulés de façon à comprimer le corps et limiter les surfaces de résistance, elle a permis aux nageurs de garder une position optimale dans l'eau [20, 89] mais surtout de limiter considérablement les micro et macro-turbulences.

Les combinaisons de première génération (1[°]G) ont été officiellement autorisées par la FINA en Octobre 1999. Celles de deuxième génération (2[°]G), autorisées en Février 2008, ont été élaborées en collaboration avec des ingénieurs de la NASA et fabriquées avec une technologie innovante sans couture. Elles incorporent des plaques de polyuréthane entraînant une forte réduction des frottements. Enfin, celles de troisième génération (3[°]G) sont des dérivés de la version précédente et sont presque intégralement faites de polyuréthane. Elles ont été principalement utilisées en 2009 [89].

En 2008, de nouveaux records du monde ont été établis dans 29 épreuves de natation sur 40 (73%) chez les hommes et les femmes. Aux Jeux Olympiques de Pékin en 2008, 25 records du monde ont été battus dont 23 (92%) par des nageurs portant les combinaisons en

polyuréthane de 2^eG ; de plus les nageurs portant la combinaison ont gagné 94% des médailles d'or et 89% du total des médailles, ainsi que toutes les épreuves masculines de la compétition [20, 89]. Suite à l'effet non négligeable des combinaisons sur les performances et au nombre très élevé de nouveaux records du monde battus en un laps de temps très court, la FINA a reconsidéré le règlement et a décidé d'interdire l'utilisation des combinaisons à partir de janvier 2010 n'autorisant que le port de bermudas ; en revanche l'utilisation de starting-blocks inclinés a été autorisée [20, 89].

Notre étude récente [89], a analysé l'impact de cette innovation technologique, en quantifiant le gain apporté par les trois générations sur les performances des nageurs, et en prédisant une baisse de performance en 2010. La version originale et intégrale de l'article est disponible en annexe 4.

L'évolution des performances des 10 meilleurs nageurs dans 34 épreuves a été analysée de 1990 à 2009 (6790 performances). Trois pics de progression ont été observés en 2000, 2008 et 2009 ; ils correspondent à l'année d'introduction de chaque combinaison.

Les valeurs moyennes des gains par année sont les suivantes: 0,74% ± 0,26% (2000); 1,16% ± 0,48% (2008); 0,68% ± 0,55% (2009) pour les épreuves masculines et 1,00% ± 0,37% (2000); 0,97% ± 0,57% (2008); 0,27% ± 0,70% (2009) pour les épreuves féminines. Les valeurs moyennes cumulatives pour les trois années sont de 2,58% ± 1,29% pour les hommes et de 2,24% ± 1,64% pour les femmes. Les hommes ont le plus bénéficié de la 2^eG alors que les femmes ont le plus bénéficié de la 1^eG (2000). Ceci suggère que la compression de certaines parties anatomiques (comme la poitrine et les fessiers) par la combinaison 1^eG a été le facteur clé des progrès réalisés depuis 1999, qui a réduit les forces de frottement et de turbulences dans l'eau, et a conduit à l'amélioration des performances [89].

Avec les règlements actuels de la FINA, les records seront beaucoup plus difficiles à battre et la baisse des performances est estimée à un retour au niveau antérieur (Figure I).

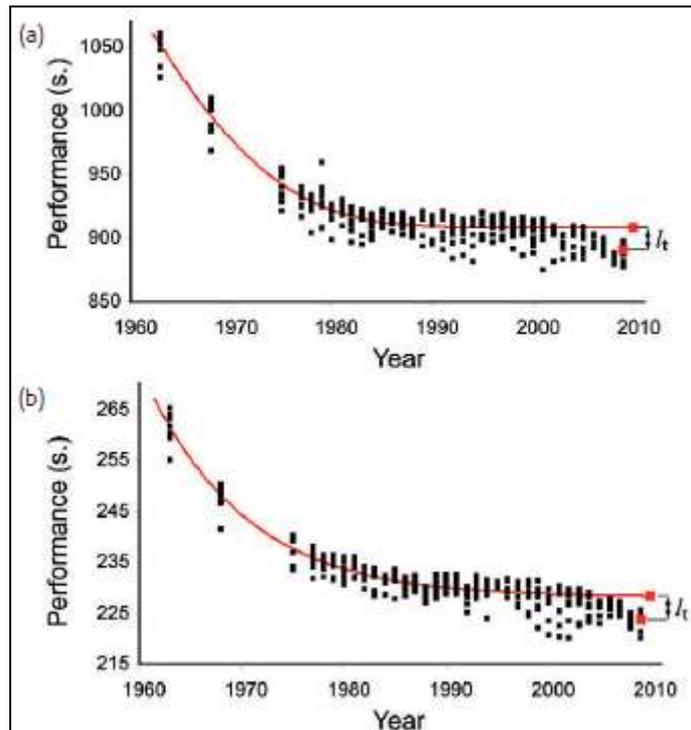


Figure I. Prédiction de baisse de performance (a). 1500 m nage libre hommes (b) 400 m nage libre hommes. Le modèle (ligne rouge) est ajusté à la performance (carrés noirs) de 1963 à 1999 et extrapolé en 2010. La baisse de performance estimée (t_t) est de 2,12% pour le 1500m et 2,10% pour le 400m [89].

Les résultats actuels à la fin de la saison 2010 nous montrent que le recul des performances est inférieur à celui estimé dans notre étude ; il est de l'ordre de 1,8% chez les hommes (vitesses moyennes des 100m et 200m en dos, nage libre, brasse et papillon) et de 1,4% chez les femmes (Figure J, données IRMES).

Il semblerait que l'utilisation par les nageurs des bermudas encore autorisés, des « jammers », et des starting-blocks ait réduit la perte de performances constatée en 2010. De plus les combinaisons toujours utilisées par les nageurs pendant l'entraînement auraient peut-être favorablement influencé et amélioré les techniques de nage.

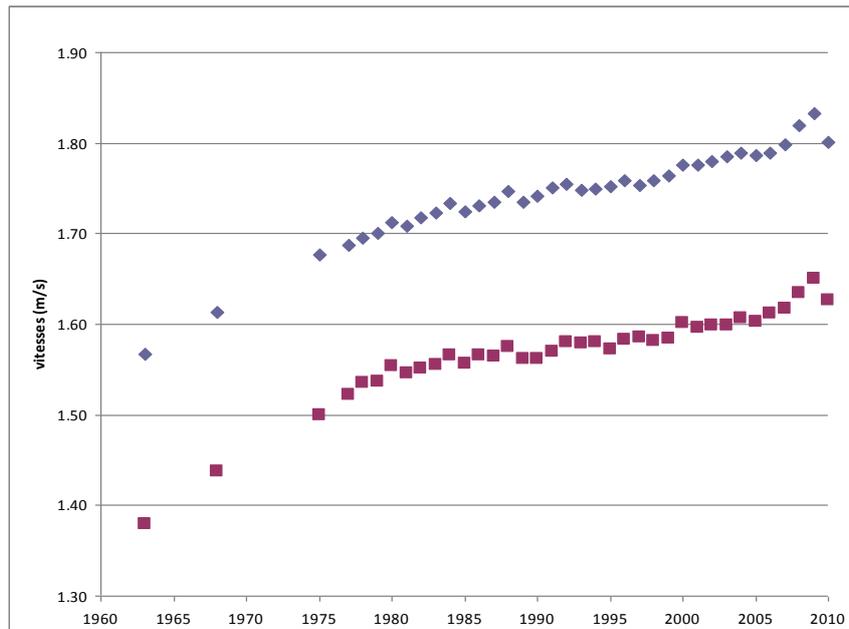


Figure J. Moyenne annuelle des vitesses des 10 meilleurs nageurs des épreuves du 100m et 200m (NL-Dos-Bra-Pap). Hommes (points bleus) ; Femmes (points violets) [Données IRMES].

Aujourd'hui, la science des matériaux est devenue un déterminant majeur de la victoire sportive. Les avancées technologiques dans la conception des nouvelles piscines et des nouvelles combinaisons furent à l'origine d'améliorations soudaines de performances et ont permis aux athlètes de dépasser les limites physiologiques déjà presque atteintes [20, 49, 89].

II.3. Cyclisme

En cyclisme, les trainées aérodynamiques comptent pour 90% des forces résistantes que doivent surmonter les coureurs lancés à grande vitesse. La technologie s'est donc focalisée sur la réduction de ces trainées afin d'augmenter la vitesse de course ; les matériels aérodynamiques se sont perfectionnés avec le temps et ont mené à des polémiques concernant la distinction entre les records de vitesses qui reflètent les capacités et compétences réelles du cycliste et ceux qui sont établis grâce aux équipements technologiques [8, 20, 55, 90].

A. Cyclisme sur piste

La course au Record de l'heure illustre parfaitement cette controverse (Figure K). Il s'agit d'une course sur circuit fermé où il faut parcourir la plus grande distance possible en 60 minutes : la distance maximale parcourue dans cette épreuve a plus que doublé depuis sa création en 1876. Le record de l'heure a bénéficié d'améliorations spectaculaires : il fut battu six fois entre 1993 et 1996, suite à l'autorisation à partir de 1984 par l'UCI (Union Cycliste Internationale) des vélos comprenant des innovations aérodynamiques (Figure K). Des perfectionnements additionnels intervenant sur la position de course (position couchée, non conventionnelle) ont encore réduit les forces de traînée [8, 20, 55, 90].

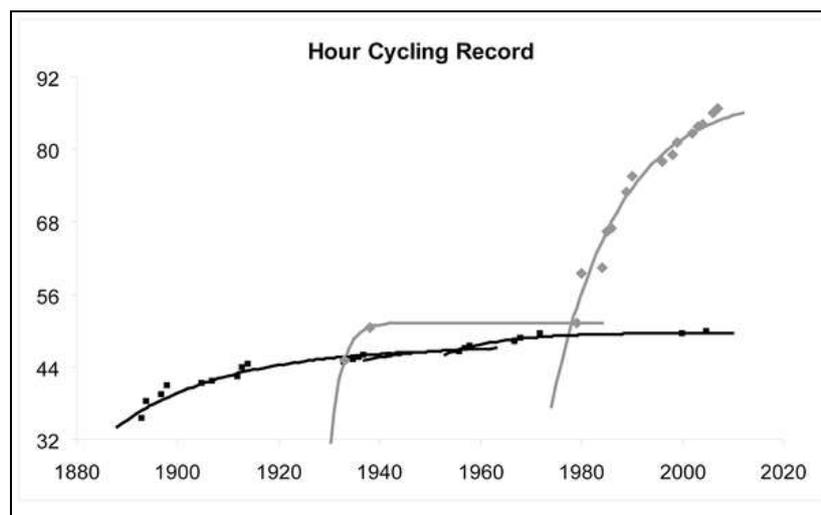


Figure K. Evolution du Record de l'Heure (en kilomètres). Les lignes et carrés noirs représentent les records validés par l'UCI (Union Cycliste Internationale). Les lignes et losanges gris représentent les records validés par l'IHPVA (Human Powered Vehicle Association) [8].

Dans quelle mesure les améliorations constatées ces dernières années sont-elles dues à l'augmentation de la puissance des cyclistes (physiologie), et dans quelle mesure sont-elles dues aux améliorations technologiques ? En modélisant et comparant les performances du record de l'heure, Basset et al [90], ont conclu qu'après 1967, environ 60% de l'amélioration des performances s'est faite grâce aux progrès technologiques, et 40% grâce à l'amélioration physiologique des cyclistes.

Comme la FINA en 2010, l'UCI a reconsidéré et modifié ses règlements en 2000, en interdisant les vélos aérodynamiques et exigeant le retour des vélos similaires à celui d'Eddy Merckx en 1972, afin d'éviter que le record de l'heure ne soit principalement influencé par les équipements technologiques [8, 20, 55]. Ainsi les records établis entre 1972 et 2000 furent déclassés et assimilés à l'IHPVA (International Human Powered Vehicle Association) qui autorise toute sorte de matériels et d'équipements et tous types de conceptions de vélos (Figure L). Les avancées technologiques que ce soit dans la conception de nouveaux équipements, ou dans la pharmacologie, se poursuivent dans le cyclisme [8, 20, 55].



Figure L. Vélo couché de type « Varna Diablo » autorisé par l'IHPVA. Sam Whittingham, actuel détenteur du record de l'heure, de 90,6 km, utilisa ce modèle de vélo non conventionnel [91].

B. Cyclisme sur route

Le cyclisme sur route évolue-t-il comme le cyclisme sur piste ? Nous avons étudié l'évolution des performances en cyclisme sur route depuis les premières éditions jusqu'en 2009. La version française de l'article publié en mai 2010 dans le *Journal of Sports Sciences* [55], est présentée ci-dessous ; la version originale en anglais est disponible en annexe 5.

Le Tour de France, le Giro, la Vuelta et les grandes courses cyclistes européennes montrent une progression unique de la vitesse dans les 20 dernières années

Abstract

Le cyclisme sur route fait partie des épreuves d'endurance les plus intenses. Les études qui ont jusqu'à présent décrit ce sport n'ont pas analysé les performances en elles-mêmes mais ont modélisé les paramètres influençant la performance. Notre étude décrit l'évolution des performances en cyclisme sur route dans les 116 dernières années. Nous avons étudié les vitesses des dix premiers coureurs de huit courses classiques et des trois grands tours européens selon un modèle multi exponentiel récemment publié qui révèle les différentes périodes de progression d'une discipline au cours du siècle. Nous avons également calculé un indice d'ascension du Tour de France (altitude totale des cols grimés sur distance totale de la course) pris comme l'un des indicateurs de la difficulté de l'épreuve.

La vitesse moyenne des onze courses a progressivement augmenté de 23,13 km.h⁻¹ en 1892, à 41,19 ± 2,03 km.h⁻¹ en 2008. L'évolution des performances en cyclisme sur route est similaire aux autres sports : elle suit une loi de progression multi-exponentielle par séries avec trois périodes : avant la première guerre mondiale, entre-deux-guerres et après la deuxième guerre mondiale. Cependant, une quatrième période apparaît en 1993 avec une amélioration des vitesses de 6,38%. L'indice d'ascension montre une relation paradoxale avec la vitesse : dans la période 1990 – 2008, lorsque la difficulté augmente, la vitesse des cyclistes augmente aussi, contrairement aux décennies précédentes.

Ces résultats quantifient donc une amélioration majeure des performances en cyclisme sur route dans les vingt dernières années et questionnent le rôle de paramètres extra-physiologiques dans cette progression.

INTRODUCTION

Le cyclisme sur route fait partie des épreuves d'endurance les plus intenses ; ses compétitions ont lieu dans des conditions très variables. Les paramètres qui influencent la performance en cyclisme sont nombreux regroupant des facteurs externes et internes. Les facteurs externes incluent le climat et l'environnement (paramètres non contrôlables, [92, 93]), le développement de matériels technologiques et aérodynamiques [94], les caractéristiques de

course (longueur, profil et difficulté de la course; [95, 96]), et les avancées scientifiques (médecine, nutrition et pharmacologie). Les facteurs internes incluent le profil du cycliste exprimé par sa physiologie, sa génétique, ses bio-marqueurs et son anthropométrie [92-96]. D'autres paramètres incluent l'amélioration des équipements, visant à réduire la traînée aérodynamique, des techniques d'entraînements, les stratégies et les tactiques de courses, cherchant à optimiser l'énergie individuelle des coureurs pour les efforts majeurs : échappées, ascensions de cols et sprints [94]. L'UCI (Union Cycliste Internationale), les organisateurs de courses et les fédérations cyclistes ne reconnaissent pas de records du monde officiels en cyclisme sur route, mais répertorient les temps et vitesses moyennes des coureurs pour chaque course ; les performances peuvent ainsi être quantifiés en vitesse moyenne (km.h^{-1}). La majorité des études et modèles mathématiques ayant analysé ce sport, n'ont pas mesuré les performances sur ce paramètre, supposant que les vitesses moyennes ne seraient pas comparables d'année en année en raison de la fluctuation des conditions externes. Elles ont le plus souvent modélisé les performances exprimées par rapport à la puissance maximale [90, 97-99].

Notre objectif est d'étudier l'évolution des performances en cyclisme sur route par la mesure des vitesses moyennes des coureurs, selon le modèle multi-exponentiel précédemment publié [17], avec l'hypothèse que ce sport suit un modèle de progression similaire aux autres.

MÉTHODES

Les vitesses moyennes des dix premiers coureurs ainsi que les records de vitesse ont été mesurés dans onze courses classiques et tours européens.

Données

Les données récoltées pour les onze courses incluent la distance totale D (km) de chaque course et le temps total T (h) des dix premiers coureurs chaque année de 1892 à 2008. Un total de 8540 performances dont celles des 854 vainqueurs ont été obtenues par l'Association Mémoire du Cyclisme [100], le site internet de La Gazzetta Dello Sport [101], du Web Oficial de la Vuelta a España [102] et du site officiel du Tour de France [103]. Les performances exprimées en vitesse moyenne (km.h^{-1}) ont été calculées à partir des données récupérées :

$$\text{Vitesse Moyenne} = \frac{D}{T}$$

Trois catégories de courses ont été étudiées: 4 courses en ligne d'une journée ayant des distances allant de 200 à 290 km (Milan-San Remo débuté en 1907, Paris-Roubaix 1896,

Flèche Wallonne 1936 et Liège-Bastogne-Liège 1892); 4 courses à étapes (Paris-Nice créé en 1933, Dauphiné Libéré 1947, Quatre Jours de Dunkerque 1955 et Midi Libre 1949) avec des distances variant entre 500km (les premières éditions) et 2100km sur 4 à 6 jours de compétition; et les 3 grands Tours (Tour de France (TDF) 1903, Giro d'Italia 1909 et Vuelta a España 1935) avec des distances allant de 2250 km à 5750 km sur habituellement 3 semaines de compétition. Les vitesses moyennes des vainqueurs ainsi que celles des dix premiers coureurs ont été calculées pour chaque course et pour chaque catégorie.

Analyse descriptive des courses

Les profils (cols et sommets à grimper) des TDF ont été intégrés depuis 1960 (pas de données disponibles avant 1960) jusqu'en 2008 en tant qu'altitude totale des cols grimps A (m). « A » est calculée par la somme des altitudes de l'intégralité des cols (toutes catégories) et sommets grimps durant une course. Ces données ont été récupérées grâce aux mêmes sources mentionnées ci-dessus et vérifiées par les sources géographiques institutionnelles (Institut Géographique National) [104]. Un indice d'ascension (IA, ‰) a été calculé en divisant l'altitude totale des cols grimps (A [m]) par la distance totale (D [km]) de la course :

$$IA = \frac{A}{D}$$

Description du Modèle

L'évolution des performances annuelles de chaque course a été modélisée par le modèle multi-exponentiel précédemment publié [17] :

$$y_j(t) = \Delta \cdot \exp^{(-a_j \cdot t)} + b_j \quad (1)$$

Où:

- y est la performance estimée à l'année t
- j est la période étudiée
- Δ est la tendance d'évolution des performances: $\Delta = p_{i,j} - p_{f,j}$ ou $p_{i,j}$ et $p_{f,j}$ sont respectivement les valeurs de la performance initiale et de la performance finale. En cyclisme sur route la valeur du Δ est négative (-) puisque la valeur de $p_{i,j}$ est inférieure à la valeur de $p_{f,j}$.
- a_j est le facteur de courbure positive.
- b_j est la limite asymptotique.

- t' a été précédemment défini par Berthelot et al. [17]:

$$t'_j = \frac{t_j - t_{i,j}}{t_{f,j} - t_{i,j}}$$

Où :

- t' est l'année de la performance après la transformation linéaire de t ;
- $t_{i,j}$ et $t_{f,j}$ sont respectivement les années des performances initiale et finale au cours de la période j . Cette uniformisation de t dans l'intervalle $[0, 1]$ assure que la fonction objective soit bien définie pour toutes les valeurs de t .
- Les performances initiale et finale d'une période sont la première et la dernière performance (y) d'une période étudiée j .

Les coefficients a et b sont obtenus par régression non linéaire des moindres carrés et les prédictions estimées (nombre et années des périodes, valeurs asymptotiques des vitesses) sont calculées pour la dernière période de chaque course avec un intervalle de crédibilité, en utilisant la méthode de Monte Carlo. Les coefficients estimés par le modèle sont ensuite utilisés pour tirer 10 000 nouveaux coefficients dans une distribution normale bidimensionnelle [17]. Ces nouveaux coefficients sont ensuite réintroduits dans le modèle pour produire 10 000 valeurs. On utilise le 2,5^{ème} percentile, la médiane et le 97,5^{ème} percentile de ces 10 000 valeurs pour obtenir l'erreur de prédiction de l'année estimée à 99.95% de la valeur asymptotique prédite. L'intervalle de crédibilité [105] est obtenu par la moyenne des 2,5^{ème} et 97,5^{ème} percentile pour toutes les courses.

Pour chaque course, le modèle multi-exponentiel estime les périodes principales de progression. Une période est un laps de temps défini par une série de performances consécutives et déterminé par une rupture de pente. Pour définir les périodes, une procédure itérative basée sur la sélection des r^2 ajustés a été retenue [17]. L'algorithme est initialisé par les 3 premières performances, ensuite la série est modélisée en ajoutant une à une les performances suivantes selon l'équation (1). Pour chaque série modélisée, le r^2 ajusté est obtenu et les années où apparaissent les maximums locaux de ces r^2 sont sélectionnées. Ces maxima correspondent aux ruptures de pentes, marquant ainsi le début d'une période nouvelle. Une période est de 6 ans au minimum et contient au moins 3 performances.

Performance moyenne des 11 courses

La vitesse moyenne des vainqueurs des onze courses a été calculée chaque année comme indicateur de l'évolution des performances en cyclisme sur route.

Analyse des 10 meilleurs

En plus des vainqueurs, nous avons calculé la vitesse moyenne annuelle (km.h^{-1}) des dix meilleurs coureurs des onze courses. Les déviations standard de ces moyennes ont également été calculées pour chaque course et pour les moyennes des onze courses, afin de mesurer le coefficient de variation. Le coefficient de variation ($cv(t)$) annuel de toutes les courses est défini comme suit :

$$cv(t) = \frac{\sigma_{p(t)}}{p(t)}$$

Où:

- $p(t)$ = moyenne des 10 performances à l'année t
- $\sigma_{p(t)}$ = déviation standard du vecteur de performance;
- $mcv(t)$ = moyenne annuelle (1892 - 2008) des coefficients de variation des 11 courses.

Records de vitesse

Nous avons modélisé les records de vitesse de chaque course ; les records étant les meilleures performances successives jamais enregistrées.

RESULTATS

Vitesse Moyenne Cycliste

L'évolution de la vitesse moyenne en cyclisme est présentée dans la figure 1. Cette courbe montre la progression annuelle des 10 meilleurs cyclistes des onze courses, marquée par 4 périodes. L'évolution de la vitesse des vainqueurs est similaire à celle du top 10.

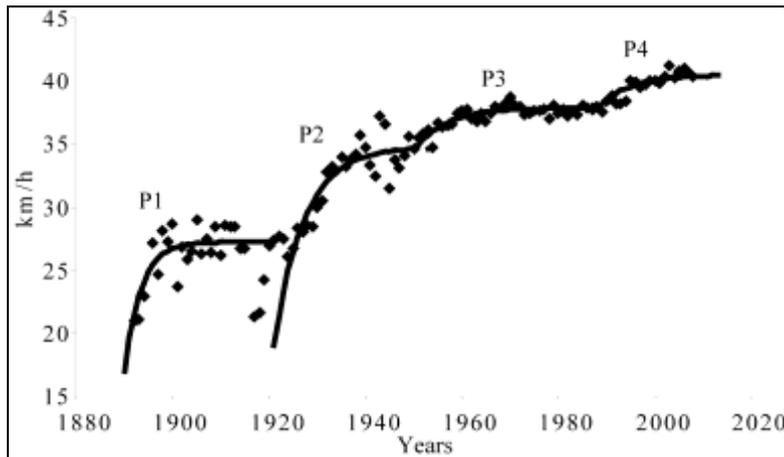


Figure 1. Courbe de progression de la vitesse moyenne des 10 premiers cyclistes dans 11 courses classiques Européennes. On distingue 4 périodes de progression ; les 3 premières sont séparées par les guerres mondiales (P1 à P3). Une quatrième période (P4) apparaît en 1993.

Les vitesses des vainqueurs ont évolué de $23,13 \text{ km.h}^{-1}$ en 1892 (Liège-Bastogne-Liège, Figure 2) à $45,81 \text{ km.h}^{-1}$ (Milan San Remo, 1990). La vitesse moyenne sur l'ensemble des courses au début du 20^e siècle était de $26,44 \pm 2,56 \text{ km.h}^{-1}$ augmentant jusqu'à $41,19 \pm 2,03 \text{ km.h}^{-1}$ en 2008. Les courses en ligne ont les distances les plus courtes et les valeurs de vitesses les plus élevés (Table 1).

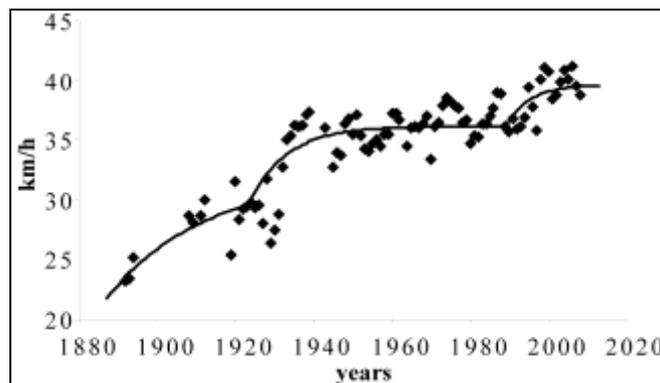


Figure 2. Courbe de progression des vainqueurs de la course Liège-Bastogne-Liège. Une nouvelle période apparaît après 1990 avec une amélioration de la vitesse de 5,07% (R^2 moyen = $0,54 \pm 0,1$).

Catégorie	Date de la première édition (année)	Vitesse de début (km.h ⁻¹)	Dernier Record de Vitesse (km.h ⁻¹)
Courses en ligne	1907,8 ± 19,8	28,17 ± 4,51	44,05 ± 2,03
Courses à étapes	1946,0 ± 9,3	35,99 ± 2,80	43,16 ± 2,54
Tours	1915,7 ± 17	27,16 ± 1,44	41,53 ± 1,14
Moyenne 11 courses	1923,8 ± 22,8	30,74 ± 5,14	42,88 ± 2,02

Table 1- Courses par catégories : Les courses en ligne ont les distances les plus courtes; elles sont les premières courses du siècle (année 1907 ± 19,8) et sont les plus rapides (record: 44,05 ± 2,03 km.h⁻¹). Les courses à étapes ont débuté après la deuxième guerre mondiale (année 1946 ± 9,3) et elles ont les vitesses de début les plus élevées (35,99 ± 2,80 km.h⁻¹). Les Tours sont les courses les plus longues et par conséquent sont les moins rapides (record: 41,53 ± 1,14 km.h⁻¹).

La période 1 (Figure 1) correspond au commencement de la discipline, avant la première guerre mondiale. Une seconde période est évidente entre les deux guerres, où l'on observe la plus grande marge de progression des performances (de 27,12 km.h⁻¹ en 1919 à 34,81 km.h⁻¹ en 1939). Durant la deuxième guerre mondiale les performances régressent de 2,4%, de 34,98km.h⁻¹ en 1940 à 34,13km.h⁻¹ en 1945. Puis vient une phase de progression lente (1945-1989) qui caractérise la période 3. Pendant 30 ans, de 1960 à 1989, la vitesse moyenne des cyclistes est relativement constante aux alentours de 37,77 ± 0,44km.h⁻¹. Enfin une dernière période de progression des performances (période 4) est observée après 1993, atteignant un pic de vitesse à 41,23km.h⁻¹ en 2003 et une vitesse de 41,19km.h⁻¹ en 2008. La valeur asymptotique a augmenté de 6,38% entre la période 3 et la période 4.

Distribution des Performances

La déviation standard moyenne des performances des 10 meilleurs cyclistes de chaque course a diminué de 0,59 ± 0,73 km.h⁻¹ en 1909 à 0,10 km.h⁻¹ en 1945 and 0,024 ± 0,013 km.h⁻¹ en 2008. Le coefficient de variation ($cv(t)$) a diminué de 0,021 à 0,001 à la même période (Figure 3).

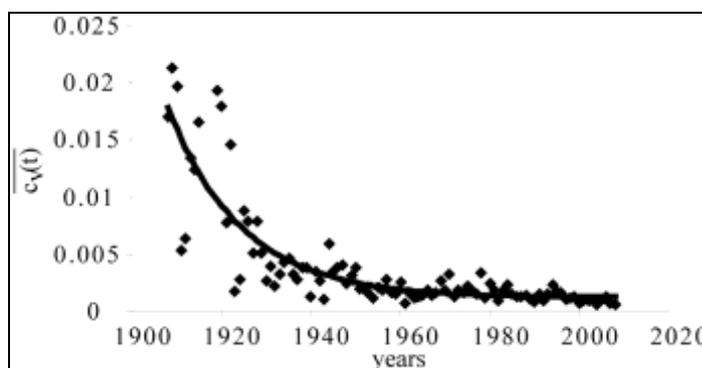


Figure 3. Courbe de progression du coefficient de variation moyen des 10 premiers cyclistes de toutes les courses ($R^2 = 0,73$).

Records de Vitesse

L'évolution des records de vitesse de 4 courses sont montrées dans la figure 4 : Paris-Roubaix, Tour de France, Flèche Wallonne et Giro d'Italia (R^2 moyen = $0,94 \pm 0,06$). Les records les plus récents varient de $38,93 \text{ km.h}^{-1}$ (Giro d'Italia, 2003) à $45,81 \text{ km.h}^{-1}$ (Milan San Remo, 1990). Tous les records actuels ont été établis pendant la période 4, à l'exception du dernier record de Paris Roubaix établi en 1964 (des modifications majeures des distances des courses, du nombre et de la longueur des secteurs pavés du parcours ont ensuite réduit la vitesse moyenne de cette épreuve).

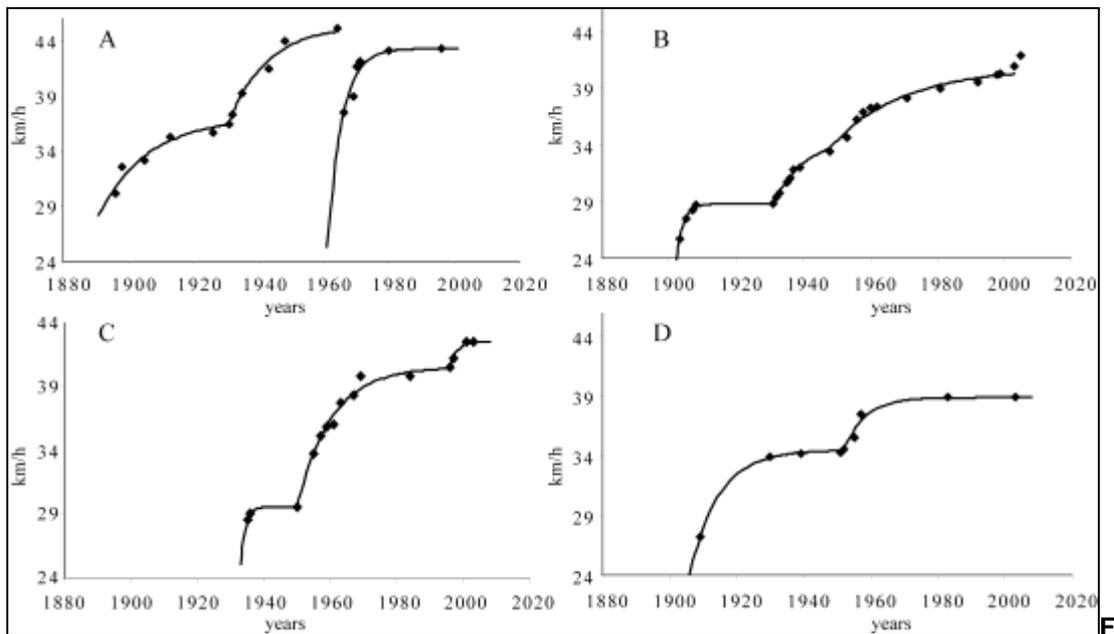


figure 4. Application du modèle multi-exponentiel sur les courbes de progressions des records de vitesse de 4 courses professionnelles A. Paris Roubaix (R^2 moyen = 0,95); B. TDF (R^2 moyen = 0,98); C. Vuelta (R^2 moyen = 0,93); D. Giro (R^2 moyen = 0,86). Sur la course de Paris-Roubaix le parcours a été modifié en 1964 (augmentation du nombre et longueurs des secteurs pavés).

Effet du profil de la course

Les caractéristiques du TDF sont présentées dans la figure 5. Entre 1960 et 1989 quand l'altitude totale grimpée (A) augmentait, la vitesse du vainqueur diminuait logiquement (Figure 5A), *i.e.* quand (A) augmentait de 1000m, la vitesse du vainqueur diminuait de $0,12 \text{ km.h}^{-1}$ (Figure 5A). A partir de 1990, la relation s'inverse : quand (A) augmente de 1000m, la vitesse du vainqueur augmente de $0,10 \text{ km.h}^{-1}$ (Figure 5B). Cette variation tient pourtant compte de l'augmentation constante de l'indice d'ascension (Figure 5C) et de la relation entre la distance et la vitesse de la course (Figure 5D).

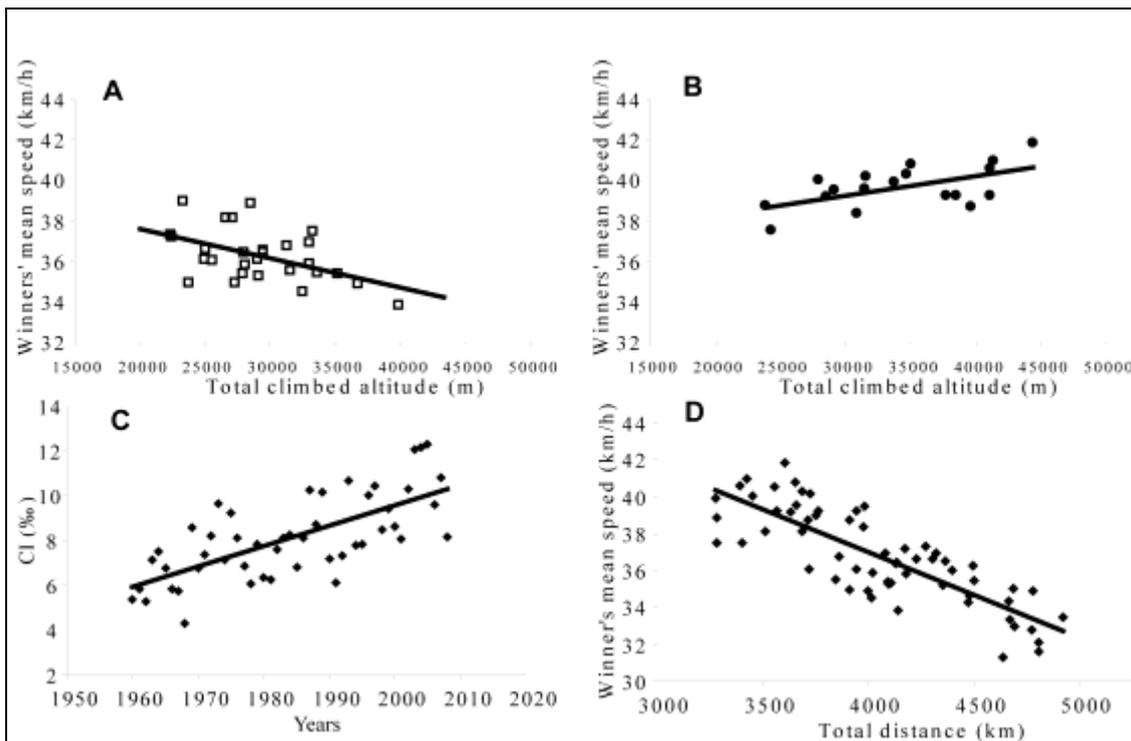


Figure 5. **A.** Relation entre altitude totale des cols grimés et vitesse moyenne du vainqueur du Tour de France (1960-1989; $y = -0,0001x + 40,484$). **B.** Relation entre altitude totale des cols grimés et vitesse moyenne du vainqueur du Tour de France (1990-2008; $y = 1E-04x + 36,344$). **C.** Indice d'ascension (pente moyenne) du Tour de France. ($y = 0,098x - 185$; $R^2 = 0,54$). **D.** Relation entre distance totale et vitesse moyenne du vainqueur du Tour de France entre 1947 et 2008 ($y = -0,0046x + 55,6$; $R^2 = 0,67$).

DISCUSSION

Notre étude est la première analyse exhaustive des performances en cyclisme sur route depuis son origine au 21^e siècle. L'approche multi-exponentielle n'avait pas été retenue jusqu'à présent : les modèles précédemment développés [15, 16], décrivaient l'évolution de 30 épreuves sportives mais ne tenaient pas compte des fluctuations externes telles que l'impact des deux guerres mondiales, les changements de règlements et les innovations technologiques et ne marquaient pas les différentes périodes d'évolution. L'approche multi-exponentielle [8, 17, 49] a déjà été appliquée pour l'analyse de 157 épreuves (incluant la totalité des épreuves Olympiques officielles quantifiables et plus de 50000 performances du plus haut niveau). Elle est sensible aux fluctuations locales liées aux facteurs externes et détecte les périodes successives de progression d'une épreuve au cours du siècle.

L'évolution des performances en cyclisme sur route (Figure 1) est similaire à celles de 5 disciplines olympiques quantifiables et de 10 autres sports [8, 17] et montre une progression pluri-exponentielle de rendement décroissant. Sur les quatre périodes identifiées, les deux premières, de progression rapide, sont interrompues par une guerre mondiale. La période 1 est

une phase d'initiation de la discipline avant la 1^{ère} guerre : cinq courses uniquement sont courues (chronologiquement : Liège-Bastogne-Liège, Paris-Roubaix, Tour de France, Milan-San Remo et Giro d'Italia) et l'on observe de larges écarts entre les vitesses. La période 2, entre 1919 et 1939, témoigne de la progression la plus rapide grâce à l'amélioration des techniques d'entraînement, des innovations technologiques (cadres en aluminium, dérailleurs...) et les investissements financiers. Après la 2^{nde} guerre, une légère amélioration des performances est suivie d'une phase de stabilisation qui caractérise la période 3. Cette stabilisation est similaire à celle observée sur la courbe d'évolution du Record de l'Heure UCI [8]. Les courbes d'évolution de toutes les disciplines sportives étudiées jusqu'à maintenant [8, 17] suivent le même modèle multi exponentiel.

Cependant, une nouvelle période de progression débute en 1993 pour le cyclisme sur route. Elle apparaît après 30 ans de stagnation, génère une nouvelle asymptote (période 4) et se retrouve sur 10 des 11 courses étudiées. Les performances progressent alors de 6,38% (Figure 1) par rapport à la période 3 : la vitesse asymptotique augmente en effet de 37,85km.h⁻¹ en période 3 (1960-1992) à 40,26km.h⁻¹ en période 4 (1993-2008).

Les écarts de vitesses entre les 10 meilleurs cyclistes diminuent également : comme en athlétisme, leurs performances sont de plus en plus proches [49]. Le coefficient de variation entre les 10 meilleurs cyclistes (Figure 3) diminue rapidement entre 1909 et 1950 (0,021 à 0,003) et varie ensuite faiblement (0,001 actuellement). Ces écarts sont beaucoup plus faibles qu'en natation ou en athlétisme [49]: en cyclisme, le peloton donne le rythme moyen et lorsque le record de vitesse du peloton est battu, le record de vitesse du vainqueur l'est également.

Les performances en cyclisme sont déterminées par l'interrelation entre des facteurs physiologiques, biomécaniques et les progrès technologiques. Le poids des premiers vélos était de 40kg environ en 1869 ; il diminue à 18kg dans les années 1930 [106]. En 1934, le duralumin remplace l'acier dans la fabrication du cadre, ramenant son poids à 12kg [106]. Les vélos actuels sont faits de titane, d'aluminium ou de fibres de carbone (utilisés pour la première fois sur le Tour de France en 1986) avec une grande rigidité et des poids plus faibles, 7 à 8kg, soit moins de 10% du poids total (vélo + poids corporel) [93]. Enfin d'autres facteurs techniques pourraient avoir également influencé la dernière progression observée. Le guidon aérodynamique, utilisé pour la première fois sur le TDF 1989 [94], les dérailleurs introduits à partir du TDF 1937 et l'utilisation récente des oreillettes, permettant la communication entre coéquipiers et directeurs sportifs.

La technologie a ainsi largement influencé le Record de l'Heure IHPVA (International Human Powered Vehicle Association) qui est actuellement de 90,597km ; sa dernière période de progression débute en 1979 et a permis de quasiment doubler les performances physiologiques (le record de l'heure UCI est actuellement à 49,70km) [8]. Les vélos tirant partie d'une technologie hautement optimisée sont certes très efficaces sur piste, où les conditions de course sont standardisées, mais beaucoup moins utiles sur route [94]. Les seules étapes en cyclisme sur route qui en bénéficient sont les contre-la-montre, individuels ou par équipe, qui ne représentent qu'une très faible portion de l'épreuve (sur le Tour de France 2008: 83 km de contre-la-montre pour une distance totale de 3560 km). La position du corps sur le vélo peut aussi influencer les performances ainsi que la tactique de l'équipe et le positionnement des coéquipiers [93].

L'effet sur la performance cycliste peut être comparé à l'impact technologique mesuré en natation [49]. En effet des phases de progressions récentes sont apparues dès 1999 dans cette discipline lorsque la première génération de combinaisons fut autorisée par la Fédération Internationale de Natation, ainsi qu'en 2008 et 2009 après un perfectionnement des matériaux utilisés et de leur assemblage [20].

La couverture médiatique pourrait également avoir des conséquences mais la présence des medias dans le cyclisme, comme leur rôle dans l'organisation et le financement des épreuves (promotion et récompenses), apparaît dès les premières courses à la fin du 21^e siècle [107]. Même si leurs conditions évoluent elles-aussi, leur impact n'est donc pas nouveau.

Nous ne pouvons ignorer le fait que l'abus de substances illégales ou toxiques ait débuté très précocement, et avec une efficacité plus grande encore après la deuxième guerre, mais une innovation pharmacologique majeure est cependant apparue juste avant la période 4 [108-110]. Le gène de l'érythropoïétine (EPO) a été identifié et cloné en 1985, et l'EPO de synthèse ou rHuEPO (recombinant human EPO) approuvée pour utilisation thérapeutique par la FDA (Food and Drug Administration aux USA) en 1989 [108]. Le Comité International Olympique (CIO) a interdit son usage dans le sport en 1990 [109], mais la rHuEPO est suspectée d'être utilisée par 3 à 7% d'athlètes d'endurance de haut niveau afin d'augmenter leur $VO_{2\text{ max}}$ et leurs capacités [108, 109, 111]. De fait, des procédures judiciaires majeures et récurrentes se déroulent durant toute la période 4 [110, 112-115].

Aucun travail de modélisation des performances publiée à ce jour n'a inclus ce paramètre faute de certitude quant aux protocoles utilisés, aux doses injectées ou au nombre d'utilisateurs. Plusieurs études ont cependant mesuré l'effet de l'EPO sur la performance chez des athlètes volontaires en mesurant la consommation maximale d'oxygène ($VO_{2\text{ max}}$). Ces

études ont montré une augmentation de 6,3 à 6,9% de celle-ci [116-118], se maintenant quatre semaines après l'arrêt de la prise [119]. Ces études confirment que le dopage au rHuEPO apporte un avantage physiologique significatif, comparable à l'amélioration des performances observée dans cette étude. La vitesse en cyclisme et la $VO_{2\text{ max}}$ sont corrélées [120] comme c'est le cas dans tous les autres sports aérobies (courses de fond et demi-fond en athlétisme, ski de fond, aviron) [121]. McCole et al. [120] ont démontré qu'une augmentation de la vitesse de pédalage de 37,5 à 40 km.h⁻¹ était associée à une augmentation de la $VO_{2\text{ max}}$ de 7,5%. L'effet attendu sur la $VO_{2\text{ max}}$ est la raison principale de la prise d'EPO dans les sports aérobies depuis sa découverte. De nouvelles générations d'EPO synthétiques comme l'EPO CERA (uniquement détectable à partir de 2008) sont rarement détectées dans les contrôles usuels mais pourraient être pris plus régulièrement désormais par les sportifs [122]. L'amélioration subite des performances observée en période 4 et la disponibilité de la rHuEPO pourrait n'être qu'une coïncidence. À moins que son effet direct sur la performance des cyclistes professionnels soit mesuré, il est impossible de prouver que l'EPO seule soit responsable de l'amélioration de 6,38% observée en période 4.

La relation entre l'altitude totale des cols grimés et la vitesse moyenne du vainqueur du Tour de France suscite une autre question physiologique. Entre 1960 et 1989 cette relation est cohérente (Figure 5A). Mais dans les années 1990, lorsque l'indice d'ascension augmente, la vitesse du vainqueur augmente paradoxalement (Figure 5B). Dans les 20 dernières années, plus on grimpe de cols et plus le vainqueur est rapide. Pendant la période 4 la distance totale du TDF (D) a pourtant augmenté, passant de 3285km en 1989 à 3944km en 1997, tandis que l'altitude totale des cols grimés (A) a presque doublé, passant de 24308m à 41057m. Théoriquement ces deux variations auraient dû rendre la course plus difficile et faire chuter la vitesse ; le résultat estimé à partir des relations précédentes aurait été une diminution de 11,3% en raison de l'augmentation de la distance (Figure 5D), et une diminution de 6,5% due à l'augmentation de l'altitude totale des cols grimés A (Figure 5D). Néanmoins l'observation des valeurs réelles montre une croissance de 4,5% (de 37,48 km.h⁻¹ en 1989 à 39,24 km.h⁻¹ en 1997), contribuant aux 6,38% de progression globale de la période 4 (Figure 1).

CONCLUSION

Analysant les performances du cyclisme sur route, nous montrons que son évolution suit, comme les autres sports, une loi de progression multi-exponentielle. Cependant, après 30 ans de stagnation, une phase de progression subite est observée en 1993, avec une amélioration des performances de 6,38%. Bien que des recherches complémentaires soient nécessaires pour

valider les causes et conséquences directes de nos observations, ces résultats ne laissent pas de s'interroger quant au rôle de facteurs extra-physiologiques dans cette progression majeure.

II.4. Perspectives Technologiques

Tout progrès significatif dans l'innovation technologique ou l'entraînement physique permettra de nouvelles progressions et améliorations des performances sportives [1, 55, 89].

Le sport est un terrain d'essai tranchant car les progrès technologiques et pharmacologiques y sont souvent expérimentés en premier [84, 123]. Les enjeux sont élevés et même un petit changement peut faire une différence. A ces niveaux, la science, la médecine et la technologie fusionnent dans un seul objectif : l'optimisation des rendements [5].

Les cibles visées pour ces améliorations incluent l'adaptation aux équipements, les vêtements, les milieux et les systèmes d'entraînements, la nutrition, les stratégies de récupération et l'assistance médicale. Tout changement dans l'un de ces facteurs a le potentiel d'améliorer l'état de santé, de réduire ou de prévenir les blessures et, finalement, d'améliorer les performances [5].

Une médaille d'or vaut, en plus de la notoriété, une ouverture aux contrats de publicité lucratifs et aux sponsors, la deuxième place est souvent considérée comme le "premier perdant" et la sécurité de l'emploi d'un entraîneur est directement liée aux résultats de son équipe [7, 14, 84, 124]. De même la place d'un athlète dépend de ses performances lors des championnats, qui se déroulent dans des conditions de compétitivité extrêmes. Il existe par ailleurs un nombre important d'incitations ou de pressions exercées par l'environnement (récompenses financières, reconnaissance sociale, admiration et respect des amateurs de sport, notoriété, etc.) [9, 14, 125, 126]. Aujourd'hui, il n'est pas surprenant que les motivations financières, transforment le monde du sport en des courses high-tech dans lesquelles la moindre astuce technologique est employée pour gagner des millisecondes et battre des records ; athlètes et entraîneurs sont prêts à sacrifier beaucoup pour améliorer la performance et gagner à tout prix [7, 9, 84, 124, 127, 128]. Par exemple les golfeurs professionnels, qui se soumettent à la chirurgie oculaire au laser pour améliorer leur vision [84]; certains estiment que cela équivaut à du dopage, mais d'autres pensent que cela ne va pas à l'encontre de l'esprit du sport et que la chirurgie réfractive remplace simplement les lentilles de contact.

III – SPORT DE HAUT NIVEAU ET SANTE

III.1. Mortalité et espérance de vie des cyclistes de haut niveau

La longévité d'un être vivant est la durée de vie pour laquelle il est biologiquement programmé, dans des conditions idéales et en l'absence de maladie ou d'accident. Elle correspond à la durée de vie maximale d'une espèce [65]. Les vertus de l'activité physique régulière et modérée sont maintenant connues. En effet les hommes et les femmes actives ont une diminution du risque de mortalité globale toutes causes confondues, d'environ 20-35% ; principalement grâce à l'effet protecteur de l'exercice contre les maladies cardio-vasculaires, l'hypertension, certains types de cancers (côlon, sein, et poumon), l'ostéoporose, l'ostéoarthrite et la dépression [65, 83, 129, 130]. En effet l'activité physique régulière favorise le maintien d'un poids corporel sain en réduisant le risque de surpoids et d'obésité et donc réduit les maladies associées à l'excès de graisse corporelle, y compris l'hypertension, l'hypercholestérolémie, le diabète de type 2 et les maladies coronariennes. L'activité physique améliore également la qualité de vie, permet le maintien d'un bon niveau de forme physique et retarde certains processus délétères liés au vieillissement [65, 83, 129, 130]. Selon les recommandations américaines [81], 150 minutes d'exercice modéré par semaine sont nécessaires pour obtenir des bénéfices sur la santé. Malgré ces recommandations, 40% des adultes américains âgés de plus de 18 ans sont sédentaires et ne pratiquent aucune activité physique [131]; d'après le baromètre santé 2008, 50% de la population française ne parvient pas non plus à maintenir les recommandations actuelles [82]; et d'après le Canadian Community Health Survey [132], la sédentarité touche 51% des adultes canadiens [133].

Du point de vue de la santé publique, la pratique du sport diminue donc le risque de mortalité, mais qu'en est-il des sportifs de haut niveau, qui ont des volumes et des charges d'entraînement beaucoup plus intensifs que la population générale ? Les études sont discordantes sur le sujet, certaines affirment une réduction de la mortalité et d'autres suggèrent une augmentation du risque d'infarctus du myocarde avec la pratique d'exercices vigoureux ou de sports de compétition [83]. Selon l'American College of Sports Medicine et l'American Heart Association, l'exercice intense pourrait augmenter le risque de mort subite d'origine cardiaque et d'infarctus du myocarde, notamment chez les personnes prédisposées (anomalies cardio-vasculaires héréditaires ou congénitales, athérosclérose) [83].

Cependant de précédentes études, ayant ciblé les sports d'endurance, ont montré une durée de vie significativement plus longue chez les coureurs de longue distance et les skieurs de fond qu'en population générale (Table C) [134].

Type of sport	Study	Athletes/players	Gender	N	Mortality/longevity
Endurance (aerobic)	Karvonen et al. (1974)	Finnish champion skiers born 1845–1910	Male	396	LE: 2.8–4.3 years longer than the calendar period-adjusted general male population in Finland
	Samu et al. (1993)	Finnish long-distance runners and cross-country skiers competing internationally 1920–1965	Male	303	LE: 5.7 years longer than age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland OR: 0.59 compared with age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland
Mixed-sports (aerobic + anaerobic)	Belli and Vanacore (2005)	Italian soccer players active in the three top leagues 1960–1996	Male	350	SPMR: 1.0 compared with the national death rates specific for sex, age, cause and calendar period
	Samu et al. (1993)	Finnish soccer, ice hockey, and basketball players, track and field jumpers, short- and middle-distance runners, and hurdlers competing internationally 1920–1965	Male	1,185	LE: 4.0 years longer than age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland OR: 0.90 compared with age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland
	Taioli (2007)	Professional soccer players enrolled in Italian A and B leagues 1975–2003	Male	5,389	SMR: 0.68 compared with age- and calendar period-stratified mortality from the general male population in Italy
Power (anaerobic)	Abel and Kruger (2005)	U.S. major league baseball players debuting 1900–1950	Male	2,604	LE: 4 years longer than age-adjusted controls from the general public
	Abel and Kruger (2006)	U.S. major league baseball players debuting 1900–1939	Male	4,492	LE: 4.8 years longer than age-adjusted controls from the general public
	Abel and Kruger (2006)	U.S. professional American football players debuting prior to 1940	Male	1,512	LE: 6.1 years longer than age-adjusted controls from the general public
	Beaglehole and Stewart (1983)	New Zealand international rugby players since 1884	Male	822	LE: the same survival curve as the general male population in New Zealand
	Metropolitan Life Insurance Company (1975)	U.S. major league baseball players debuting 1876–1973	Male	10,079	SMR: 0.97 for players debuting 1876–1900, 0.64 for players debuting 1901–1930, and 0.55 for players debuting 1931–1973 compared with the general male cohorts in the U.S.
	Parsinen et al. (2000)	Finnish powerlifters placed 1st–5th in weight series 82.5–125 kg in national champions 1977–1982	Male	62	MR: 12.9% compared to 3.1% among the age-matched general male population in Finland during a 12-year follow-up (4.6-fold higher risk of death)
	Samu et al. (1993)	Finnish weightlifters, wrestlers, boxers, and track and field throwers competing internationally 1920–1965	Male	909	LE: 1.6 years longer than age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland OR: 1.02 compared with age- and area of residence-matched reference male cohorts in Finland
	Waterbee et al. (1988)	U.S. major league baseball players beginning careers 1911–1915	Male	985	SMR: 0.94 compared with the general male population in the U.S.
All-sports	Gajewski and Poznanska (2008)	Polish athletes participating in the twentieth century Olympics since 1924	Male	1,689	SMR: 0.50 compared with the age-specific urban male population in Poland
			Female	424	SMR: 0.73 compared with the age-specific urban female population in Poland
	Menotti et al. (1990)	Italian track and field athletes competing internationally as members of the national team since 1940	Male	700	SMR: 0.73 compared with age-matched general male controls in Italy
			Female	283	SMR: 0.48 compared with age-matched general female controls in Italy
	Schoeller (1971)	Danish athletic champions, record-holders, and members of national teams from 19 different sports born 1880–1910	Male	297	SMR: 0.61 in the life period of 25–49 years, 1.08 in 50–64 years, and 1.02 in 65–80 years compared with the age-matched general male population in Denmark

Notes: LE, life expectancy; MR, mortality rate for all causes of death; OR, mortality odds ratio for all causes of death; SMR, standardised mortality ratio for all causes of death; SPMR, standardised proportionate mortality ratio for all causes of death.

Table C. Etudes sur la mortalité et la longévité des athlètes de haut niveau dans différents types de sports [83].

Le nombre de décès observé chez les athlètes d'endurance est en effet de 35% inférieur au nombre estimé en population générale ; la réduction des décès cardiovasculaires ayant principalement contribué à ce meilleur taux de survie. Dans les sports mixtes (alternance d'efforts aérobie et anaérobie) comme le football, le hockey sur glace et le basketball, les taux de mortalité sont également plus faibles, en raison d'une réduction similaire de la mortalité cardio-vasculaire. Cependant les observations effectuées dans les sports de puissance ou sports anaérobies ne sont pas concluants. Certaines études ont montré que les joueurs américains de baseball professionnels ayant débuté leur carrières entre 1900 et 1950

ont vécu 4 à 5 ans de plus que la population témoin. D'autres études n'ont pas trouvé de réduction significative de la mortalité des joueurs de baseball ayant commencé leur carrière avant 1915 (Table C), [83, 135].

Les joueurs ayant débuté leur carrière entre 1901 et 1973 ont des taux de mortalité plus faibles portant notamment sur les maladies coronariennes et les accidents vasculaires cérébraux, sensibles aux effets de l'activité physique (Table C), [83].

Les joueurs de football Américain ayant débuté leur carrière avant 1940 ont vécu en moyenne 6 ans de plus que la population générale, alors que les rugbymen et les athlètes des sports de puissance (haltérophilie, lutte, boxe, lancers en athlétisme) ont eu une durée de vie similaire (Table C), [83, 135]. A l'inverse, une étude a observé que 12,9% des haltérophiles finlandais sont décédés prématurément (moyenne d'âge au décès = 43 ans) contre 3,1% de décès prématurés dans la population générale du même âge au cours de 12 ans de suivi. En raison de ces résultats controversés, il n'est donc pas possible de déterminer l'effet des sports anaérobies sur la mortalité et la longévité (Table C), [83].

L'objectif de notre étude est de tester la relation entre longévité et activité de haut niveau dans le cadre du cyclisme sur route, faisant suite à l'étude précédemment publiée [55] où était observée une amélioration brutale de 6,4% des performances en 1993 par rapport à la période 1960-1990, qui coïncidait avec l'arrivée de l'EPO et soulevait la question du rôle de facteurs extra-physiologiques dans cette amélioration atypique. Les cyclistes vivent-ils donc plus longtemps que la population générale ? Si oui, le dopage et l'abus de substances illicites inverseraient-ils cette tendance ?

Données

Cette étude a porté sur les 10 meilleurs coureurs cyclistes du Tour de France (TDF) et du Tour d'Italie (Giro) depuis leur première édition (1903 et 1909 respectivement) jusqu'en 2009. Viendront s'ajouter ultérieurement les données du top 10 des coureurs du Tour d'Espagne (Vuelta) ainsi que celles des courses étudiées précédemment afin d'avoir une représentativité complète de l'élite cycliste internationale du plus haut niveau [55].

Pour chaque coureur du TDF et du Giro, sa date de naissance et, s'il est décédé, sa date de décès, ont été récupérées de sources multiples. Ces données sont librement accessibles sur les nombreux sites internet d'archives dédiés au cyclisme et les sites officiels des courses cyclistes. Les coureurs sont tous de sexe masculin.

Analyse des données

La date de point de l'étude a été fixée au 15 Septembre 2010. Pour chaque coureur, l'âge au décès ou l'âge au 15/09/2010 a été calculé. Les coureurs ont été repartis selon leur année de naissance par générations de 10 ans (1860 – 1869 ; 1870 – 1879 ; etc...). Pour chaque génération, la moyenne de l'âge au décès a été calculée pour les coureurs décédés et la moyenne de l'âge au 15/09/2010 a été calculée pour les coureurs toujours en vie. Ces moyennes ont été comparées avec l'espérance de vie de la population générale (Tables de mortalité INED, [136]) pour chaque génération.

Ultérieurement, la suite de l'étude portera sur les indicateurs suivants :

- effectifs de décès toutes causes.
- taux brut de mortalité correspondant au nombre de décès dans la population pour une période donnée divisé par l'effectif de la population pendant la même période * 1000.
- indice comparatif de mortalité (ICM ou Standard Mortality Ratio, SMR) correspondant au nombre de décès observés divisé par le nombre de décès attendu.

La méthode statistique consiste en un calcul de la mortalité attendue à l'aide de la reconstitution d'une cohorte fictive utilisant comme effectif de départ les sujets de l'étude en leur appliquant les quotients de mortalité de la population générale aux âges et aux années correspondantes. On calcule ensuite les ICM, leur variance étant basée sur une hypothèse de Poisson des effectifs observés. L'indice de surmortalité sera défini comme le taux de mortalité dans la population des cyclistes divisé par le taux de mortalité dans la population générale.

Est également calculé le nombre d'années potentielles de vies perdues.

Résultats préliminaires

Au total 721 coureurs ont été retenus sur le top 10 des 97 éditions du TDF et les 93 du Giro; dont 141 coureurs communs aux deux tours, 315 coureurs uniquement sur le TDF et 265 uniquement sur le Giro, nés entre 1867 et 1986, dont 48,7% sont décédés et 51,3% sont encore en vie.

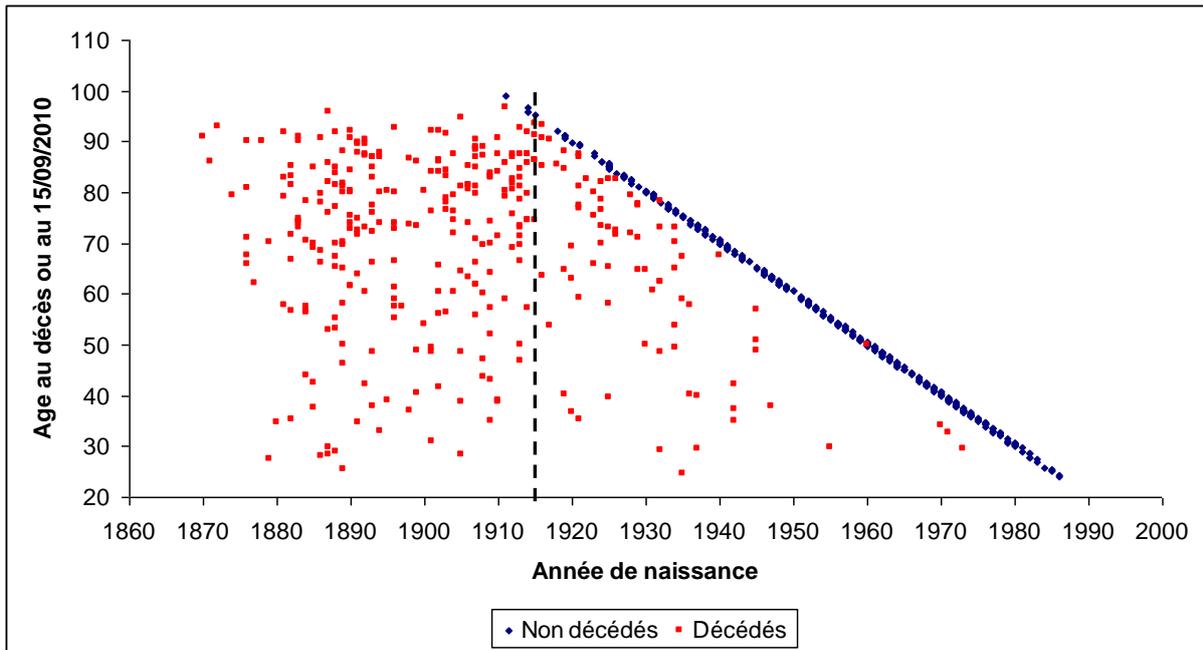


Figure M. Etat actuel de la mortalité des cyclistes du top 10 du TDF et du Giro.

La figure M nous montre l’image actuelle de la mortalité de cette élite cycliste internationale. Au fur et à mesure que le temps passe, les points bleus se transformeront en points rouges et viendront se positionner sur le graphe. On remarque que la majorité des coureurs nés avant 1915 (avant la ligne pointillée) sont décédés, la distribution de leur âge au décès (Figure N) suivant la courbe classique de mortalité définie par Kannisto [137], avec un pic de mortalité aux alentours de 80-85ans (Figure O).

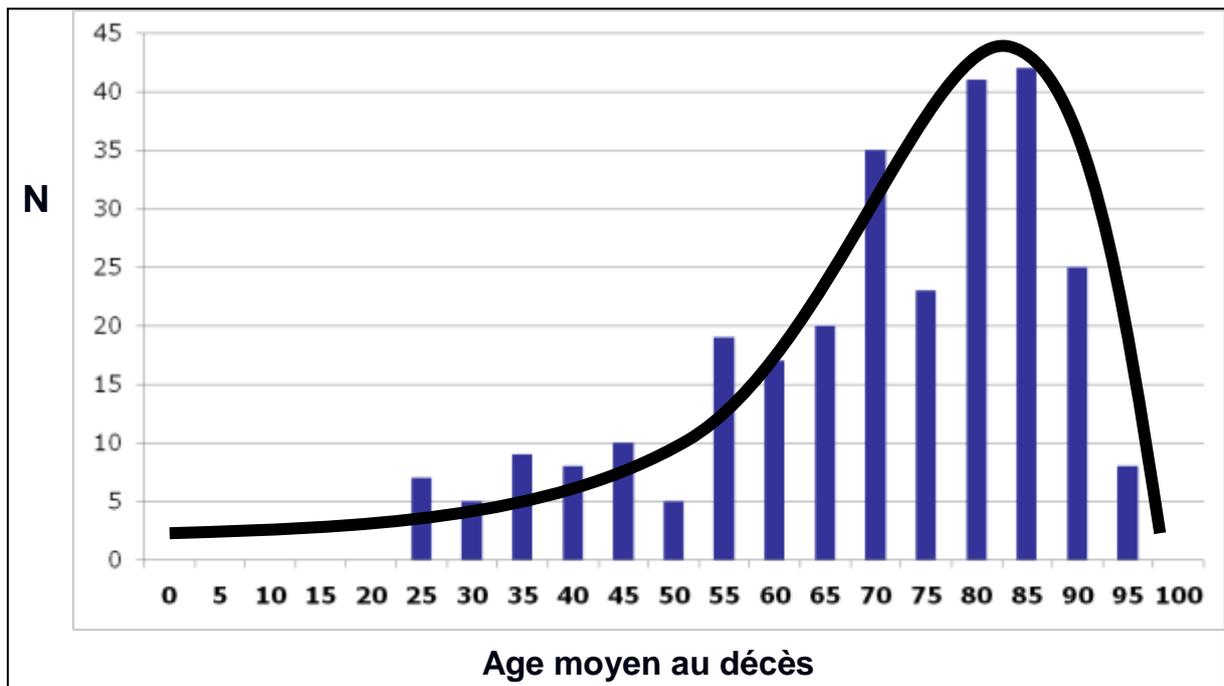


Figure N. Distribution de l’âge au décès des coureurs nés avant 1915.

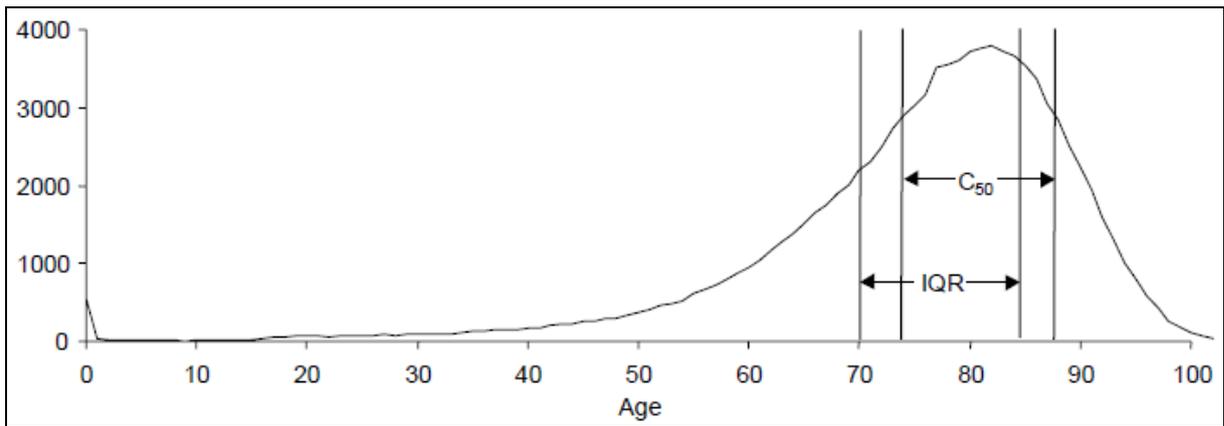


Figure O. Courbe de répartition des décès selon l'âge [137].

Concernant les coureurs nés entre 1950 et 1970 (entre les deux lignes pointillées, Figure P), on ne constate qu'un seul décès très prématuré (avant 40 ans). Par extrapolation, on s'attend, donc à ce que leur âge moyen au décès soit plus élevé que celui des coureurs nés avant 1915. Pour les cyclistes nés après 1970 (après la deuxième ligne pointillée), on constate une ré-ascension de la mortalité prématurée avec trois décès très précoces (Figure P) ; ces coureurs ont tous trois concouru dans les années 1990, période qui coïncide avec l'amélioration tardive et atypique des performances en cyclisme sur route observée dans l'étude précédente [55].

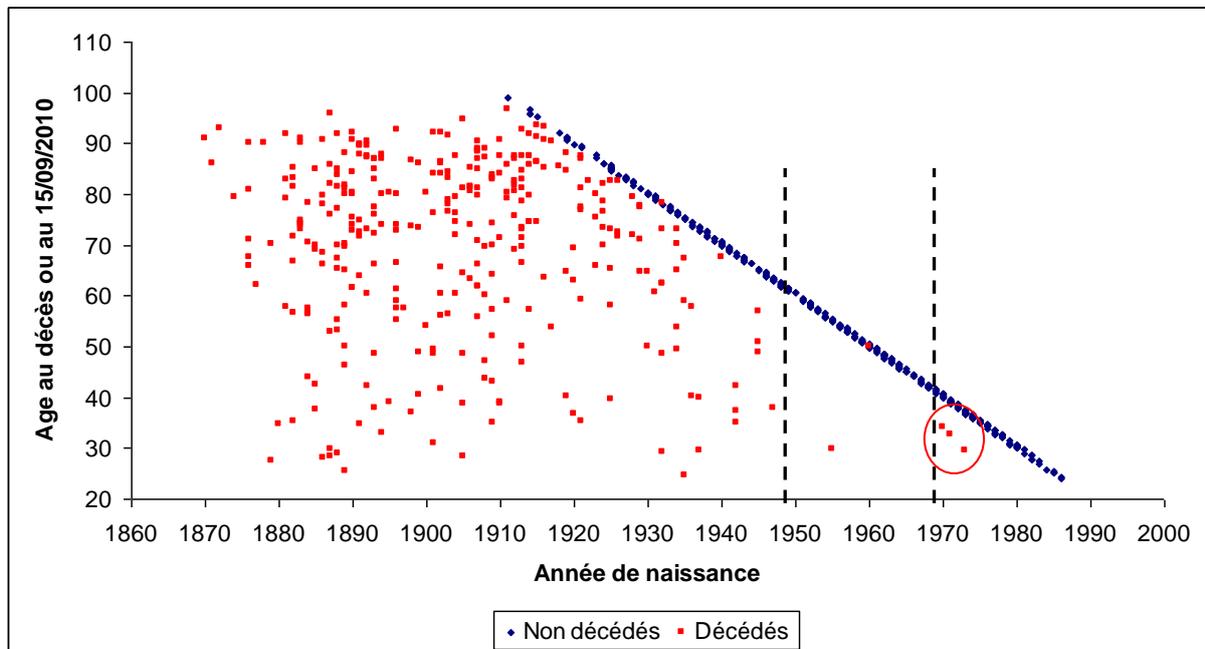


Figure P. Etat actuel de la mortalité des cyclistes du top 10 du TDF et du Giro. Observation des coureurs nés après 1950 et après 1970.

Moyennes par générations

Les coureurs nés avant 1920 ont une durée de vie supérieure de 9ans ($\pm 2,4$ ans) à celle de la population générale de l'époque (Figure Q).

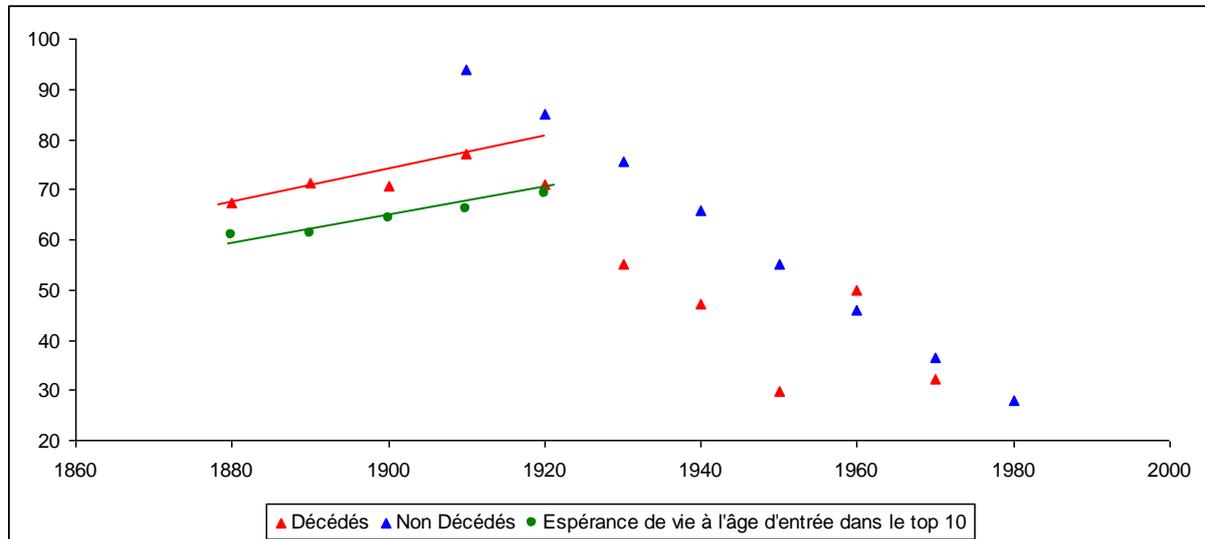


Figure Q. Age moyen au décès par génération et comparaison avec l'espérance de vie de la population générale masculine au même âge, de l'époque.

Discussion

L'objectif de cette étude était d'examiner l'impact de l'exercice intensif à long terme sur la longévité des cyclistes de haut niveau. Chez les coureurs nés avant 1920, les résultats préliminaires de cette étude montrent une association sport de haut niveau et longévité élevée. En accord avec la littérature, il semble que leurs qualités physiques leur aient également assuré une survie plus grande. Comme pour les autres sports d'endurance (Table C), nous observons une durée de vie de 9 ans ($\pm 2,4$) plus longue que celle de la population générale.

Plusieurs explications à ce taux de survie plus important sont possibles. Tout d'abord, ces sportifs se livrent à des volumes d'entraînement élevés. Il a été suggéré que des doses plus élevées d'activité physique ont des bénéfices supplémentaires sur la réduction de la mortalité toutes causes ; il existe une relation dose-réponse entre la quantité d'énergie dépensée lors de l'exercice (indépendamment du type d'activité) et la diminution de mortalité, les personnes ayant les plus hauts niveaux d'activité physique ont les risques les plus faibles de décès prématuré [74, 83, 130, 133, 135, 138, 139]. La relation entre la diminution de la mortalité et l'augmentation de l'activité physique est linéaire. Une diminution de 20% à 30% de toutes causes de mortalité est associée à une dépense moyenne d'énergie d'environ 1000 kcal par

semaine. Des taux d'activité supérieurs sont associés à une diminution supplémentaire des risques [81, 130, 138, 139]. Les premiers travaux par Paffenbarger et al [140], ont révélé que l'activité physique régulière (supérieure à 2000 kcal par semaine) était associée à une augmentation moyenne de l'espérance de vie de 1 à 2 ans jusqu'à l'âge de 80 ans. Cette relation augmente linéairement avec le volume d'activité physique. Les cyclistes de haut niveau qui ont des dépenses énergétiques supérieures à 3000 kcal par jour (et plus encore les jours de compétitions et lors des Tours) semblent suivre cette règle.

Ensuite, les niveaux de condition physique élevés atteints par les athlètes peuvent expliquer leur meilleur taux de survie. Les composantes de la condition physique liées à la santé, sont les conditions cardiovasculaires et musculo-squelettiques, la composition corporelle et le métabolisme. Des changements dans les niveaux d'activité physique, la composition corporelle, et les maladies dégénératives avec l'âge sont soit absents, soit nettement réduits chez les athlètes par rapport aux sédentaires [59]. Il a été observé une réduction d'au moins 50% de la mortalité chez les personnes en très bonne condition physique par rapport aux personnes de faible condition physique. Il existe une relation inverse entre les niveaux de condition physique et la mortalité toutes causes confondues. La condition physique est un excellent indicateur de la santé. Les athlètes professionnels forment un groupe très sélectif : seuls les individus ayant une condition et une forme physique élevées sont en mesure de rivaliser au niveau élite [130]. La sélection des athlètes peut être expliquée par les facteurs génétiques, ayant une influence modérée ou importante sur les paramètres de la condition physique liés à la performance humaine, tels que la $VO_2 \text{ max}$ et la force ou l'endurance musculaire [1, 3, 141, 142]. Il est probable que ces individus soient devenus athlètes de haut niveau en raison de leurs prédispositions génétiques combinées à leur niveau de forme physique élevé, ce qui pourrait leur apporter des avantages de longévité [83]. Il semble que différents déterminants génétiques, épigénétiques et environnementaux caractérisent la durée de vie d'un homme, la composante génétique déterminerait environ seulement 25% de la variation de la durée de vie des adultes avant l'âge de 60 ans, mais au-delà l'influence de la génétique tend à augmenter jusqu'aux âges extrêmes [77]. Les facteurs immunitaires peuvent jouer un rôle dans la régulation de la durée de vie (se référer à la partie I.3. Age et temps).

Mode de vie

Les anciens athlètes de haut niveau ont tendance à maintenir un mode de vie sain et actif après la fin de leur carrière et continuent à pratiquer des niveaux d'activité physique supérieurs à

ceux de la population générale [134, 143]. Par conséquent, les athlètes vivent plus longtemps soit parce qu'ils maintiennent une vie active après leur carrière, soit parce que l'activité physique régulière et l'entraînement vigoureux accumulé pendant leur carrière passée est «en réserve» et entraîne une longévité accrue [83, 134].

Le cyclisme de haut niveau étant un sport d'endurance, les exercices aérobies seraient plus efficaces dans la réduction de la mortalité que les exercices de puissance ou de résistance, en diminuant en particulier la mortalité liée aux maladies cardio-vasculaires. De même, la santé cardiorespiratoire, améliorée par les exercices aérobies, est associée à une réduction des maladies chroniques (hypertension, maladies coronariennes et diabète de type 2) et de l'obésité [83].

Mécanismes biologiques

Plusieurs mécanismes biologiques peuvent être responsables de la réduction du risque de maladie chronique et de décès prématurés liés à l'activité physique régulière : l'amélioration de la composition corporelle (réduction de l'adiposité abdominale et amélioration du contrôle du poids corporel), l'amélioration du profil lipidique (diminution des niveaux de triglycérides, augmentation des lipoprotéines de haute densité [HDL], et diminution des lipoprotéines de faible densité [LDL] et du ratio LDL/HDL), l'amélioration de l'homéostasie du glucose et de la sensibilité à l'insuline, la diminution de la pression artérielle, de l'inflammation, de la coagulation du sang, l'amélioration du débit sanguin coronaire et des fonctions cardiaques et endothéliales [129, 130, 133, 138, 143].

De plus l'exercice physique diminue significativement les taux de protéine C réactive qui est l'indicateur principal de l'inflammation chronique et qui est fortement associée à la plupart des maladies chroniques. Chacun de ces facteurs peut expliquer directement ou indirectement la réduction de l'incidence des maladies chroniques et de décès prématurés chez les personnes physiquement actives [129, 130, 138].

Il n'existe donc pas un seul facteur, mais une association de facteurs responsables de l'amélioration des taux de survie et de l'augmentation de la durée de vie [83].

L'espérance de vie moyenne de l'homme a progressivement augmenté au cours des 100 dernières années, passant dans les pays Européens de 45 ans en 1900 à 73 ans aujourd'hui [76, 136, 144]; la durée de vie des cyclistes nés entre 1880 et 1920 a également augmenté en parallèle (Figure Q). Dans un premier temps, le recul de la mortalité infantile et des maladies infectieuses vers les années 1950, qui ont quasiment disparu aujourd'hui, a essentiellement

contribué à l'amélioration de l'espérance de vie ; ensuite le développement des vaccins et des agents antimicrobiens, l'amélioration de la nutrition, le progrès de la médecine dans le traitement efficace et la prévention de nombreuses maladies comme le diabète, le cancer et les maladies cardiovasculaires, et la baisse de la mortalité des sexagénaires et des personnes plus âgées, ont contribué à cette amélioration [76, 77, 138, 143, 144]. Les maladies cardiovasculaires et les cancers sont les premières causes de mortalité dans le monde aujourd'hui. Elles sont liées aux changements socio-économiques et comportementaux, notamment la sédentarité et les modes de vie nocifs pour la santé (alcoolisme, tabagisme, alimentation déséquilibrée avec surconsommation de lipides, accidents de la voie publique...), qui ralentissent les progrès de l'espérance de vie et suggèrent la diminution de la longévité [135, 144]. L'effet protecteur de l'exercice contre ces maladies contribue à la longévité observée chez les personnes actives et les cyclistes de haut niveau.

Plus d'observations sont nécessaires pour les coureurs nés après 1920, qui sont majoritairement non décédés. En raison d'une part des changements de méthodes d'entraînement et, d'autre part, de l'augmentation de la consommation de produits dopants après la deuxième guerre mondiale dans le cyclisme, qui pourraient limiter l'effet des prédispositions génétiques favorables ou les effets bénéfiques du sport sur la santé.

Le taux de mortalité augmentera-t-il ? Y aurait-il davantage de maladies chroniques et une diminution de la durée de vie après l'arrêt de leur carrière sportive?

En effet les graves effets secondaires des stéroïdes décrits dans la littérature médicale incluent des anomalies de la fonction hépatique, des tumeurs hépatiques et rénales, des dysfonctionnements endocriniens et reproductifs, des atrophies testiculaires, des dyslipidémies, des maladies cardiovasculaires (dont l'augmentation du risque d'athérosclérose), des symptômes psychiatriques et des décès prématurés [50, 83, 124, 145]. Les différences de mortalité ou de longévité entre les athlètes de puissance et d'autres groupes d'athlètes peuvent en partie être le résultat de l'utilisation de stéroïdes anabolisants qui est fréquemment signalés chez les haltérophiles et les bodybuilders [145, 146].

Augmenter artificiellement le taux d'hémoglobine sanguin peut également avoir des conséquences dangereuses, les transfusions sanguines et l'EPO, qui est souvent injectée à des doses anormalement élevées, pourraient entraîner la viscosité sanguine, des thromboses coronaires et veineuses, des thromboses cérébrales, des embolies pulmonaires, des arythmies, et des accidents vasculaires cérébraux [50, 58, 109, 124, 145]. Les dangers de l'EPO comprennent également la mort subite, souvent nocturne, et le développement d'anticorps

anti-érythropoïétine, qui pourrait entraîner une diminution paradoxale de la masse des globules rouges (aplasie des globules rouges) [109, 115].

Le premier cas de décès enregistré suite au dopage dans l'histoire du sport moderne, est survenu lors d'une course cycliste en 1886. Le plus mémorable fut la mort du cycliste britannique Tony Simpson lors du TDF en 1967, en raison probable d'une absorption importante d'amphétamines. L'impact de son décès a été important car diffusé en direct à la télévision [9, 115]. De même il a été estimé que plus de 20 cyclistes européens seraient morts d'infarctus du myocarde, d'accidents vasculaires cérébraux, et d'embolies pulmonaires depuis 1987 en raison d'abus d'EPO. Huit autres décès inattendus de cyclistes professionnels ont été signalés depuis Janvier 2003, ce qui fait potentiellement de l'EPO l'un des agents les plus fatals du dopage [115, 123, 124, 145]. Y compris l'overdose accidentelle de cocaïne de Marco Pantani, vainqueur du Tour de France 1998, qui fut suspendu après un contrôle positif à l'EPO alors qu'il était en tête du Tour d'Italie en 1999 [115]. Nous observons dans cette étude un « signal d'alarme » (Figure P) chez les coureurs cyclistes nés après 1970, trois coureurs sont décédés avant l'âge de 35 ans (dont M. Pantani), de causes qui pourraient être reliées à la consommation de drogues et de substances dopantes.

D'autres facteurs doivent également être observés comme la durée de carrière, le tabagisme et les habitudes alimentaires, qui pourraient affecter la mortalité et la longévité [83].

Conclusion

Similairement à l'exercice modéré, le sport de haut niveau et l'entraînement vigoureux sont bénéfiques et semblent améliorer les taux de survie. Les athlètes en général vivent plus longtemps que la population générale, peut être en raison de la sélection drastique de ces individus, en raison de leur volume d'activité physique supérieur, et peut-être grâce à la baisse des mortalités cardiovasculaires associée à l'exercice régulier. L'exercice semble augmenter l'espérance de vie moyenne en diminuant l'incidence des co-morbidités liées à l'âge, et à ce stade, il reste à être prouvé par des données expérimentales que l'exercice augmente la durée de vie maximale [76].

Cette tendance pourrait être ralentie ou inversée en fonction de la prise de substances illicites. D'autres études sont nécessaires pour analyser les causes de décès de ces cyclistes et les comparer avec ceux de la population générale, et d'autres observations sont nécessaires pour suivre la mortalité des cyclistes nés après 1920, qui sont majoritairement encore en vie.

III.2. Dopage

On constate que la course aux innovations technologiques n'implique pas uniquement le matériel et les équipements, mais aussi les dernières recherches médicales et biotechnologiques. L'abus de la recherche biomédicale par les athlètes et leurs entraîneurs pour gagner un avantage illégal et surpasser leurs limites est présent depuis des décennies [14, 84]. En 2009, le pourcentage global de résultats positifs d'analyses antidopage est de 2,02 % (Tables D et E) [147]. Au fur et à mesure de leur progression, les athlètes sont entraînés dans la quête constante d'amélioration des performances ; ils deviennent plus compétitifs et peuvent être plus sensibles au dopage selon leur personnalité et leur situation [125, 148].

Sport	Nb Prélvmt	Positifs	% Positif
American Football	42171	325	0.77%
Football / Soccer	32526	163	0.50%
Athletics	26593	170	0.64%
Cycling	21835	318	1.46%
Baseball	19560	490	2.51%
Aquatics	13995	91	0.65%
Basketball	11150	222	1.99%
Weightlifting	7534	158	2.10%
Ice Hockey	6065	77	1.27%

Table D. Prélèvements effectués par l'AMA en 2009 : les 10 disciplines ayant subi le plus grand nombre de prélèvements [147].

Sport	Nb Prél	Positifs	% Positif
Bodybuilding & Fitness	1400	230	16.43%
Surfing	76	6	7.89%
Softball	255	11	4.31%
Powerlifting	2279	86	3.77%
Motorcycle	380	14	3.68%
Billiard	402	14	3.48%
Sumo	116	3	2.59%
Baseball	19560	490	2.51%
Equestrian	462	10	2.16%
Golf	1530	33	2.16%

Table E. Les 10 disciplines ayant les plus grands pourcentages de prélèvements positifs en 2009 [147].

Lorsque le magazine *Sports Illustrated* [123] interroge des athlètes de niveau olympique, avec la question : « Si l'on vous propose une substance améliorant la performance, qui n'est pas détectable et vous permet de gagner, la prendriez-vous? », 98% des athlètes répondent « Oui ». La réponse à la seconde question est encore plus étonnante: « Si l'on vous propose une substance améliorant la performance qui n'est pas détectable, et qui vous permet de

gagner toutes les compétitions pendant 5 ans, puis que vous mourriez suite à ses effets secondaires, la prendriez-vous? », plus de 50% répondent encore positivement [123, 124, 128, 145]. Les résultats de cette enquête et ceux d'études similaires montrent que l'absence de sanction juridique augmente la motivation des athlètes à utiliser des produits dopants, et vice-versa [50, 149]. Le dopage n'est pas une fin en soi, mais plutôt un moyen pour atteindre un objectif spécifique (améliorer ses performances, dépasser ses propres limites, gagner, battre un record ou marquer son appartenance à l'équipe) [125, 148]. Les athlètes ne voient pas nécessairement le dopage comme un moyen de tricherie injuste ou avantageux, surtout lorsqu'ils supposent que leurs adversaires suivent la même logique qu'eux, leur volonté est d'atteindre le même niveau et d'assurer l'égalité des chances de victoire [123, 126, 128, 148]. Ils reconnaissent leurs infractions au règlement, mais ils ne se considèrent pas comme des tricheurs, ou plus tricheurs que les autres, et nombre d'entre eux ont affirmé qu'ils préféreraient ne pas se doper et ne le feraient pas s'ils étaient vraiment certains que personne ne le fasse [123, 148]. La littérature suggère qu'il y a une différence de comportement entre hommes et femmes, les hommes étant plus susceptibles que les femmes [146, 148].

Le dopage est un problème mondial qui touche les événements sportifs internationaux [84, 124, 125, 148]. Il est rare qu'un événement sportif ne se déroule sans qu'un ou des athlètes ne soient contrôlés positifs, interdits de compétitions ou privés de leurs médailles [84, 124]. Le problème semble être profondément enraciné. Plusieurs enquêtes révèlent que l'utilisation effective du dopage commence bien avant que l'athlète ait atteint le meilleur de sa carrière et la prévalence du dopage, en particulier l'utilisation de stéroïdes anabolisants, est bien documentée chez les athlètes adolescents [126, 127, 145, 146, 148].

Les Fédérations sportives internationales, menées par le Comité international olympique, les gouvernements de certains pays (Etats Unis, Grande Bretagne, Australie...) ainsi que l'Union Européenne et l'UNESCO, tentent depuis un demi-siècle de stopper la propagation du dopage et de diminuer l'abus de substances interdites par des programmes d'éducation et des campagnes de prévention. Malgré ces efforts, dont l'efficacité reste limitée, le nombre relatif de cas détectés n'a pas diminué [124-126, 148]. De plus, la pertinence de l'éducation comme un moyen de dissuasion est discutable car il a été démontré que les connaissances spécifiques en matière de dopage sont plus élevées chez les dopés que chez les non-dopés [50, 146, 148].

Le problème est que l'AMA (Agence Mondiale Anti-dopage) n'est pas en mesure de détecter toutes les substances en cours d'utilisation. Celle-ci a un temps de retard par rapport aux athlètes qui utilisent souvent les nouvelles substances et techniques avant le développement d'un test permettant de les détecter. Ces molécules plus puissantes et indétectables sont

distribuées par des réseaux clandestins sophistiqués [84, 124-126, 145]. C'est le cas de l'EPO mis sur le marché sportif à partir de 1993 mais seulement détecté par les contrôles cinq années plus tard [55, 84, 124]. De plus, les nouvelles technologies développant des méthodes difficilement détectables ont conduit à l'augmentation considérable des coûts (suite à l'augmentation du nombre d'athlètes et du nombre de nouveaux médicaments à tester). Si la tendance se maintient, les coûts des tests pourraient vite devenir un facteur rédhibitoire de la lutte antidopage [125, 126, 148].

Les substances les plus courantes sont l'érythropoïétine (EPO), les stéroïdes anabolisants et l'hormone de croissance humaine (hGH), qui ont été initialement développées pour traiter des pathologies et ont été utilisées pour accroître la performance des athlètes en bonne santé [84, 124, 150]. Les stéroïdes sont aujourd'hui les substances les plus détectées (Table F) [124, 126].

Classe	Nb	%	Produit	Nb	% dans la classe
Anabolic Agents	3297	64.9%	Testosterone	2319	70.3%
Cannabinoids	399	7.8%	Cannabis	399	100%
Stimulants	325	6.4%	Cocaine	60	18.5%
Beta-2 Agonists	303	6.0%			
Diuretics and Other Masking Agents	273	5.4%	Furosemide	92	33.7%
Glucocorticosteroids	265	5.2%	Budesonide	120	45.3%
Hormones and Related Substances	100	2.0%	Erythropoetin	56	56.0%

Table F. Les substances les plus détectées par les contrôles de l'AMA en 2009 [147].

Les produits dopants sont utilisés depuis des siècles : champignons, plantes et mélanges de vin et d'herbes ont été utilisés par les athlètes olympiques de la Grèce antique et les gladiateurs romains dans le Circus Maximus [9, 14, 124, 128]. Cependant les drogues d'aujourd'hui ont des effets secondaires potentiellement dangereux [14]. Aux Jeux Olympiques de 1904, le marathonien Thomas Hicks a utilisé un mélange d'alcool et de strychnine et a failli mourir [9, 124]. Les mélanges de strychnine, héroïne, cocaïne et caféine ont probablement été plus nuisibles qu'utiles, et ont été une pratique courante jusqu'à ce que l'héroïne et la cocaïne soient devenues disponibles uniquement sur ordonnance dans les années 1920 [115, 124, 128]. Dans les années 30, les amphétamines ont remplacé la strychnine, et ont été les premières molécules ergogéniques efficaces elles ont été largement utilisées par les soldats de la Seconde Guerre mondiale et dans le sport au début des années 1950 ; les amphétamines - surnommées « la bomba » des cyclistes italiens et l'« Atoom » des néerlandais - minimisent les sensations désagréables de fatigue pendant l'effort [115, 124].

Dans les années 50, l'équipe soviétique a été la première à utiliser les hormones mâles synthétisées en 1936 ; la testostérone propionate (Testoviron), la methandrostenolone (Dianabol), utilisé par les américains en 1958, et la chlordehydrométhyl-testostérone orale (Turinabol) par les Allemands de l'Est après 1966, ont marqué le début de la «virilisation» du sport moderne en augmentant le volume musculaire, la force, la puissance et la vitesse (en sprint notamment), en accélérant la récupération, et permettant donc des entraînements plus intensifs [115, 124, 145]. Ces stéroïdes anabolisants ont souvent été utilisés en combinaison avec d'autres hormones aux effets synergiques, comme l'insuline, l'hormone de croissance et les IGF (insulin-like growth factors) [115, 124, 145].

La chute du Mur de Berlin a exposé les pratiques, bien documentées et contrôlées, de dopage hormonal du gouvernement est-allemand [48, 54, 57, 115, 124, 128]. Les facteurs politiques et sociaux de l'époque et le nationalisme sportif ont poussé certains pays de l'Est (ex-Union Soviétique et autres pays d'Europe de l'Est) à élaborer des protocoles minutieux d'administration de stéroïdes anabolisants et d'autres drogues aux athlètes qui ont récolté médailles d'or et records du monde et ont élevé le prestige de leurs nations [54, 57, 58, 124, 125]. Ces protocoles étaient restés secrets en raison de l'intense rivalité entre les deux superpuissances (États-Unis et bloc de l'Est) durant la guerre froide, et à partir des années 1950 les réussites sportives soviétiques ont été accompagnées du développement de recherches scientifiques en biochimie et physiologie de l'exercice, qui ont précédé des recherches similaires dans les pays occidentaux [57, 58]. Ces substances ont surtout été administrées aux femmes qui ont le plus « bénéficié » des hormones mâles. En une période de 4 ans, les performances se sont améliorées comme suit: lancer du poids (hommes) de 2,5 à 4 m; lancer du poids (femmes) de 4,5 à 5 m; lancer du disque (hommes) de 10 à 12 m; lancer du disque (femmes) de 11 à 20 m; lancer du javelot (femmes) de 8 à 15 m ; 400 m (femmes) de 4 à 5 sec ; 800 m (femmes) 5-10 sec; 1500 m (femmes) 7-10 sec [57].

Cependant, ces athlètes ont subi des signes de virilisation dont l'hirsutisme et des changements de voix et ont par la suite été atteintes de graves anomalies médicales suite aux multiples effets secondaires des substances consommées, y compris la mort prématurée [14, 57, 115, 124]. Les scientifiques et médecins d'Allemagne de l'Est qui dans le passé ont géré ces programmes de dopage d'Etat sont aujourd'hui demandés dans des pays d'ex-URSS et certains pays d'Asie (comme la Chine) voulant promouvoir leur statut sportif [54, 124, 125].

Le dopage n'a été reconnu comme un danger potentiel pour le mouvement olympique moderne que dans les années 1950 et n'a été officiellement reconnu que dix ans plus tard, en 1967, par la création d'une liste de substances interdites (mise à jour régulièrement) par le

Comité international olympique (CIO). Il a introduit les tests anti-dopage lors des Jeux de Munich en 1972 [14, 124, 148].

Le dopage fut établi comme contraire à l'éthique et une autre raison de son interdiction a été l'inquiétude croissante concernant la santé des athlètes [9, 50, 147, 148].

Les stéroïdes n'ont pas été inclus dans la liste des substances interdites avant 1974, car aucun test pour leur détection n'était disponible [9, 48, 124, 146]. Bien que l'abus des stéroïdes dans les sports olympiques ait été dénoncé dans les années 1950, son utilisation chez les jeunes athlètes amateurs n'a pas été signalée avant les années 1980.

Dans les années 1980 et 1990, des programmes clandestins de dopage se sont propagés jusqu'en 1998 après la découverte d'énormes quantités de substances dopantes lors du Tour de France [124, 146, 148, 150]. La douane française a arrêté Willy Voet, le kinésithérapeute de l'équipe Festina, pour possession illégale d'aiguilles, de seringues et plus de 400 flacons contenant EPO, hormones de croissance, stéroïdes, amphétamines, stupéfiants et stimulants [124, 150].

En 1999 est créée l'Agence Mondiale Anti-dopage (AMA), avec pour mission de mener la lutte [14, 124, 148]. La plupart de son budget est dépensée dans les tests antidopage. La moitié de ses ressources budgétaires est fournie par les gouvernements nationaux et l'autre moitié par le CIO [14, 125, 126, 128].

En 2006, dans l'affaire Puerto, la police espagnole a saisi des provisions et du matériel d'autotransfusion sanguine dans une clinique à Madrid ; ce type de dopage sanguin est une technique dans laquelle l'athlète extrait son propre sang plusieurs mois auparavant, le stocke, et se le ré-transfuse juste avant la compétition. Cette technique permet d'obtenir un effet identique à celui d'une prise d'EPO : l'augmentation du nombre de globules rouges, du transport de l'oxygène sanguin et de la capacité aérobie [115, 124, 145]. Il a été découvert plus tard que les athlètes soviétiques ont utilisé les techniques de transfusion sanguine dès les années 1970 sans être contrôlés, les recherches clandestines menées par le gouvernement ayant été interdites de publication jusqu'en 1990 [58].

L'utilisation d'agents masquant la présence de substances interdites, la manipulation physique, l'altération des échantillons de contrôles et la non-coopération d'un athlète lors d'un test anti-dopage, sont également considérés comme du dopage [148].

Malgré des années de lutte agressive, et plus de 30 ans après l'introduction des premiers tests, les scandales impliquant l'abus de substances illicites par les athlètes de haut niveau se poursuivent et leurs témoignages continuent d'être à la une des médias [14, 115, 123, 124].

La véritable ampleur de l'utilisation de drogues améliorant la performance est incertaine pour plusieurs raisons: les athlètes se basent sur le planning des contrôles anti-dopage pour programmer efficacement leur prise de produits et éviter d'être détectés ; certains produits sont indétectables et certains contrôles positifs ne sont pas signalés car les instances officielles n'ont souvent pas les moyens de défendre les résultats des tests lors des batailles juridiques inévitables qu'entraînent la suspension d'un ou d'une athlète [115, 145]. De plus, les contraintes logistiques et financières sont telles que l'éradication du dopage semble un objectif irréaliste [50, 125, 126, 128, 145].

Le sport moderne, le fait de vouloir gagner à tout prix, la médiatisation, la gloire et la fortune ont créé un marché grandissant de produits dopants. Plus le sport devient compétitif et lucratif, plus le nombre d'athlètes recourant à ces produits augmente [11, 123, 124, 145]. Le chiffre d'affaire de l'industrie du dopage est estimé aujourd'hui à plus de 1,4 milliards de dollars US. Il est en expansion continue avec la création de nouveaux composés synthétisés et commercialisés, et la création d'un marché noir de substances comme les stéroïdes anabolisants, souvent de qualité douteuse. Le marché n'est plus exclusif aux athlètes de haut niveau mais s'est répandu aux clubs, écoles et associations et à autres populations à risque, comme les adolescents, particulièrement vulnérables. Ces adolescents et sportifs amateurs n'auront pas la gloire et la fortune des élites, mais seulement les effets secondaires, car l'utilisation clandestine de produits dopants sans contrôle médical augmente les risques sur la santé [14, 50, 123-125, 127, 145, 148]. Il est estimé que 1 à 3 millions d'athlètes aux Etats-Unis seulement ont déjà pris des stéroïdes anabolisants, avec des ventes annuelles supérieures à 100 millions de dollars [145]. Autre exemple, la créatine, depuis son introduction en 1992, est devenu le supplément nutritionnel le plus populaire sur le marché sportif, les ventes en l'an 2000 ont été estimées à plus de 300 millions de dollars aux États-Unis (un chiffre triplé depuis 1997). Comme de nombreux suppléments, la créatine n'est pas interdite et n'est pas sous réglementation directe de la FDA (Food and Drug Administration) ; sa commercialisation est cependant beaucoup plus avancée que les recherches cliniques sur ses effets réels [145].

Les manipulations artificielles des performances sportives ont repoussé les limites physiologiques et permis aux athlètes d'aller « plus vite, plus haut et plus fort », mais même avec l'existence du dopage, ces limites physiologiques et les limites imposées par l'âge semblent inévitables. De plus, s'il a bien été démontré une relation entre l'augmentation de la masse musculaire et la dose de stéroïdes administrée, un plateau est observé au-delà de 15 à 20% de la masse initiale [11].

IV – GENETIQUE

Une question fondamentale est le rôle que joue la génétique chez les sportifs de haut niveau. Il n'y a aucun doute que les facteurs environnementaux tels que l'entraînement et la nutrition sont essentiels pour le développement d'un athlète, cependant ces facteurs ne suffisent pas. Tout comme la prédisposition génétique joue un rôle important dans la susceptibilité vis à vis de maladies multifactorielles comme le diabète ou le cancer, la performance sportive est un phénotype complexe sensiblement déterminée par le potentiel génétique [151]. Le bagage génétique d'un athlète influence donc ses capacités physiques. Identifier l'ensemble des gènes impliqués dans la performance sportive n'est pas évident puisqu'un gène « isolé » contribue faiblement à l'hérédité globale, et identifier les effets sur la performance de chaque gène est impossible [3, 142]. Il n'existe pas de gène « magique » unique, mais un ensemble de gènes qui interagissent et contribuent à la performance optimale [141, 142], on peut alors parler de clusters génotypiques et dire que la performance, comprise comme un phénotype, est polygénique ; ceci renforce l'idée que le potentiel de succès sportif est partiellement déterminé à la conception [1, 3, 11, 152-155]. L'évolution s'est appliquée aux éléments du système nerveux comme aux autres organes. Elle a aussi affecté l'intellect conscient [3]. Les variations de la physiologie humaine, dans sa grande diversité, ont des bases génétiques et environnementales [3].

L'anthropométrie et la morphologie musculaire d'un athlète lui permettent d'exceller dans certains sports mais pas dans d'autres. Chaque sport exige une adéquation physique et physiologique pour la réussite au plus haut niveau : un sprinter d'élite n'est pas un marathonien performant [11, 20]. Les différences génétiques et phénotypiques chez les athlètes ont déjà été démontrées et sont associées à des caractères physiques, cardiorespiratoires, intellectuels, perceptifs ou musculaires [7, 153]. Par exemple plusieurs phénotypes liés à l'endurance (dont la $VO_2 \text{ max}$) ayant des composantes génétiques ont été observés chez les athlètes d'endurance de haut niveau [1, 3]. Cette diversité résulte de l'évolution de l'espèce : l'être humain a passé la majorité de son histoire à chasser et se déplacer. Il a donc toujours eu un besoin de mobilité à des vitesses et des distances variées [142]. L'évolution a permis la sélection naturelle en faveur de ceux qui ont survécu aux contraintes de la vie (capables de chasser plus longtemps ou qui ont échappé aux prédateurs) ; ceux ci ont transmis en partie leurs gènes favorables à leur descendance [142, 153, 156]. Historiquement l'être humain chasseur, sans avoir recours aux facilités technologiques de notre époque, devait être capable de tenir le rythme de longues chasses et a utilisé l'oxygène comme source principale d'énergie dans cet exercice, il a donc développé des capacités d'endurance [1, 142]. D'un autre côté, en situation de danger, il devait immédiatement utiliser

une source d'énergie rapide (ATP) pour permettre aux muscles plus puissants de se contracter et réaliser son potentiel de vitesse maximal [142]. Ces conditions ont permis le développement des différents types de fibres musculaires (fibres lentes ou fibres rapides) [142]. D'une certaine façon, le sport est « darwinien », seuls les plus adaptés physiquement au profil particulier exigé par la discipline sportive en question atteignent le niveau maximal [11]. Une récente étude analysant les différences phénotypiques et génotypiques de la locomotion humaine dans les différents milieux (terrestres vs aquatiques) suggère que les champions de courses à pied sont majoritairement originaires d'Afrique alors que les champions de natation sont plutôt d'origine caucasienne en raison de différences anthropométriques portant sur la longueur relative des membres [18, 155]. Les mesures effectuées sur de larges populations ont en effet montré des différences systématiques (position du centre de gravité) entre athlètes d'origine africaine, européenne et asiatiques [18, 157]. Ces dissemblances agiraient différemment en faveur des 2 groupes : les athlètes d'origine africaine auraient 1,5% de vitesse supérieure en course à pied (sprint, 100m) et les caucasiens 1,5% de vitesse supérieure en natation (100m nage libre). La moindre fréquence des nageurs asiatiques sur les podiums pourrait s'expliquer par une taille inférieure par rapport aux nageurs d'origine européenne plus grands [10, 18].

L'augmentation de la taille des athlètes est située dans le contexte de l'évolution : depuis un siècle la taille moyenne a augmenté dans les pays développés. Cette tendance séculaire peut être causée par plusieurs facteurs : une meilleure nutrition, la révolution industrielle, l'urbanisation et l'hétérosis ou rapprochement entre des populations précédemment éloignées géographiquement [11]. La taille est partiellement héréditaire et, par conséquent, le potentiel pour devenir sauteur en hauteur, joueur de volleyball ou de basketball, toutes disciplines très dépendantes de la taille de ses pratiquants au plus haut niveau, est contrôlé par la génétique [156]. Plusieurs facteurs ont fait que les athlètes de nombreux sports (natation, cyclisme, lancer de poids) ont des gabarits de plus en plus grands : le recrutement international, des récompenses et des incitations financières et sociales plus importantes. La taille des joueurs du championnat américain de basketball, la NBA (National Basketball Association), n'a cessé d'augmenter depuis 1940 et le recrutement des joueurs américains les plus grands fut de plus en plus difficile à obtenir. Ceci a conduit les sélectionneurs à rechercher au-delà des frontières des Etats-Unis : les joueurs les plus grands de tous les pays du monde sont recrutés pour jouer en NBA [11].

Il est observé que les athlètes d'Afrique du nord et de l'est excellent dans les épreuves d'endurance, tandis que les athlètes d'Afrique de l'ouest sont plus performants dans les

épreuves de sprint [1, 155]. Certaines études rétrospectives ont montré que les enfants d'Afrique de l'est parcouraient à pied tous les jours des distances très importantes, ce qui leur procure une augmentation de $VO_{2\max}$ de 30% par rapport aux enfants des pays développés qui ne courent quasiment plus. Les facteurs sociaux et environnementaux d'Afrique de l'est sont peut-être également impliqués dès l'enfance dans le succès de ces athlètes dans les courses d'endurance [155].

L'importance de la génétique dans le phénotype sportif est mise en évidence par l'étude HERITAGE. Elle a montré que l'hérédité variait de 20% à 75% pour un certain nombre de facteurs, tel que de la $VO_{2\max}$. L'entraînement ne permettrait, quant à lui, qu'une augmentation de 20%, suggérant que l'aptitude physique et la réponse à l'entraînement présentent aussi une composante génétique [1, 142, 151, 153, 158]. D'autres influences génétiques significatives ont été identifiées pour la force musculaire, la capacité anaérobie et la puissance explosive, la coordination neuromusculaire, la densité osseuse, les réponses hormonales à l'entraînement, la taille moyenne des fibres de type I (lentes oxydatives), l'activité maximale des enzymes produisant l'énergie, et les proportions des types de fibres musculaires I et II (dont la contribution génétique est estimée entre 40% et 50%) [151, 153, 154, 158]. Les couples d'athlètes de haut niveau, qui se rencontrent dans les mêmes lieux et partagent des objectifs similaires, peuvent avoir des enfants avec des polymorphismes avantageux. Il n'est pas rare de trouver trois générations successives de sportifs de haut niveau de la même famille [11, 155]. Cependant un génotype physique avantageux n'est pas suffisant pour former un athlète, s'il n'est pas soutenu par des facteurs psychologiques et socio-économiques favorables [1, 3, 54]. Les facteurs génétiques interagissent donc avec les facteurs environnementaux pour développer optimalement le potentiel d'un athlète de haut niveau.

IV.1. Gènes identifiés dans la performance sportive

La liste des gènes identifiés impliqués dans la performance sportive sont présentés en Table G [1, 7, 152, 154, 159].

Gene	Performance enhancement potential	Function of expressed protein	Models/examples of enhanced physical characteristic(s) and/or performance
<i>EPO</i>	Increased endurance	Stimulates erythropoiesis, increases blood oxygenation and oxygen delivery to tissues	EPO/EPOR signaling pathway: Heterozygous mutation in the gene for the EPOR in one human kindred resulted in stimulated erythropoiesis and increased endurance in an Olympic athlete from this family
<i>PPARD</i>	Increased endurance	Nuclear hormone receptor, transcriptional regulator of fatty acid catabolism in adipose tissue and in skeletal muscle	“Marathon” mice with transgenic overexpression of constitutively induced PPARD had increased endurance and lower accumulation of fat on a high-fat diet
<i>PPARGC1A</i> <i>PPARGC1B</i>		Nuclear transcriptional co-activators; enhance transcription of genes involved in mitochondrial biogenesis and uncoupling. PPARD and PPARGC1A promote conversion of muscle type II to type I. PPARGC1B promotes formation of muscle type IIX fibers	Transgenic PPARGC1A or PPARGC1B mice had greater resistance to fatigue Transgenic PPARGC1B mice remained leaner on a high-fat diet, despite consuming more food
<i>VEGF, FGF, HGF, HIF1A</i> , gene for Del-1	Increased endurance	Increase production of new blood vessels, tissue perfusion and supply of oxygen and nutrients	
<i>IGF1</i> transcripts (for mIGF-1 and MGF)	Anabolic effects—increase in muscle mass and strength	Stimulate muscle regeneration and repair by triggering proliferation and differentiation of satellite cells, promote their incorporation into existing muscle fibers, increase nuclear content, and promote upregulation of protein synthesis	<ul style="list-style-type: none"> • Mice transgenic for mIGF-1 show muscle hypertrophy with little body fat and increased force generation • In rodents, mIGF-1 or MGF expression resulted in muscle hypertrophy and improvement of strength • In rats, combination of resistance training and overexpression of mIGF-1 induced greater muscle hypertrophy than either treatment alone • In mice, mIGF-1 expression in muscles promoted muscle regeneration following injury
Genes for inhibitors of Myostatin (e.g., its propeptide, GASP-1, FLRG, SKI)	Stimulated muscle growth and regeneration	<ul style="list-style-type: none"> • By reducing myostatin level, enhance activation, proliferation and differentiation of muscle progenitor cells into mature myofibers, repopulating and regenerating injured muscle 	<ul style="list-style-type: none"> • Myostatin-null cattle (natural mutation) and mice (targeted deletion mutation) have a “double-muscled” phenotype and decrease in body fat • Point mutation in the 3’ untranslated terminal repeat of MSTN gene results

Suppression of myostatin expression by siRNA or antisense oligonucleotides		<ul style="list-style-type: none"> • May also switch muscle fiber type from slow to fast twitch • Following muscle injury, may accelerate inflammatory cell responses, myoblast migration to the injury site, reduction of fibrosis, improvement of healing 	<ul style="list-style-type: none"> • in translational downregulation of myostatin and contributes to muscular hypertrophy in Texel sheep • Human baby with a loss-of-function mutation in myostatin gene has almost double muscle mass; the baby's mother, a heterozygous carrier of the mutation, was a professional athlete and several members of the same family have been unusually strong • Mice overexpressing myostatin propeptide show increased muscularity and do not deposit fat although on a high-fat diet
Gene for follistatin		Positive regulator of muscle growth, at least partially via inhibitory effect on myostatin	Transgenic mice overexpressing follistatin in skeletal muscles had dramatic increase in muscle growth
<i>GH, GHRH</i>	Anabolic effects - increase muscle mass and strength	Essential for growth, homeostasis of carbohydrates, proteins and lipids; stimulate GH-IGF-1 axis leading to anabolic effects	
Genes for BMP, LMP, IL-1 receptor antagonist, IGF, FGF, TGF- β , TNF receptor-Fc Ig fusion gene, parathyroid hormone gene	Bone fracture and joint healing	Wide range of functions associated with bone formation	
Genes for GAD, POMC, Preproenkephalin, IL-4	Pain relief	Block transmission of pain signals from damaged nerves to brain by triggering production of powerful inhibitory neurotransmitter GABA (GAD) or of endogenous opioid peptides endorphin (POMC) or enkephalins (preproenkephalin)	
Genes for DREAM inhibitors		DREAM suppresses prodynorphin gene transcription and expression. DREAM inhibition stimulates dynorphin expression, activates dynorphin/k-opiate receptor system and leads to reduction in pain	DREAM-deficient mice exhibited attenuated pain responses in several models of pain

Table G. Gènes étant potentiellement impliqués dans les performances sportives [7, 154, 159].

Les études élaborées pour détecter les gènes favorables à la performance sportive ont été réalisées en laboratoire et sur le terrain [154]. Dans le cadre d'une performance aérobie, le phénotype athlétique ultime serait celui qui optimiserait le transport du sang oxygéné vers les muscles actifs (en augmentant le débit cardiaque) et où les vaisseaux sanguins qui irriguent les muscles actifs (perfusion tissulaire) se dilateraient pour améliorer davantage la livraison de l'oxygène et des substrats énergétiques afin d'optimiser le métabolisme au cours d'une performance athlétique d'endurance [142]. Par exemple, les récepteurs adrénergiques β -2 (ADRB2) sont impliqués dans ces facteurs cités ci-dessus influençant la performance et leurs variations génétiques ont été analysées parmi les gènes qui prédisent les performances physiques [142, 151]. En effet des expérimentations utilisant les β -bloquants (spécifiques ou non spécifiques) ont significativement influencé la broncho-dilatation, le rythme cardiaque, la pression artérielle, et le volume d'éjection systolique durant l'effort ; de plus les β -bloquants réduisent le déclin typique de consommation d'oxygène observé avec le prolongement de l'effort (et où la proportion des lipides en tant que substrat énergétique augmente) [142, 159]. Plusieurs autres gènes interagissant simultanément pourraient être concernés autour des récepteurs adrénergiques ou de l'enzyme de conversion de l'angiotensine, des gènes associés à la croissance et au développement musculaire, au développement vasculaire, ou ceux jouant sur la vasoconstriction ou la vasodilatation, ainsi que ceux impliqués dans les réactions métaboliques [142]. Par exemple, la diminution de l'activité de l'enzyme de conversion de l'angiotensine-1 (exprimée par l'allèle du gène ACE-I) est associée à l'amélioration des performances d'endurance en augmentant l'efficacité mécanique des muscles (squelettiques et cardiaque), et l'efficacité des mitochondries ; en revanche l'allèle ACE-D (qui augmente l'activité de l'enzyme de conversion) a été associée à l'amélioration des performances de sprint et de puissance grâce à l'augmentation de la force et à l'hypertrophie musculaire [151, 160]. Les polymorphismes d'autres gènes ont aussi été étudiés, comme l'alpha actinine-3 (ACTN3), qui viennent s'ajouter aux autres gènes polymorphiques (ADRB2 ; l'isoforme M de l'adénosine monophosphate désaminase-1, AMPD1 ; l'apolipoprotéine E, APOE ; et le récepteur B₂ de la bradykinine, BDKRB2) qui interagissent pour former le phénotype d'un athlète [1, 159]. Il est très peu probable qu'un individu soit porteur du « meilleur » génotype de chacun des polymorphismes liés à l'endurance, par le fait que ces génotypes sont rares (<25% de la population), et les individus avec des génotypes associés aux phénotypes maxima sont donc rares [1, 11]. Williams et Folland [1], ont calculé cette probabilité et ont évalué la génétique de l'endurance pour une population entière en utilisant la fréquence de 23 polymorphismes connus, ayant été statistiquement associés à la performance (Table H), elle

est de 0.0005%. Ils ont également calculé un score de génotype total, entre 0 et 100 (le zéro correspondant au génotype le moins favorable et le 100 au génotype « idéal ») et ont estimé la distribution de ce score dans la population générale (Figure R). Le résultat montre que 99% des individus ont un score qui se situe au milieu de cette échelle, entre 37 et 65 avec une moyenne de 50,8 et des scores allant de 22 à 85; démontrant ainsi des profils génétiques très similaires, et la rareté d'un génotype « idéal », d'autre part l'existence d'individus ayant un génotype très défavorable était également improbable [1]. Ces données suggèrent qu'il existe les mêmes limites, d'ordre statistique, dans la distribution du génome humain.

Number of polymorphisms influencing endurance performance	New gene included at each stage	Typical frequency of optimal genotype (%)	Probability of possessing a 'perfect' profile	
			% chance	Approximate odds ratio
1	<i>ACE</i>	21	21.0	1 : 5
2	<i>ACTN3</i>	18	3.78	1 : 25
3	<i>ADRA2</i>	62	2.34	1 : 40
4	<i>ADRB2</i>	35	0.82	1 : 120
5	<i>AMPD1</i>	80	0.66	1 : 150
6	<i>APOE</i>	24	0.16	1 : 600
7	<i>ATP1A2*</i>	81	0.13	1 : 800
8	<i>ATP1A2</i>	5	6.4×10^{-3}	1 : 16 000
9	<i>BDKRB2</i>	15	9.6×10^{-4}	1 : 100 000
10	<i>CKM</i>	49	4.7×10^{-4}	1 : 200 000
11	<i>EPAS1*</i>	33	1.5×10^{-4}	1 : 600 000
12	<i>EPAS1</i>	19	2.9×10^{-5}	1 : 3 million
13	<i>HFE</i>	4	1.2×10^{-6}	1 : 85 million
14	<i>HIF1A</i>	77	9.1×10^{-7}	1 : 110 million
15	<i>HLA-A</i>	2	1.8×10^{-8}	1 : 5.5 billion
16	<i>MT-ND5*</i>	93	1.7×10^{-8}	1 : 6 billion
17	<i>MT-ND5</i>	7	1.2×10^{-9}	1 : 85 billion
18	<i>MT-ND5</i>	7	8.3×10^{-11}	1 : 1.2 trillion
19	<i>MT-TT</i>	7	5.8×10^{-12}	1 : 17 trillion
20	<i>PPARA</i>	70	4.0×10^{-12}	1 : 25 trillion
21	<i>PPARGC1A</i>	40	1.6×10^{-12}	1 : 62 trillion
22	<i>UCP2</i>	17	2.7×10^{-13}	1 : 364 trillion
23	<i>VEGFA</i>	30	8.2×10^{-14}	1 : 1212 trillion

Table H. Probabilités d'avoir un profil génétique parfait, par nombre de polymorphismes : Diminution exponentielle de la probabilité d'avoir un profil génétique parfait plus le nombre de polymorphismes augmente. La probabilité qu'un individu possède un grand nombre de génotypes optimaux pour l'endurance, est extrêmement faible [1].

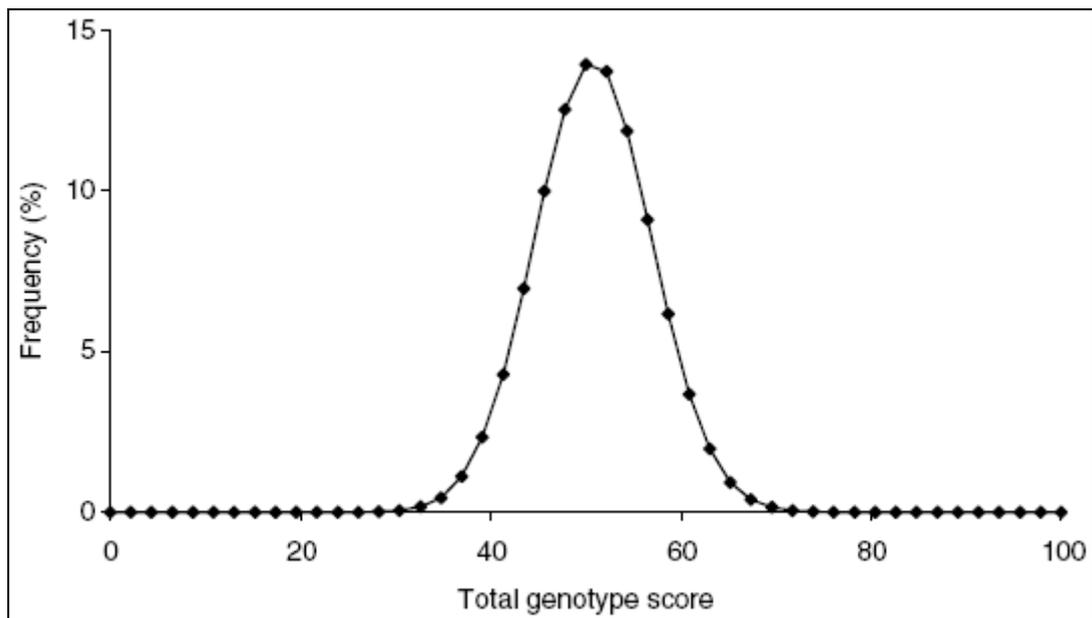


Figure R. Distribution des fréquences du score génotypique total provenant d'un échantillon aléatoire de 1000 000 individus (score moyen: $50,8 \pm 6,2$). La distribution est leptokurtique (formant un cluster vers le milieu) démontrant que la plupart des humains sont très similaires, et donc limités en termes de potentiel génétique pour la performance en endurance. Le nombre d'individus avec des scores génotypiques très bas ou très hauts est clairement restreint, suggérant que les outliers qui existent sont des personnes extrêmement inhabituelles [1].

IV.2. α -actinine-3 (ACTN3)

Les α -actinine sont une famille de protéines se liant à l'actine, la plus spécifique étant l'ACTN3 exprimée uniquement dans les fibres rapides (type II) ; elle a une fonction statique dans le maintien de la matrice myofibrillaire, ainsi qu'une fonction de régulation dans la coordination de la contraction ; elle est responsable de la génération de la force rapide [161-164]. Il a récemment été démontré que la carence en ACTN3 est fréquente dans la population générale et est due à l'homozygotie pour un codon stop prématuré (R577XX) [163, 165]. La fréquence du génotype α -actinine-3 déficient (XX) varie de 25% dans les populations asiatiques à <1% dans une population africaine. La fréquence chez les Européens est d'environ 18%. Il est donc possible que le génotype de l'ACTN3 induise des différences de capacité physique portant, en particulier, sur la vitesse maximale en sprint et en marathon [162, 164, 165]. Compte tenu de la localisation des ACTN3 dans les fibres rapides, la carence en ACTN3 réduirait les performances dans les épreuves de sprint/puissance et seraient donc moins fréquente chez les ces athlètes-la. Cette hypothèse a été testée et vérifiée, en comparant le génotypage ACTN3 chez des athlètes de sprint et des athlètes d'endurance australiens [151, 163, 164].

Les résultats suggèrent que la présence de l'allèle ACTN3 (RR) procure un avantage pour les activités de sprint et de puissance : aucune athlète de sprint féminine n'est déficiente en ACTN3 (aucune ne porte l'allèle XX) et les sprinters ont une fréquence plus faible de l'allèle XX par rapport au groupe témoin (6% vs 18%) et une fréquence plus élevée du génotype RR (50% vs 30%). Le groupe des athlètes d'endurance à l'inverse présente une fréquence plus élevée du génotype XX (24%) par rapport au groupe témoins (18%), (Figure S). Des résultats similaires ont été observés chez des athlètes d'endurance et des sprinteurs finlandais [166].

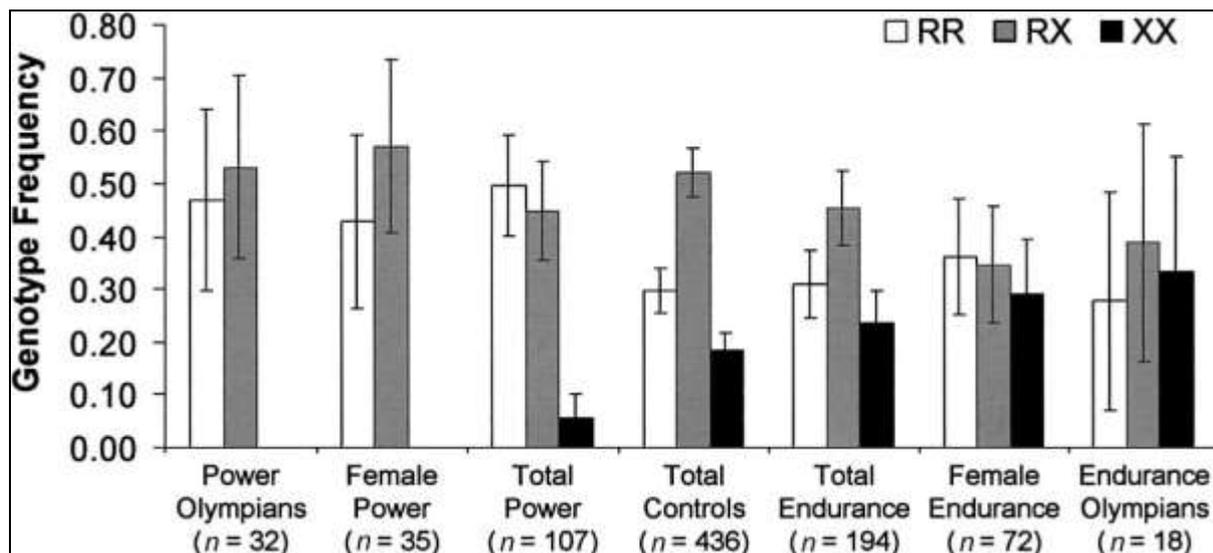


Figure S. Fréquence du génotype ACTN3 chez les athlètes de haut niveau de sprint ou de puissance, les athlètes d'endurance et le groupe témoin. La fréquence du génotype ACTN3 577XX (associé à une insuffisance en ACTN3) est inférieure chez les athlètes de sprint, et remarquablement absente, chez ces athlètes olympiques de sexe féminin. Au total 25 hommes et 7 femmes dans cette étude ont une déficience en α -actinine-3. Inversement, il y a une tendance vers une augmentation du génotype 577XX chez les athlètes d'endurance [164].

La déficience en ACTN3 altère les fonctions des fibres musculaires rapides. Elle est donc associée à des forces musculaires et des performances en sprint inférieures par rapport aux athlètes non-déficients en ACTN3 ; et d'autre part renforce les voies métaboliques aérobies en augmentant les performances d'endurance intrinsèques [163]. Ces données montrent donc la présence de l'ACTN3 chez les sprinteurs et l'absence de l'ACTN3 (génotype XX) chez les athlètes d'endurance, suggérant qu'un individu puisse être prédisposé pour une performance dans un seul domaine (sprint/puissance vs endurance) [162, 164].

D'autres facteurs comme la force générée par les fibres musculaires de type 2, la vitesse et le rythme des mouvements et la capacité de l'individu à s'adapter à l'entraînement sont tous influencés par la génétique [159, 164].

IV.3. Mutations génétiques

Certaines mutations génétiques simples peuvent conférer un avantage dans les performances sportives [84, 126].

Aux Jeux olympiques d'hiver de 1964, un skieur de fond finlandais a remporté deux médailles d'or, il est né avec une mutation du gène codant pour le récepteur de l'érythropoïétine (gène HFE) qui augmente de 25 à 50% la capacité de transport de l'oxygène par ses globules rouges [84, 126, 150]. Cette mutation génétique est responsable de l'hémochromatose héréditaire, maladie autosomique récessive, dans laquelle les taux d'hémoglobine et d'hématocrites sanguins sont élevés, augmentant les réserves en fer et leur dépôt dans l'organisme, avec de graves effets sur la fonction de plusieurs organes (cirrhose du foie, diabète, insuffisance cardiaque) [150, 167, 168].

La plupart des sujets présentant une hémochromatose sont homozygotes pour la mutation C282Y du gène HFE (forme symptomatique sévère et précoce), une faible proportion présente une double hétérozygotie C282Y et H63D (forme asymptomatique mais facteur de risque pour décès de cause cardiovasculaire ou d'infarctus du myocarde), et seulement quelques rares cas présentent une hétérozygotie C282Y ou une homozygotie H63D [167].

Dans le cadre des Jeux Olympiques d'hiver, certains skieurs de l'équipe de France ont été soumis à des prélèvements sanguins systématiques, coordonnés par le CIO (Comité International Olympique) pour le contrôle de paramètres biologiques. Sur ces examens, quatre athlètes sur trente ont présenté des taux élevés d'hémoglobine et ont été soupçonnés de dopage à l'EPO. Les médecins de l'équipe de France ont pu établir la preuve du contraire en s'appuyant sur les éléments du suivi médical longitudinal, mis en place depuis 1999, qui ont toujours montré des taux d'hémoglobine naturellement élevés chez ces athlètes. Ils ont alors effectué des tests ADN pour rechercher une origine génétique à ces anomalies ce qui a permis de mettre en évidence pour chacun d'entre eux une mutation familiale du gène HFE.

Le projet de recherche intitulé « Rôle des mutations des gènes de l'hémochromatose sur la performance sportive d'endurance en altitude » proposé par l'IRMES et dirigé par les Pr O. Hermine et G. Dine avait pour objectif de mesurer la fréquence des mutations du gène HFE chez les skieurs de fond élites français, et de les comparer à d'autres groupes de sportifs et à une population témoin sédentaire, avec l'hypothèse que la fréquence des mutations chez les sportifs est supérieure à celle de la population générale et augmente avec le niveau des

sportifs. Les sujets participants ont signé un consentement éclairé, et l'étude a débuté après avoir obtenu l'accord du Comité de Protection des Personnes, CPP Paris Ile de France II, en mars 2008. L'étude est en cours de rédaction, les méthodes sont disponibles en annexe 6.

Dans l'ensemble, ces analyses ont montré que des mutations HFE sont 2 à 3 fois supérieures chez les deux catégories de sportifs (aérobie et anaérobie) par rapport à la population générale. Cette surreprésentation ne se trouve pas chez les pratiquants de sports « non énergétiques » : la fréquence des mutations chez les joueurs de pétanque est similaire à ceux du groupe témoin. Les sportifs des groupes aérobie et anaérobie ne diffèrent pas les uns des autres, ce qui signifie que les mutations du gène HFE jouent un rôle positif dans la pratique du sport, même au delà des athlètes d'endurance. Ces résultats sont en accord avec la littérature suggérant que la prévalence d'au moins une forme de mutation du gène HFE chez les athlètes de haut niveau est supérieure à la celle de la population générale sédentaire [167, 169]. Ces mutations semblent apporter un avantage physiologique chez les sportifs d'endurance et les sportifs de puissance, puisque les athlètes étudiés participent aux compétitions internationales.

D'autres mutations ont également été également observées chez un haltérophile, un dysfonctionnement de la myostatine lui attribuait des capacités naturelles plus élevées [84, 126, 170].

Ces exemples montrent l'importance des caractéristiques héréditaires de la performance et les variations génétiques liées à ces mutations sont acceptées par les instances sportives [126].

IV.5. Dopage Génique

Les athlètes étant conscients de l'avantage de certains profils génétiques spécifiques pour certains types de sports, pourraient avoir recours au dopage génique dans le futur. Ce mode potentiel d'amélioration de la performance a reçu une attention considérable ces dernières années même si sa faisabilité et sa sécurité chez l'homme sont loin d'être prouvées et restent donc très controversées [126, 170, 171]. Depuis Janvier 2003, l'AMA et le CIO ont interdit le dopage génique, défini comme la manipulation non-thérapeutique des gènes dans le but d'améliorer les performances, et l'ont inclus dans la liste des produits et méthodes illicites [7, 84, 109, 150, 159, 170].

La thérapie génique est une technique initialement destinée à traiter ou prévenir des maladies infectieuses ou dégénératives, des cancers, des maladies héréditaires ou auto-immunes. Elle consiste à introduire un fragment du génome dans les cellules pour corriger une déficience et restaurer l'expression normale des caractères génétiques [7, 159, 170, 172]. Pour les sportifs, les traits physiques, tels que le volume et la force musculaires, les propriétés sanguines, l'efficacité énergétique, et d'autres, semblent être les cibles de la manipulation génétique comme celles-ci ont été les cibles du dopage traditionnel basé sur les molécules [14, 84, 171]. Les gènes potentiellement impliqués dans la performance sportive (Table G) pourraient être ciblés par le dopage génique [7, 159].

De multiples approches ont été décrites, les deux principales stratégies sont soit le transfert direct (in vivo) du gène dans les cellules cibles par injections intraveineuses, sous-cutanées, intramusculaires ou intra vasculaires d'un virus contenant un gène (par exemple codant pour l'EPO) ; soit le transfert indirect (ex vivo): le gène est alors transmis dans la cellule in vitro, puis les cellules génétiquement modifiées sont réinsérées dans l'organisme [109, 170]. Ces fragments viraux ont la capacité d'intégrer les cellules cibles de manière permanente et la faisabilité et l'efficacité de ces approches ont été démontrées dans des études animales. Chez des souris et des singes ayant reçu le gène codant pour l'EPO une augmentation du taux d'hématocrite de 40 à 80% a été observé ; les effets ont duré plus d'un an chez la souris et pendant 12 semaines chez le singe [150, 172].

Certaines méthodes utilisées dans les études précliniques sur des modèles animaux ne sont pas applicables chez l'homme, la thérapie génique chez l'homme est encore à son niveau expérimental et n'est pas encore réaliste ; malgré plus de 1000 essais cliniques depuis 1990 les résultats n'ont pas été encourageants, seules deux formes d'immunodéficiences sévères ont été traitées avec succès par la thérapie génique mais à un coût très élevé, 3 enfants

victimes de ces essais ont développé des leucémies, causant la mort de l'un d'entre eux [159, 172, 173]. Les effets secondaires sont donc potentiellement dangereux et mortels, les risques associés à l'expression des gènes peuvent inclure des réponses immunitaires aux vecteurs viraux injectés, la transformation des vecteurs viraux en virus, le développement de cancers, une overdose ou une surexpression des caractères génétiques induisant une toxicité causée par l'accumulation des protéines produites ou une mauvaise adaptation de l'organisme aux doses excessives [7, 171, 173]. De plus il existe des risques associés aux méthodes d'administrations des gènes, les injections intraveineuses de vecteurs viraux ont causé la mort de certains sujets [170]. Un essai portant sur deux enfants seulement, atteints d'adrénoleucodystrophie (ALD) liée au chromosome X et causée par une carence en protéines ALD, a été publié dans *Science* en 2009 [174]. Cette étude clinique a détecté au bout de 24 à 30 mois de suivi, une reconstitution polyclonale avec expression de la protéine ALD suite à la perfusion de cellules génétiquement corrigées, suggérant que la thérapie génique pourrait offrir des avantages cliniques pour traiter l'ALD [174].

L'utilisation abusive de la thérapie génique chez les sujets sains, notamment les sportifs, sans contrôle clinique et sans les mesures de sécurité appropriées, pourrait avoir de sévères conséquences sur la santé et pourrait augmenter les risques de décès [7, 84, 150]. Par exemple la surexpression du gène de l'EPO pourrait avoir les mêmes effets secondaires que le dopage « classique » à l'EPO ou qu'une mutation du gène HFE, qui augmente l'hématocrite avec un risque de thromboses et d'accident vasculaire [7, 50, 109, 124, 145, 150].

Les athlètes pourraient exploiter un jour les manipulations génétiques afin d'améliorer leurs performances. Ce n'est pas le cas jusqu'à présent et les méthodes du dopage génique ne sont pas, à la connaissance des institutions antidopage, encore en place [170, 171].

V – ENVIRONNEMENT

V.1. Impact de l'environnement sur les performances

Les athlètes ont des capacités biologiques différentes qui résultent de l'interaction entre leur génome et leur environnement [14, 126]. Les meilleures performances humaines se développent donc dans des conditions environnementales favorables. Après avoir analysé les records du monde dans 5 disciplines Olympiques quantifiables à l'environnement standardisé (piscine, gymnase, piste, patinoire), dans des conditions environnementales contrôlées [17], nous avons analysé les records du monde dans des disciplines de plein air qui ont lieu dans des conditions très variables, et sont influencées par les contraintes environnementales, matérielles ou techniques [8]. La version originale et intégrale de l'article est disponible en annexe 7.

Dix épreuves mondiales de plein air non motorisées ont été analysées (Table I).

Event	Sport	Dates	Frequency	Performance number	
				total	best performance
Oxford-Cambridge	Rowing	1829	Annually	153	19
Transatlantic record	Crew sailing	1980	Free	11*	11
Transatlantic record	Solo sailing	1960	Every four years	13	9
Channel crossing	Swimming	1875	Free	772	16
Ironman Hawaii	Triathlon	1978	Annually	30	12
Hour cycling record UCI	Cycling	1876	Free	29*	29
Hour cycling record IHPVA	Cycling	1933	Free	20*	20
Elfstedentocht	Speed ice skating	1909	Annually	16	9
Vasaloppet	Cross-country ski	1922	Annually	86	17
Speed ski record	Down-hill ski	1930	Free	32*	32
Streif down-hill	Down-hill ski	1930	Annually	74	20

*performance is only registered when the best performance is improved.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.t001

Table I. Caractéristiques des dix épreuves (type de sport, date de début et nombre de records) analysées par Desgorces et al, [8].

Les facteurs environnementaux peuvent modifier les résultats selon les règles de la discipline, selon le milieu de mobilité (neige, glace, eau, air), selon le type de mouvement (course, vélo, ski, natation) ou selon la durée de l'événement.

Les meilleures performances (ou records) dans ces disciplines ont été modélisées par le même modèle développé précédemment [17, 55]. Les sports de plein air, suivent comme les disciplines olympiques et le cyclisme sur route, une évolution commune, exponentielle décroissante par série. Les performances atteindront rapidement leurs limites asymptotiques (Figure T). Ceci suggère que les conditions environnementales et climatiques, influencent

ponctuellement les performances, sans modifier la tendance séculaire des progressions qui tendent vers leurs limites.

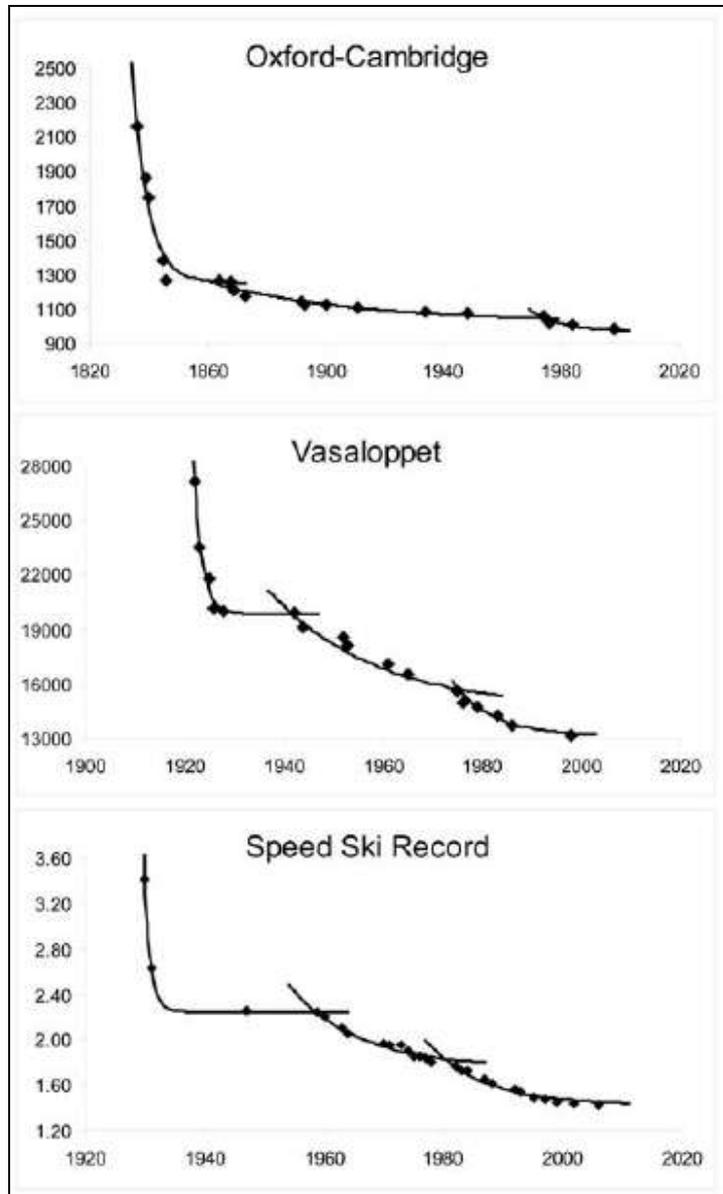


Figure T. Modélisation d'épreuves de plein air ayant 3 périodes de progressions: la course d'aviron d'Oxford-Cambridge, la course de ski de fond de la Vasaloppet, et les records de ski de vitesse (sur 100m) en secondes [8].

Cette étude prouve l'universalité du modèle exponentiel par séries pour décrire l'évolution de toutes sortes d'épreuves sportives et suggère une loi de progression commune à tous les sports qui tend vers des limites « éco-physiologiques ». Elle montre à nouveau l'existence de contraintes physiologiques en aviron, ski de fond, natation en mer, cyclisme et triathlon et

suggère que la technologie ne soit plus que le seul moyen de repousser les limites humaines [8]. Robert Fogel [175] a déjà utilisé le terme d'évolution « techno-physiologique » pour décrire les gains anthropométriques et en santé humaine au cours des trois derniers siècles. Celle-ci agit en synergie avec l'amélioration de l'entraînement physique, des pratiques nutritionnelles et les progrès des connaissances biologiques et médicales dans les sports analysés.

Dans ces processus accélérés survenus au cours des 19^e et 20^e siècles, les performances sportives ont profité des voies de progression techno-physiologiques communes mais vont bientôt atteindre leurs limites. Les contraintes environnementales s'ajoutent maintenant aux obstacles sur les chemins de la progression humaine. Désormais les performances s'appuient essentiellement sur les améliorations technologiques, qui dépendent de l'énergie et de l'économie des systèmes [8].

Pour comprendre de quelle manière l'environnement influence les performances sportives de plein air, nous avons analysé l'impact des paramètres climatiques sur les performances en marathon [176].

L'article, qui est actuellement en review, est présenté ci-dessous dans sa version française.

Impact des paramètres environnementaux sur les performances en marathon

El Helou Nour^{1,2}, Berthelot Geoffroy¹, Tolaini Julien¹, Marc Andy^{1,2}, Tafflet Muriel^{1,3}, Guillaume Marion¹, Hausswirth Christophe⁴, Toussaint Jean-François^{1,2,5}

¹ IRMES (bioMedical Research Institute of Sports Epidemiology), INSEP, 11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

² Paris-Descartes University, 12 Rue de l'école de médecine, 75006 Paris, France

³ INSERM, U970, Paris Cardiovascular Research Center - PARCC, 56 rue Leblanc 75015 Paris, France

⁴ Research Department, INSEP, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

⁵ Hôtel-Dieu Hospital, CIMS, 1 Parvis Notre Dame, 75004 Paris, France

Abstract

Objectif: L'objectif de cette étude était de déterminer quels paramètres environnementaux ont le plus d'impact sur la performance des marathoniens.

Méthodes: Nous avons étudié trois marathons européens (Paris, Londres, Berlin) et trois marathons américains (Boston, Chicago, New York) analysant ces impacts sur les performances des coureurs élités et des coureurs non élités. De 2001 à 2008 les performances de 480000 participants ont été recueillies (10000 par an et par course). Quatre facteurs environnementaux ont été recueillis pour chacune des 48 courses: la température (°C), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (km.h⁻¹) et la pression atmosphérique (hPa), ainsi que les concentrations de différents polluants atmosphériques : NO₂ – SO₂ – O₃ (µg.m⁻³). Un modèle linéaire généralisé a été utilisé pour tester la relation entre vitesse de course et paramètres environnementaux.

Résultats: Les températures de l'air et les performances sont significativement corrélés par une relation en U-inversé et la vitesse moyenne maximale a été obtenue à une température de 9,7 °C. L'ozone a également une influence sur les performances, mais son effet est principalement lié à l'effet de la température. Les autres paramètres étudiés n'ont pas eu d'impact significatif sur les performances. Les marathons européens étaient plus rapides que ceux d'Amérique, ceci pourrait être lié à la moindre variabilité des températures de l'air en Europe.

Conclusions: Le modèle développé dans cette étude, basé sur la température de l'air et les vitesses de course pourrait être utilisé pour de nouvelles prédictions, et aussi pour choisir la date la plus favorable pour organiser une compétition dans une ville donnée, afin d'obtenir les meilleures performances.

Mots-clés

Environnement, température de l'air, pollution de l'air, sport, coureurs de longue distance.

INTRODUCTION

Comme la plupart des caractères phénotypiques, la performance sportive est multifactorielle et influencée par des facteurs génétiques et environnementaux: les facteurs exogènes contribuent à l'expression des caractères prédisposant chez les meilleurs athlètes [177]. Le marathon est l'une des compétitions d'endurance les plus difficiles ; c'est une course de participation massive qui a lieu dans des conditions environnementales très variables, avec des températures qui diffèrent parfois entre le début et la fin d'une même course [178, 179]. La chaleur est préjudiciable pour les coureurs pendant le marathon et est généralement référencé comme limitant pour le contrôle de la thermorégulation [178, 180]. Beaucoup de cas d'hyperthermie (température interne ≥ 39 °C) se produisent lors de températures ambiantes chaudes, tandis que l'hypothermie (température interne ≤ 35 °C) se produit parfois lors de températures ambiantes froides [178].

En outre, participer à des épreuves de plein air expose les athlètes à la pollution de l'air, ce qui soulève des inquiétudes sur la performance et sur la santé [181]. Les coureurs pourraient être à risque lors des compétitions pour plusieurs raisons [181]. Ils sont sujets à des taux de ventilation élevés et la vitesse de l'air inhalé augmente ce qui amplifie la dose de polluants inhalés et leur transport plus profond dans les poumons [181-183]. Les coureurs passent de la respiration nasale à la respiration par la bouche pendant l'effort, ils contournent ainsi les mécanismes de filtration nasale des grosses particules, et ceci pourrait augmenter les effets délétères des polluants sur la santé et sur les performances sportives [182, 184]. L'exposition à la pollution atmosphérique au cours de l'exercice pourrait être attendue à nuire à la performance d'un athlète dans les épreuves d'endurance d'une durée d'au moins une heure [181, 184].

L'objectif de cette étude était de déterminer quels paramètres environnementaux ont le plus d'impact sur la performance des marathoniens, et de déterminer les conditions environnementales optimales pour réaliser les meilleures performances. Les impacts environnementaux ont été analysés dans trois marathons européens (Paris, Londres, Berlin) et trois marathons américains (Boston, Chicago, New York) sur les performances des coureurs élites et des coureurs non élites.

METHODES

Données

Six marathons inclus dans les «IAAF Gold Labeled Road Races » et les «World Marathon Majors» ont été étudiés: Berlin, Boston, Chicago, Londres, New York et Paris. De 2001 à

2008 (les données disponibles sont incomplètes avant 2001) les performances (les temps d'arrivée [secondes] convertis en vitesses de course [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]) des 10000 premiers participants ont été recueillies pour chaque course. Ces données sont disponibles dans le domaine public sur les sites Internet officiels de chaque marathon. Le nombre total de performances récoltées est de 480 000 (8 ans x 6 marathons= 48 courses).

Quatre facteurs environnementaux ont été étudiés pour chacune des 48 courses: la température ($^{\circ}\text{C}$), l'humidité relative (%), la vitesse du vent ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) et la pression atmosphérique (hPa). Les valeurs de ces facteurs au jour et à l'heure de chaque course ont été récupérées pour chaque ville (www.wunderground.com). Les concentrations de trois polluants atmosphériques: NO_2 – SO_2 – O_3 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ont également été recueillies pour chaque course, selon la ville, le jour et l'heure de chaque course [185-187]; pour les marathons américains ces données ont été récupérées par le biais des agences environnementales de chaque état (l'«Illinois Environmental Protection Agency» pour le marathon de Chicago, le «Massachusetts Department of Environmental Protection» pour le marathon de Boston, et le «New York State Department of Environmental Conservation» pour le marathon de New York).

Les valeurs des moyennes des concentrations, pendant la durée de la course, des facteurs environnementaux et des polluants ont été utilisées pour les analyses.

Analyse des données

Pour chaque course, les performances ont été réparties en groupes selon le classement général des coureurs (tableau 1). Pour créer ces groupes, 7 seuils ont été fixés: les temps d'arrivée en dessous de : 2h20min, 2h40min, 3h00min, 3h15min, 3h30min, 3h45min et supérieurs à 3h45min. Le nombre moyen d'athlètes dont les temps sont entre chaque palier dans toutes les courses, ont déterminé la composition des groupes. Par exemple, il y a en moyenne 20 athlètes en dessous du seuil des 2h20min dans chaque course. Ainsi, nous avons défini le groupe d'élite (G1) que les athlètes classés entre la première place et 20 pour chaque course étudiés. Nous avons ensuite calculé la valeur moyenne des vitesses de chaque groupe et il a été utilisé comme critère principal de toutes les analyses dans la présente étude, donc pour chaque course, nous avons 7 valeurs moyennes correspondant à la vitesse moyenne des 7 groupes.

Group	Ranking
Group 1 (G1 - elite)	1 – 20
Group 2 (G2)	21 – 150
Group 3 (G3)	151 – 975
Group 4 (G4)	976 – 2290
Group 5 (G5)	2291 – 4505
Group 6 (G6)	4506 – 7420
Group 7 (G7)	7421 – 10000

Tableau 1. Classification par groupes selon le classement général des coureurs.

Pour chaque groupe, un modèle linéaire généralisé (MLG) a été utilisé pour tester la relation entre la vitesse de course et les paramètres environnementaux (approches univariée et multivariée). Chaque modèle a été ajusté sur la ville du marathon, afin de prendre en compte un effet possible de la localisation géographique du marathon.

Puis, afin de traiter un effet différentiel des paramètres environnementaux sur les différents groupes, un modèle unique a été utilisé pour tous les groupes ensemble et nous avons testé l'interaction entre les groupes et chaque paramètre de l'environnement. Le facteur année n'a pas été inclus dans le modèle parce que le laps de temps étudié a été de courte durée (8 ans) et parce qu'il a été précédemment démontré que les marges de progression des performances en marathon sont maintenant très minimes [49].

Focus sur la température

Les études précédemment publiées [178, 188-190] ont révélé que la température et sa valeur au carré sont les principaux facteurs clés qui influencent la performance en marathon. Afin d'observer l'effet des températures sur un plus grand nombre de données, nous avons analysé ses effets sur les performances de 46 marathons supplémentaires (46 villes) y compris ceux organisés dans des conditions extrêmes (Marathon des Sables et Marathon du pôle Nord). Nous avons recueilli les vitesses des vainqueurs pour les années disponibles entre 2002 et 2009 des 46 marathons, totalisant 291 courses (291 performances). Une régression linéaire a été réalisée en utilisant les valeurs de la température, de la température au carré, et d'un intercepte. Ce modèle a été ajusté aux températures par rapport aux vitesses des vainqueurs.

RESULTATS

Une description complète des variables est donnée dans le tableau 2.

La vitesse moyenne des coureurs a varié entre $2,6\text{m.s}^{-1}$ (G7, Chicago 2007) et $5,4\text{m.s}^{-1}$ (G1, Paris 2008). La figure 1 montre la vitesse moyenne du groupe d'élite (G1) dans les 6 marathons étudiés.

		Berlin	Boston	Chicago	Londres	New York	Paris
Temperature (°C)	Mean	14,7	11,8	12,6	11,6	13	8,3
	Std	3,8	5,3	7,4	3,2	4,3	3,8
	Min	10,3	7,9	4,4	8,7	6,8	4,2
	Max	21,8	22,4	25	17,4	17,6	15,9
Pressure (hPA)	Mean	1018,2	1011,6	1021,8	1008	1019,3	1018,3
	Std	5,7	14	6,1	14,6	8,1	7,2
	Min	1014	981,3	1012,2	977	1010	1005,5
	Max	1029	1029,3	1030	1019,5	1034,2	1026
Relative humidity (%)	Mean	73,4	66,1	63	67,7	56,3	75
	Std	14,3	23,7	9,5	14,3	14,4	11,3
	Min	53	26	52	49,5	39	51
	Max	92	96	79	85	84	83
Wind speed (km.h ⁻¹)	Mean	10,8	19,8	14,8	11,8	8,9	17
	Std	3,8	7,6	7	7,5	4,1	10,1
	Min	5,3	11,5	4,3	3	2,9	5,8
	Max	15,3	34,9	24,4	21,7	13,9	30,9
NO ₂ (µg.m ⁻³)	Mean	26,9	32,1	26,3	38,6	63	44,3
	Std	3,5	10,1	14,6	12,3	10,3	14,6
	Min	22	23,8	9,8	22,8	49,1	27,5
	Max	33,2	50,5	52	53	77,3	73,1
SO ₂ (µg.m ⁻³)	Mean	6,1	7,9	6,9	4,2	23,3	6,8
	Std	3,3	2,6	3,4	2,8	12,2	3,2
	Min	1,4	5,4	2,1	0	12,5	1,5
	Max	10,7	12,1	12,4	8	42,4	10,3
O ₃ (µg.m ⁻³)	Mean	42,7	72,2	56,3	56	27,1	70,8
	Std	21	30,2	12,4	18,1	10,4	9,7
	Min	21,2	18,6	41,1	40,7	11,1	55,2
	Max	81,8	122,7	71,2	92,3	41	82,1

Tableau 2. Description des paramètres environnementaux et des polluants. La valeur de la concentration moyenne de toutes les années est donnée pour chaque paramètre. Quatre courses n'ont pas été incluses dans l'analyse parce qu'elles présentaient des données environnementales manquantes: Londres et Paris en 2001, Berlin en 2007 et à New York en 2008.

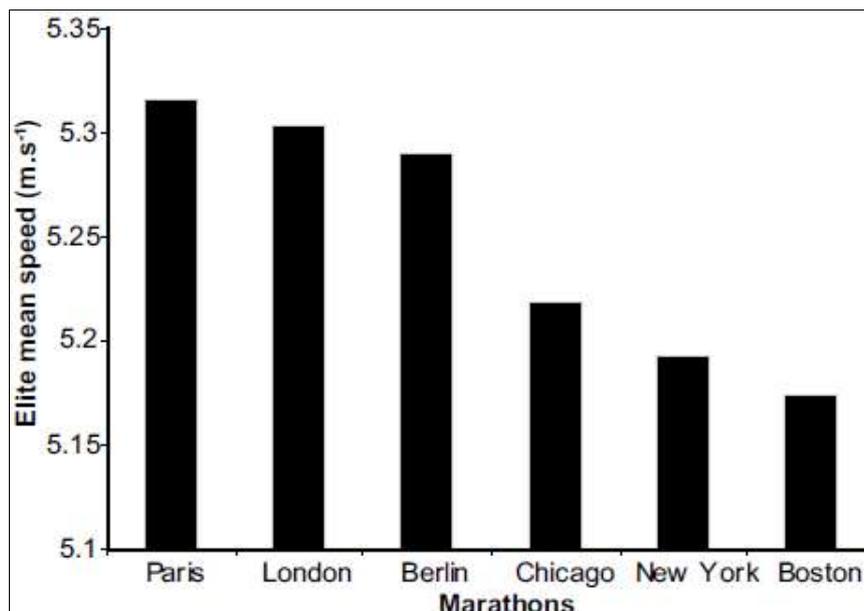


Figure 1. Vitesses moyennes du groupe d'élite (G1) dans chaque ville. Les marathons européens sont plus rapides que les marathons américains.

Facteurs environnementaux et vitesse moyenne

Les résultats des analyses univariées et multivariées par groupe de performance, et le modèle multivarié pour tous les groupes sont donnés dans le tableau 3.

Analysis	Group 1					Group 2					Group 3					Group 4				
	Univariate		Multivariate*			Univariate		Multivariate*			Univariate		Multivariate*			Univariate		Multivariate*		
Parameter	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	p	Estimate	p	R2
temperature	-0.014	<.0001	0.022	0.01	0.820	-0.016	<.0001	0.015	0.1	0.719	-0.017	<.0001	0.018	0.03	0.865	-0.018	<.0001	0.020	0.02	0.895
(temperature) ²			-0.001	0.0008				-0.001	0.005				-0.001	<.0001				-0.001	<.0001	
O3	-0.004	<.0001	-0.002	0.002		-0.003	<.0001				-0.003	0.0008				-0.003	0.0007			
vent	0.000	0.8				0.003	0.2				0.002	0.4				0.001	0.5			
pressure	0.000	0.8				-0.001	0.6				0.000	0.9				0.000	0.8			
humidity	0.172	0.09				0.202	0.06				0.121	0.3				0.125	0.3			
NO2	0.000	0.9				-0.001	0.3				-0.002	0.2				-0.002	0.1			
SO2	-0.003	0.3				-0.004	0.09				-0.004	0.1				-0.004	0.1			

Analysis	Group 5					Group 6					Group 7					All Groups				
	Univariate		Multivariate*			Univariate		Multivariate*			Univariate		Multivariate*			Multivariate Analysis				
Parameter	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	p	Estimate	p	R2	Estimate	Std error	t value	p	R2
temperature	-0.018	<.0001	0.021	0.01	0.890	-0.017	<.0001	0.020	0.02	0.877	-0.017	<.0001	0.021	0.03	0.865	0.021	0.004	4.95	<.0001	0.993
(temperature) ²			-0.001	<.0001				-0.001	<.0001				-0.001	0.0002		-0.001	0.000	-9.29	<.0001	
O3	-0.003	0.0007				-0.003	0.002				-0.003	0.004								
vent	0.001	0.6				0.002	0.5				0.002	0.5								
pressure	0.000	0.8				0.000	0.9				0.000	0.9								
humidity	0.127	0.2				0.121	0.3				0.127	0.3								
NO2	-0.002	0.1				-0.002	0.1				-0.002	0.08				-0.001	0.000	-2.97	0.0032	
SO2	-0.004	0.1				-0.004	0.1				-0.004	0.1								

Tableau 3. Relation entre facteurs environnementaux et vitesse moyenne de course par groupe (analyses univariée et multivariée pour chacun des 7 groupes). Seuls les paramètres significatifs ont été signalés pour l'analyse multivariée. Les modèles ont été ajustés sur la location du marathon. **Relation entre facteurs environnementaux et vitesse moyenne de course pour tous les groupes.** Le modèle a été ajusté sur la location du marathon et sur les groupes. Seuls les paramètres significatifs sont donnés.

L'analyse univariée par groupe a montré que pour chaque groupe, les vitesses moyennes ont été affectées par la température de l'air et par l'ozone (tableau 3); lorsque les valeurs de température et de l'ozone ont augmenté, les performances ont diminué. Toutefois, dans l'analyse multivariée, seules la température de l'air et sa valeur carrée se sont révélées être significatives (sauf pour le groupe élite, où l'impact de l'ozone a également été significatif, tableau 3). La figure 2 montre les valeurs prédites par rapport aux valeurs observées pour la température (figure 2A) et pour l'ozone (figure 2B) du modèle multivarié.

L'approche multivariée tous groupes (tableau 3), montre également que la température et sa valeur au carré agissent sur les vitesses, quand la température augmente les vitesses diminuent ; le NO₂ semble également avoir une influence négative significative sur les vitesses.

Aucun des autres paramètres (vent, pression, humidité et SO₂) n'a eu d'impact sur les performances, ni dans la méthode univariée, ni dans l'analyse multivariée. La température (et sa valeur au carré) semble être le paramètre qui a l'impact le plus significatif sur les performances, comme l'ont suggéré les études précédentes [178, 188-190]. L'interaction statistique avec les températures a été testée et n'est pas significative: l'effet de la température sur la vitesse était similaire dans chaque groupe.

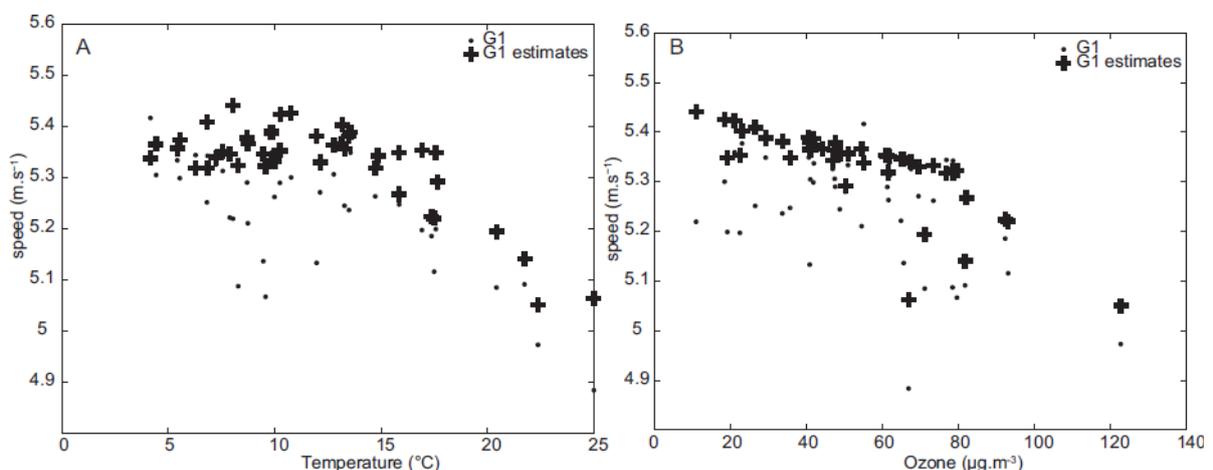


Figure 2. A. Température vs. vitesses pour les groupes élites et **B.** Ozone vs. vitesses pour les groupes élites. Les données réelles sont représentées par rapport aux valeurs estimées du modèle multivarié.

Température

Trois des six grands marathons étudiés sont organisés en avril, au printemps, et les trois autres sont organisés en automne, les températures dans cette étude ont varié entre 4,2°C et 25°C (Tableau 2). Dans les 291 courses supplémentaires (des 46 villes supplémentaires), les

températures de l'air ont varié entre -37°C et 42°C . Le modèle a été ajusté ($R^2=0,92$; $F=383,52$; $p=0$) et la température optimale pour courir un marathon à la vitesse maximale a été déterminée à $9,7^{\circ}\text{C}$ (figure 3).

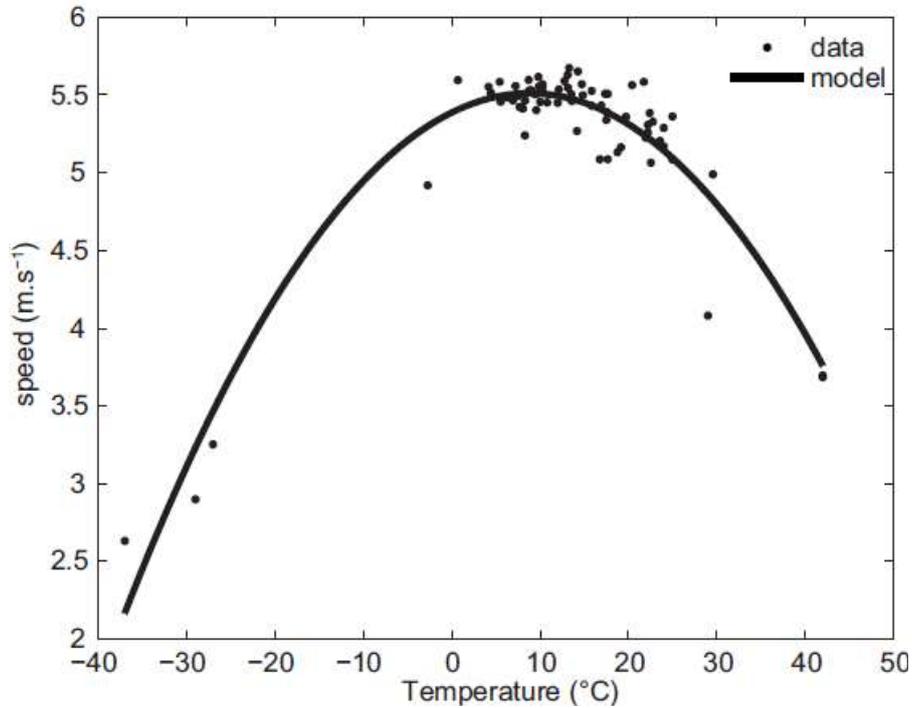


Figure 3. Focus sur la température dans 46 villes différentes (291 courses). Vitesses des vainqueurs (points) en fonction de la température de l'air ; la relation est décrite par une simple équation parabolique.

DISCUSSION

La présente étude confirme les précédents résultats, et démontre que parmi les paramètres environnementaux, le principal facteur influençant la performance du marathon est la température de l'air. Cela est démontré quelle que soit la méthode utilisée; dans les modèles univariés et multivariés, les vitesses en marathon ont été significativement corrélées aux conditions météorologiques, et les coureurs à tous les niveaux de performance ont été touchés de manière similaire par la température de l'air. L'originalité de la présente étude est que l'analyse a été réalisée sur trois grands marathons européens (qui n'ont pas été analysés dans de précédentes études), et sur trois marathons américains, et la relation entre les températures de l'air et les vitesses de course a été décrite par un modèle linéaire, en étendant nos observations sur la performance des vainqueurs de 46 autres marathons à travers le monde, y compris ceux organisés dans les conditions extrêmes. Selon ce modèle, une relation en U-inversé a été obtenue entre la température de l'air et la vitesse de course (figure 3), et la

vitesse maximale a été identifiée à une température de 9,7°C; ce qui suggère que c'est la température optimale pour la meilleure performance en marathon (potentiellement battre un record). Une légère augmentation de la température a causé la diminution des performances en marathon (figure 3) d'une manière prévisible et quantifiable [191, 192], et d'autre part, une diminution des températures (figure 3) cause également une régression des performances [189]. Les études antérieures n'ont pas pu identifier la température idéale pour courir un marathon, mais ont déclaré qu'un temps frais (10-12°C) est la norme pour obtenir des performances rapides sur le terrain [189, 191, 193]; et l'indice de température au thermomètre-globe mouillé (WBGT) optimal a été défini à 12,6°C pour les femmes, et 12,7°C pour les hommes avec une baisse de performance lors de l'augmentation de l'indice WBGT [194-196]. L'exercice est moins bien toléré lorsque la température ambiante est élevée, avec une réduction correspondante de la performance physique [191, 194-196]. Un temps plus frais est associé à une amélioration de la capacité de maintenir la vitesse de course, par rapport à des conditions plus chaudes, particulièrement chez les coureurs les plus rapides [192]. Les meilleures performances et la plupart des records du monde en marathon ont été réalisées dans des températures fraîches (10-15°C) et ont été courus le matin [191, 195]. Tous les départs des marathons dans cette étude, à l'exception de Boston ont été donnés dans la matinée des jours de week-end (Chicago 7h30; Paris 8h45; Berlin 9h00; Londres 9h45; New York 10h00; à Boston jusqu'en 2006 le départ des courses était donné à midi, après 2007 l'heure du départ a changé jusqu'à 10h00); le marathon de Boston est le plus lent parmi les 6 marathons étudiés (figure 1). En laboratoire, les conditions considérées comme chaudes sont à des températures supérieures à 30°C [192], cependant les conditions météorologiques réelles au-delà de cette température sont rares dans les compétitions sportives ou les marathons, sauf durant les jeux olympiques d'été [191, 192] et le Marathon des Sables (figure 3); effectivement la plupart des marathons n'ont pas lieu dans des conditions climatiques extrêmement chaudes ou froides [179].

Température de l'air et thermorégulation

L'hyperthermie est le déséquilibre entre la production de chaleur et la dissipation de chaleur [178, 180, 194, 197-199]. Le premier effet mesurable de l'hyperthermie au cours d'un marathon, avec la déshydratation, est la réduction de la performance physique [179, 190, 200], contraignant ainsi les systèmes cardiovasculaire, musculaire et le système nerveux central [197, 198, 201]. La réduction de la capacité de l'exercice d'endurance dans des conditions météorologiques chaudes a été documentée par les études antérieures, soit par la

diminution la durée de l'exercice avant l'épuisement, soit par la régression de la performance [190, 202]. Une thermorégulation optimale est observée chez les coureurs qui sont acclimatés à la chaleur et bien hydratés avant et pendant la course [179, 203].

Les relations entre la température de l'air et l'humidité sont complexes [178]. Dans notre étude, la relation entre l'humidité et les vitesses du marathon n'était pas significative (tableau 3). En fait, seulement à des températures extrêmes l'effet de l'humidité sur la performance devient significativement important [193]. Un temps chaud et humide peut sérieusement limiter l'échange de chaleur [178, 179] et d'autre part, une faible température de l'air en combinaison avec le vent et la pluie, renforce les risques d'hypothermie et de blessures superficielles de refroidissement éolien [194, 204]. Entre ces deux extrêmes, l'impact de l'humidité est relativement faible ; et se trouve la température optimale pour la performance [194].

La limite supérieure acceptable pour une compétition sportive jugée par l'American College of Sports Medicine (ACSM) est un WBGT de 28°C [178, 193, 205], mais cette limite ne reflète pas la sécurité chez les athlètes non acclimatés, et les coureurs de marathon non-élites [205]. Roberts [205] a déclaré que les coureurs non-élites ne devraient pas être autorisés à courir un marathon lorsque le WBGT est supérieur ou égal à 20,5°C. Dans des conditions de chaleur et d'humidité élevées, non seulement la performance est atténuée, mais le risque sur la santé augmente également [194] ; lorsque le WBGT est >13°C, le nombre et le taux de plaintes médicales à la ligne d'arrivée ainsi que les abandons pendant la course du marathon augmentent considérablement [205].

Lors du marathon de Boston de 2004 (couru à une $T^{\circ}= 22,4^{\circ}\text{C}$) plus de 300 cas d'urgence médicale ont été observés, par conséquent le temps du départ de la course a changé de midi (12h00) pour démarrer plus tôt (10h00) dans le but de diminuer le stress thermique et le nombre d'accidents connexes [205]. Dans nos résultats, le groupe élite au marathon de Boston 2004 a été plus lent de 6 minutes par rapport à la moyenne des autres années. Le marathon de Londres en 2007 a été couru dans un temps chaud par rapport au temps moyen de Londres ($T^{\circ}= 17,4^{\circ}\text{C}$ en 2007 contre une moyenne de 11,3°C pour les autres années), plus de 5000 cas médicaux ont été enregistrés dont 73 hospitalisations, 6 cas de déséquilibre électrolytique grave, et un décès [205]. Le temps d'arrivée moyen (moyenne de tous les participants) a été de 17 minutes plus lent que d'habitude [205]. En revanche, en 2008 le temps était frais et pluvieux ($T^{\circ}= 9,8^{\circ}\text{C}$), et le nombre de cas médicaux a été inférieur de 20% [205]. Le

marathon de Chicago de 2007 ($T^{\circ}= 25^{\circ}\text{C}$) a été interrompu 3,5h après le départ [205] avec 66 hospitalisations (12 soins intensifs et 1 décès). Dans nos résultats, le groupe d'élite au marathon de Chicago de 2007 a été plus lent de 11min13sec par rapport à la moyenne des autres années. Le WBGT lors du départ était de $22,2^{\circ}\text{C}$ et le pic a été de $28,9^{\circ}\text{C}$ [205].

Un élément inévitable contribuant au développement de la fatigue au cours de l'exercice en conditions de chaleur est l'augmentation de la température corporelle [189, 190, 193, 200]. L'épuisement lors d'un exercice en conditions de chaleur a lieu lorsque la température corporelle atteint un niveau critique, quel que soit son niveau initial [200]. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_{2\text{max}}$, $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) et la vitesse moyenne de course ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) sont significativement corrélées avec la température corporelle [178]. L'augmentation de la température du corps agit également, sur le système nerveux central en réduisant la motivation pour poursuivre l'exercice [195, 206, 207], et en augmentant le taux de dégradation du glycogène musculaire [189, 190]. L'augmentation de la température de la peau (dans un environnement chaud) crée une plus grande pression circulatoire et réduit la tolérance à une température corporelle élevée [179]. Les facteurs génétiques, l'entraînement et l'acclimatation, améliorent la tolérance aux températures élevées [179]. Les coureurs africains pourraient avoir un avantage sur les athlètes caucasiens dans les compétitions en conditions environnementales chaudes [206]. Les coureurs de longue distance africains ont généralement des gabarits plus petits et plus minces que les coureurs caucasiens; leur petite taille et leur indice de masse corporelle bas peut constituer un avantage, car ils produisent moins de chaleur et ont des taux de stockage de chaleur plus bas [206, 207]. L'acclimatation impliquant des expositions répétées d'exercice physique en conditions de chaleur, a significativement amélioré la durée de l'exercice avant l'épuisement, mais il y a peu de preuves d'une amélioration de la capacité à tolérer la température corporelle [190, 194, 203]. Il n'y a également pas de preuve concernant la meilleure tolérance thermique chez les athlètes entraînés en endurance [194].

Comparaison entre les groupes

Des études précédentes ont montré que l'impact des conditions météorologiques sur la vitesse de course dépend du niveau du coureur et de sa position d'arrivée dans le classement général, tel que les coureurs plus rapides sont moins affectés que les plus lents [180, 192, 194, 196]. Les athlètes élités pourraient être mieux acclimatés à la chaleur car une acclimatation insuffisante affecte négativement la tolérance à la chaleur [190, 205]. Une autre explication

serait par les différents objectifs de départ des coureurs; les élites courent pour gagner, alors que les autres sont là pour plutôt battre leur record personnel [192]. Ces études cependant, ont uniquement observé un nombre réduit de coureurs, Ely et al. [188, 192] et Montain et al. [196] ont observé les temps d'arrivée des gagnants et des 25^e, 50^e, 100^e et 300^e au classement général, alors que notre étude a analysé une quantité plus exhaustive de données: 10000 participants pour chaque course chaque année, classés en sept groupes (tableau 1). Les résultats de notre étude, ayant analysé un plus grand nombre d'athlètes, diffèrent des précédentes observations, puisque nous avons constaté que les performances de tous les groupes sont similairement affectées par la température et les autres variables environnementales (tableau 3). Nos résultats ont montré que les performances des athlètes élites et non-élites diminuent lorsque la température de l'air augmente (tableau 3); indépendamment du niveau des coureurs, la température affecte leur performance de manière similaire.

En outre, les performances des femmes élites sont également affectées par la température [188]; leur vitesse de course diminue quand la température de l'air augmente. Cependant, certaines études ont observé que les effets de la chaleur est moins évident chez les femmes que chez les hommes, probablement dus en partie à une plus large variabilité entre les performances féminines, et aux différentes réponses physiologiques à l'exercice prolongé entre les hommes et les femmes [178, 180, 188, 196, 208].

Effets du parcours des courses et de la direction du vent

Notre étude ne montre pas d'effet de la vitesse du vent sur la performance en marathon (tableau 3). Trois des six marathons ont un circuit fermé (Paris, Berlin et Chicago): pour une direction du vent constante, nous supposons qu'il ya un effet positif du vent dans une partie du circuit et un effet négatif dans l'autre partie, ce qui pourrait conduire à une annulation de l'effet du vent sur les performances pour ces trois marathons [193]. Le vent ne semble également pas affecter le marathon de New York, ceci pourrait s'expliquer par l'orientation de la course du sud vers le nord qui est une direction perpendiculaire à la direction fréquente du vent. Deux marathons sont affectés par le vent; la direction de course du marathon de Londres est principalement vers l'ouest, et les coureurs font face au vent sur les deux tiers du parcours, le vent de face ralentit la vitesse en augmentant les forces de traînée aérodynamique [209]. A Boston la course est orientée vers l'est, la direction du vent est généralement favorable, un vent arrière aide les coureurs en réduisant les forces de traînée aérodynamiques [209]. Le vent pourrait également avoir un effet légèrement positif sur l'efficacité du bilan thermique en

améliorant la perte de chaleur à la fois par convection et par évaporation [180, 193, 194] ; une raison possible pour laquelle dans notre étude l'effet du vent sur la performance est relativement faible.

Marathons Américains vs marathons Européens

Les marathons européens sont significativement plus rapides que les marathons américains ($p < 0,0005$; figure 1). C'est peut-être en raison des températures de l'air plus faibles avec moins de variabilités au cours des marathons européens et une plus grande instabilité pendant les courses américaines. Ceci pourrait également être attribué au climat continental des États-Unis par rapport au climat océanique de l'Europe. Un autre effet pourrait être l'emplacement géographique du marathon, par exemple Chicago se trouve à une altitude plus élevée (178m) par rapport aux 5 autres villes étudiées (altitude moyenne = 22,6m) et les altitudes plus élevées sont connues pour être préjudiciable à la performance en endurance [210, 211].

Polluants atmosphériques et performance

Mesurer l'effet séparé d'un seul polluant n'est pas simple, car il n'est pas isolé dans l'air inhalé, mais au contraire combiné avec d'autres polluants ; ainsi l'influence observée sur la performance est probablement due à l'effet combiné de ces multiples paramètres [193]. En outre, les paramètres étudiés n'expliquent pas entièrement les variations de vitesse observées et des paramètres supplémentaires seraient nécessaires à analyser (Figure 2).

Les performances des sept groupes dans cette étude ont été touchées par l'ozone dans l'analyse univariée, lorsque les niveaux d'ozone ont augmenté les vitesses ont diminué. Toutefois, le groupe d'élite seulement (Group 1, tableau 3) a été influencé par l'ozone dans l'analyse multivariée par groupe ; et le NO_2 a semblé avoir une influence significative sur les vitesses dans l'analyse multivariée tous groupes, ceci qui est probablement dû à des différences de puissance statistique entre les différentes méthodes, parce que le nombre de données incluses dans l'analyse multivariée tous groupes étant plus important, les chances d'obtenir une relation significative entre les données sont supérieures.

Les concentrations d'ozone dans l'air sont linéairement croissantes avec la température [182, 184]; ainsi dans notre étude, les effets de l'ozone peuvent être secondaires et étroitement associés aux effets des températures sur la performance. Les effets de l'ozone peuvent être préjudiciables sur la performance physique lorsque l'exposition est suffisamment élevée, en provoquant une gêne respiratoire [181, 182, 184, 212], une diminution du volume expiratoire

forcé (VEMS) ou de la capacité vitale forcée (CVF), et une diminution de la puissance physique et de la consommation maximale d'oxygène [181, 212].

L'exposition à d'autres polluants comme les PM_{2.5} et l'acidité (acide sulfurique) a été associée de façon indépendante avec les régressions aiguës de la fonction pulmonaire, mais ces changements de la fonction pulmonaire ont été peu probable d'aboutir à des symptômes cliniques [212].

Au cours des marathons, les concentrations de polluants de l'air n'ont jamais été au delà des limites fixées par les agences nationales de l'environnement (US Environmental Protection Agency - EPA; Agence Européenne pour l'Environnement - AEE; AirParif) ou au delà des niveaux connus pour affecter la fonction pulmonaire dans les situations de laboratoire [183], et de nombreuses études n'ont montré aucun effet des polluants atmosphériques sur la performance sportive [183] ; le corps humain serait peut être capable de s'adapter à différents polluants auxquels il est fréquemment exposés [181].

CONCLUSIONS

La température de l'air est le principal facteur influençant les vitesses de course en marathon quel que soit le niveau de performance de l'athlète. La vitesse de course est directement liée à la température à travers une relation en U-inversé, et la température optimale pour courir un marathon à la vitesse maximale est déterminée à 9,7°C. L'ozone a également une influence sur les performances, mais son effet est principalement lié à l'effet de la température. Les autres paramètres environnementaux analysés n'ont pas d'impacts significatifs sur les performances. Les marathons européens sont plus rapides que les marathons américains, ceci est probablement lié à la faible variabilité des températures en Europe. Le modèle développé dans cette étude, basé sur la température de l'air et les vitesses de course pourrait être utilisé pour de nouvelles prédictions, et aussi pour choisir la date la plus favorable pour organiser une compétition dans une ville donnée, afin d'obtenir les meilleures performances.

V.2. Sport et Développement

En plus des paramètres climatiques, l'environnement sociopolitique ainsi que les facteurs historiques et géographiques ont un impact direct sur les performances sportives. Un record du monde, valeur extrême des capacités physiologiques de l'homme, est la résultante d'une opportunité économique et sociale en plus du potentiel génétique et de l'environnement physique d'un athlète [1]. En fonction de leur nationalité et de leur sport, les athlètes ont des encadrements et des accès aux soins, à la médecine et aux technologies, considérablement différents : le parcours d'un athlète de haut niveau dans un pays riche est différent de celui d'un athlète d'un pays en voie de développement [126]. Les nombreuses compétitions sportives au cours du 20^e siècle ont favorisé la confrontation directe entre les nations dans la quête de records du monde (RM), et le nombre de RM obtenu par chaque pays permet une compréhension plus précise des stratégies nationales et de la participation des Etats aux compétitions sportives de haut niveau [54].

Notre étude publiée en 2009 a testé l'hypothèse selon laquelle les records du monde reflètent l'impact des événements historiques ou politiques (guerres mondiales, Grande Dépression, guerre froide, révolution culturelle, chute de l'URSS) sur le phénotype humain tel qu'il est évalué par les performances sportives [54]. La version originale et intégrale de l'article est disponible en annexe 8.

La nationalité des détenteurs de 2876 RM et 4672 médailles olympiques (MO) et le lieu où la compétition s'est déroulée, ont été analysés dans 4 disciplines entre 1896 et 2008: athlétisme, natation, haltérophilie et cyclisme. Soixante-trois nations détiennent au moins un RM, dont quarante-deux pays hôtes (ayant généré des RM « à domicile »). Les pays ont été classés par régions selon la classification du CIO. Les résultats ont montré que 54,9% des RM ont été établis à domicile. Les deux régions qui détiennent le plus grand nombre de RM et de MO sont l'Amérique du Nord (26,1%, 27,8%, respectivement) et l'Europe de l'ouest (23,5%, 30,6%) (Figure U). Le classement par Nations est le suivant: les États-Unis (26,1%, 25,8% respectivement pour les RM et MO), la Russie (18,4%, 9,6%), la RDA (6,1%, 5,4%) et l'Allemagne (5,7%, 5,8%).

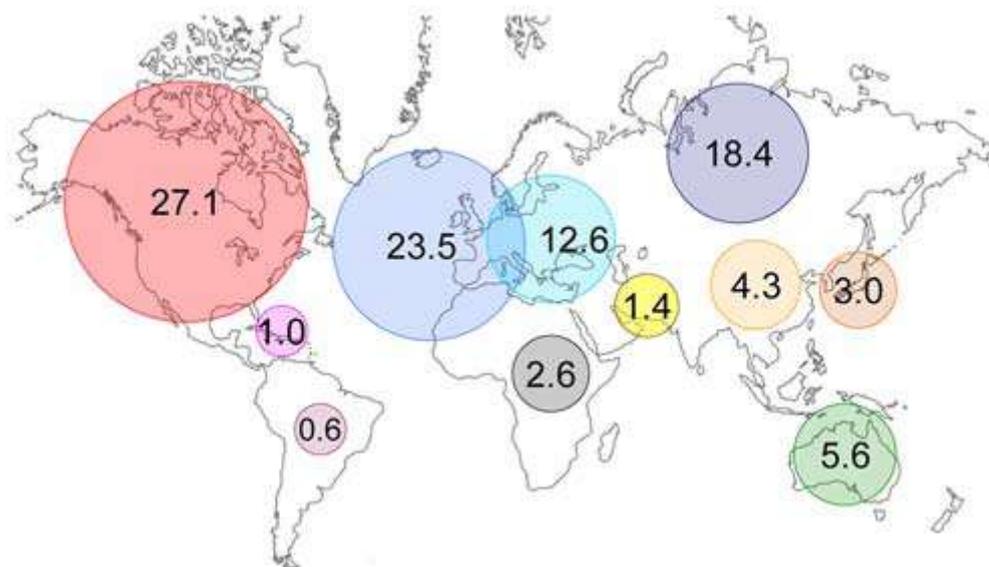


Figure U. Proportion des RM par région: Amérique du Nord: 27,1%, Europe de l'Ouest: 23,5%, Russie: 18,4%, Europe de l'Est: 12,6%, Océanie: 5,6%, Chine: 4,3%, Pacifique Nord: 3,0%, Afrique: 2,6%, Asie: 1,4%, Caraïbes : 1,0%, Amérique du Sud: 0,6% [54].

Jusqu'en 1946, la majorité des RM ont été établis à domicile, la distance géographique ou la crise de 1929 ont rendu les voyages difficiles et coûteux pour les pays non-européens. Après la Seconde Guerre mondiale, le taux de RM à domicile a diminué, passant de 79,9% à 23,3% en 2008, avec l'expansion des voyages et la participation d'un nombre croissant d'athlètes et de nations [54].

Les proportions annuelles cumulées des RM reflètent les défis économiques, géopolitiques et développementaux autour du sport durant les 20^e et 21^e siècles (Figure V).

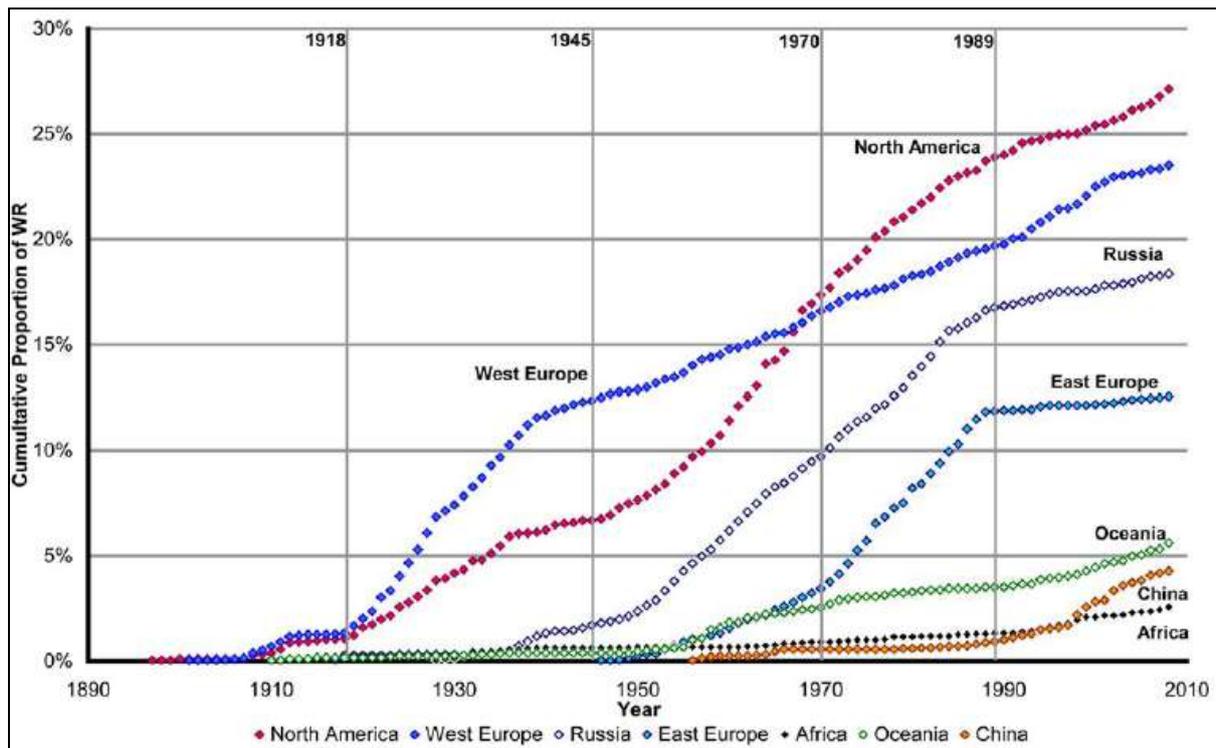


Figure V. Proportions annuelles cumulées des RM par région [54].

La Figure V montre que jusqu'en 1939, l'Europe de l'ouest est la première région sportive et se dispute les RM essentiellement avec l'Amérique du Nord. Après la seconde guerre mondiale la proportion annuelle de RM ralentit pour l'Europe de l'ouest, qui ne semble pas aussi impliquée que les USA et l'Union Soviétique dans cette course durant la guerre froide (1970-1990). La Grande Dépression, la seconde guerre mondiale et la guerre froide ont stimulé l'économie américaine qui voit sa pente de progression de RM cumulés s'accélérer après 1947, surtout pendant la guerre froide, avec un maximum atteint au début des années 1970 (Figure V). La Russie est absente dans le sport jusqu'en 1935 et participe pour la première fois aux JO en 1952 depuis la révolution de 1917, sa proportion de RM la plus élevée est entre 1950 et 1989 avec un maximum atteint au début des années 1980, sa pente est parallèle à celle des USA, mais bien plus faible. Après la chute du mur de Berlin en 1989 le taux de progression des RM ralentit et stagne dans les années 1990 (Figure V). L'Europe de l'est suit la même progression que la Russie avec la pente la plus élevée entre 1970 et 1989, la RDA domine les compétitions sportives et détient 48% des RM de l'Europe de l'est jusqu'à la chute du mur de Berlin. Pendant la guerre froide les compétitions sportives, comme d'autres domaines (la conquête de l'espace et la course aux armements nucléaires), sont des lieux d'affrontements idéologiques entre les nations, entre 1970 et 1989 les pentes des proportions

cumulées des RM de la Russie, de l'Europe de l'est et de l'Amérique du Nord sont presque parallèles (Figure V). Par la suite les archives de la Stasi ont dénoncé les programmes de dopage d'Etat des athlètes par le gouvernement de la RDA [54, 57, 58, 124, 125]. Après la chute du mur de Berlin et la réorganisation des anciens pays de l'est qui ont considérablement réduit leur budget sportif, la progression des proportions des RM s'arrête et stagne, la pente de progression de l'Europe de l'ouest et des USA ré-augmente légèrement en raison des nouveaux records battus en natation à partir de 1999 (Figure V). Au même moment la pente de progression chinoise augmente à un rythme élevé, correspondant au changement de politique du gouvernement chinois et à la période de développement économique de la Chine (1990-2008) après une longue absence suite à la révolution culturelle et l'interruption du développement du sport de haut niveau [54]. Après sa participation aux JO 1984, la Chine décide d'accélérer les réformes du système sportif et d'investir dans le sport de haut niveau et dans l'organisation de compétitions internationales et recrute initialement de nombreux entraîneurs allemands et russes. La proportion des RM de la Chine augmente lorsque celles d'autres régions ralentissent et commencent à atteindre les limites physiologiques.

La courbe de l'Océanie augmente à nouveau avec les JO de Sydney (2000) et avec les nombreux records obtenus en natation. L'Afrique est principalement représentée par une progression récente grâce aux coureurs de longue distance d'Afrique de l'est (Kenya, Ethiopie), (Figure V). Chaque nation a ainsi révélé des niveaux de réussite sportive remarquable dans différentes disciplines et à différentes époques au fil du siècle ; cette diversité géographique permet l'exploitation des prédispositions génétiques favorables en fonction de la situation politico-socio-économique de l'époque [2, 54].

Cette étude propose de nouveaux indicateurs et montre que l'évolution du sport est étroitement liée au développement économique, culturel et social, aux faits historiques et à la politique internationale [9, 54].

Les régions du monde qui détiennent un nombre significatif de RM ont été ou sont toujours des puissances politiques et économiques mondiales, établies ou émergentes. La mesure des progressions des RM fournit des indicateurs quantifiables pour le suivi des décisions historiques et géostratégiques. Le sport peut donc être un outil intéressant pour mesurer le développement [54].

DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSIONS DE CES TRAVAUX

L'objectif de cette thèse était d'étudier l'évolution des performances sportives au cours de l'ère olympique et tenter d'en interpréter les influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales.

La disponibilité de grandes bases de données archivant les résultats sportifs depuis les premières performances officielles chronométrées et la possibilité d'y accéder librement, à travers les fédérations nationales et internationales, et à travers les organisateurs de championnats et compétitions mondiales, nous ont permis de collecter, analyser et interpréter ces données. L'IRMES a adopté l'analyse des performances sportives comme l'une de ses thématiques de recherches épidémiologiques dans le domaine du sport du haut niveau afin de comprendre les conditions de la performance au 21^e siècle. L'épidémiologie de la performance sportive nous permet d'en décrire l'évolution chronologique depuis le début de l'ère olympique et d'en comprendre les déterminants.

Les records du monde traduisent l'optimisation des capacités de l'espèce humaine. Par la modélisation mathématique de l'ensemble des performances sportives quantifiables, nous observons des évolutions similaires dans chacune des épreuves. Les performances suivent une loi de progression, multi-exponentielle par séries scandée par les événements historiques. Cette vision intégratrice permet la découverte d'un phénomène limitant commun à toutes les disciplines. Contrairement aux travaux précédents nous tentons d'en estimer les asymptotes et démontrons que les performances sportives ne peuvent pas continuer à progresser continuellement, certaines ayant déjà cessé de croître. Ces limites observées dans le domaine sportif sont un indicateur des limites physiologiques de l'organisme humain.

Chacune des périodes de progression observée a été déclenchée par un ou plusieurs facteurs. Aujourd'hui on constate que les seuls qui permettent le déclenchement d'une nouvelle amélioration des performances sont les innovations technologiques, comme c'est le cas de la natation, du patinage de vitesse et du cyclisme sur piste. Le dopage est une forme d'innovation technologique qui résulte du développement de molécules à visée thérapeutique (comme le gène de l'EPO cloné pour lutter contre l'anémie des insuffisants rénaux) ou de protocoles pharmacologiques. Certes les industries ne cessent d'innover et nous verrons

surement apparaître dans le futur l'introduction de nouveaux moyens technologiques qui viendront, dans certains sports, aider les athlètes à optimiser leurs capacités physiologiques. Cependant il existe également des limites dans l'innovation industrielle, que ce soit dans la fabrication de nouveaux médicaments ou de nouveaux matériaux, dont la limite principale pourrait être liée aux turbulences économiques.

La préoccupation sur la santé des cyclistes dont les pratiques de dopage ne sont pas dépourvues d'effets secondaires nous a poussés à observer leur durée de vie et de constater qu'elle est, au début du 20^e siècle, supérieure à l'espérance de vie de la population générale. Les prédispositions génétiques de ces athlètes de haut niveau et la composante génétique de leurs adaptations à l'entraînement leur confèrent des qualités physiques supérieures à celles de la population générale et leur permettent d'avoir les aptitudes requises pour accomplir ces performances sportives maximales. Leur mode de vie actif résulte en des taux de survie supérieurs, déterminés par leur constitution génétique et biologique.

Pour parvenir au niveau élite, il ne suffit pas pour un athlète d'être né avec les « bons » gènes, mais il faut aussi qu'il soit né dans un environnement qui encourage l'entraînement et le développement de ce potentiel. Le phénotype résulte des interactions entre les gènes et l'environnement qui peut, ou non, favoriser les opportunités sportives. L'entraînement est ainsi une forme auto-imposée d'exposition à l'environnement ; sans entraînement il n'existe pas de réussite sportive.

La localisation géographique et l'analyse géopolitique des nationalités des détenteurs des records du monde ont révélé que la majorité a été principalement battue pas les athlètes de nations qui sont ou ont compté parmi les grandes puissances mondiales. Ces observations nous montrent que ces pays fournissent un environnement « indirect » géographique, économique et sociopolitique, favorisant l'épanouissement sportif. Ces observations nous montrent également que le sport et les résultats sportifs (records du monde et médailles olympiques) sont de puissants indicateurs du développement économique et de la situation politique d'un pays. Il existe une relation forte entre sport et politique internationale.

De plus si l'on analyse les paramètres environnementaux spécifiques, ayant une influence directe sur les performances, l'impact de la température en marathon est clair, les performances régressent avec l'élévation thermique.

Les résultats de cette thèse analysent un nombre important de données et apportent une nouvelle vision sur les progressions sportives humaines. Les performances s'accroissent de

manière non linéaire avec le temps et tendent vers une asymptote. Elles aboutissent donc à un plateau.

La physiologie humaine dans le domaine sportif s'est développée en bénéficiant des progrès de la nutrition, de la médecine, de la technologie, ainsi que des progrès d'organisation. D'autres processus ont participé à ce développement, comme l'amélioration de l'entraînement, de la sélection et du recrutement des meilleurs athlètes. L'ensemble de ces facteurs ont contribué à l'atteinte d'un niveau élevé d'optimisation. Les responsables sportifs sont probablement conscients de ce fait, car les athlètes, les équipes, les entraîneurs et les institutions sont soumis à des pressions importantes visant à repousser ces limites pour quelques millisecondes ou quelques centimètres.

Maintenir l'intérêt des médias et de la population, avides de records, vers les sports quantifiables sera essentiel à leur survie. En effet les records du monde sont souvent surmédiatisés. Si l'on retient les noms d'Usain Bolt et de Yelena Isinbayeva c'est qu'ils sont les seuls aujourd'hui capables de battre des records en athlétisme. Les sports non quantifiables offrent un exemple de réussite en l'absence de records du monde, comme les championnats de basketball ou la coupe du monde de football, l'événement médiatique le plus attendu avec les Jeux Olympiques.

De plus, les institutions sportives pourraient collaborer avec les gouvernements dans les campagnes de promotion de l'activité physique pour combiner sport de haut niveau et sport santé et inciter les gens à être plus actif et à pratiquer une activité physique régulière.

A l'approche des capacités sportives maximales de l'espèce, les athlètes abandonneront-ils la quête de nouveaux records ? La devise olympique du « *plus vite, plus haut, plus fort* » va-t-elle se transformer en une simple quête de la victoire sportive ? Dans ce contexte, quel serait le paysage de la compétition internationale, alors que le dépassement de soi est depuis toujours inscrit dans la génétique humaine et sans doute au cœur du vivant ?

BIBLIOGRAPHIE

1. Williams AG & Folland JP. Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *J Physiol.* 2008;**586**:113-121.
2. Joyner MJ & Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol.* 2008;**586**:35-44.
3. Lippi G, Favaloro EJ & Guidi GC. The genetic basis of human athletic performance. why are psychological components so often overlooked?. *J Physiol.* 2008;**586**:3017; author reply 3019-20.
4. Yarrow K, Brown P & Krakauer JW. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat Rev Neurosci.* 2009;**10**:585-596.
5. Speed CA & Roberts WO. Innovation in high-performance sports medicine. *Br J Sports Med.* 2010.
6. Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi MJ & Wright S. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J Appl Physiol.* 2000;**89**:1991-1999.
7. Gatzidou E, Gatzidou G & Theocharis SE. Genetically transformed world records: a reality or in the sphere of fantasy?. *Med Sci Monit.* 2009;**15**:RA41-47.
8. Desgorces F, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. From oxford to hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS ONE.* 2008;**3**:e3653.
9. Bryson L. Sport, drugs and the development of modern capitalism. *Sporting Traditions.* 1990;**6**(2):135-153.
10. Charles JD & Bejan A. The evolution of speed, size and shape in modern athletics. *J Exp Biol.* 2009;**212**:2419-2425.
11. Norton K & Olds T. Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med.* 2001;**31**:763-783.
12. Speed CA & Ingham SA. Research in high-performance sports medicine: from the bench, to the bedside...to the podium. *Br J Sports Med.* 2010.
13. Speed C & Jaques R. High-performance sports medicine: an ancient but evolving field. *Br J Sports Med.* 2010.
14. Schneider AJ & Friedmann T. Gene doping in sports: the science and ethics of genetically modified athletes. *Adv Genet.* 2006;**51**:1-110.
15. Nevill AM & Whyte G. Are there limits to running world records?. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;**37**:1785-1788.
16. Nevill AM, Whyte GP, Holder RL & Peyrebrune M. Are there limits to swimming world records? *Int J Sports Med.* 2007;**28**:1012-1017.

17. Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE*. 2008;**3**:e1552.
18. Bejan A, Jones E & Charles J. The evolution of speed in athletics: why the fastest runners are black and swimmers white. *Journal of Design & Nature*. 2010;**5**:1-13.
19. Toussaint J & Swynghedauw B. Croissance et renoncements: vieillir à l'épreuve du temps. La vie dans le grand âge. *Esprit*. Juillet 2010. p60-74.
20. Neptune RR, McGowan CP & Fiantt JM. The influence of muscle physiology and advanced technology on sports performance. *Annu Rev Biomed Eng*. 2009;**11**:81-107.
21. Bottinelli R, Pellegrino MA, Canepari M, Rossi R & Reggiani C. Specific contributions of various muscle fibre types to human muscle performance: an in vitro study. *J Electromyogr Kinesiol*. 1999;**9**:87-95.
22. He ZH, Bottinelli R, Pellegrino MA, Ferenczi MA & Reggiani C. Atp consumption and efficiency of human single muscle fibers with different myosin isoform composition. *Biophys J*. 2000;**79**:945-961.
23. Umberger BR, Gerritsen KGM & Martin PE. Muscle fiber type effects on energetically optimal cadences in cycling. *J Biomech*. 2006;**39**:1472-1479.
24. Costill DL, Fink WJ & Pollock ML. Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med Sci Sports*. 1976;**8**:96-100.
25. Gollnick PD, Armstrong RB, Saubert CW4, Piehl K & Saltin B. Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J Appl Physiol*. 1972;**33**:312-319.
26. Bassett DRJ & Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;**32**:70-84.
27. Joyner MJ. Vo₂max, blood doping, and erythropoietin. *Br J Sports Med*. 2003;**37**:190-191.
28. Tanaka H & Seals DR. Endurance exercise performance in masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. *J Physiol*. 2008;**586**:55-63.
29. Wilmore JH & Costill DL. Physiologie du sport et de l'exercice. Traduction de la 3e édition américaine. Bruxelles: Editions De Boeck Université. 2006.
30. Saltin B & Astrand PO. Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol*. 1967;**23**:353-358.
31. Pollock ML. Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. part i: cardiorespiratory aspects. *Ann N Y Acad Sci*. 1977;**301**:310-322.

32. Durstine JL, Pate RR, Sparling PB, Wilson GE, Senn MD, et al. Lipid, lipoprotein, and iron status of elite women distance runners. *Int J Sports Med.* 1987;**8 Suppl 2**:119-123.
33. Pate RR, Sparling PB, Wilson GE, Cureton KJ & Miller BJ. Cardiorespiratory and metabolic responses to submaximal and maximal exercise in elite women distance runners. *Int J Sports Med.* 1987;**8 Suppl 2**:91-95.
34. Coyle EF, Martin WH3, Sinacore DR, Joyner MJ, Hagberg JM, et al. Time course of loss of adaptations after stopping prolonged intense endurance training. *J Appl Physiol.* 1984;**57**:1857-1864.
35. Martin WH3, Coyle EF, Bloomfield SA & Ehsani AA. Effects of physical deconditioning after intense endurance training on left ventricular dimensions and stroke volume. *J Am Coll Cardiol.* 1986;**7**:982-989.
36. Holloszy JO & Coyle EF. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol.* 1984;**56**:831-838.
37. Robergs RA, Ghiasvand F & Parker D. Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2004;**287**:R502-16.
38. Coyle EF, Coggan AR, Hopper MK & Walters TJ. Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol.* 1988;**64**:2622-2630.
39. Coyle EF. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev.* 1995;**23**:25-63.
40. Rapoport BI. Metabolic factors limiting performance in marathon runners. *PLoS Comput Biol.* 2010;**6**:e1000960.
41. Folland JP & Williams AG. The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med.* 2007;**37**:145-168.
42. Fitts PM. Perceptual-motor skill learning in categories of human learning. . Academic NY.. 1964. 243-285.
43. Shiffrin RM & Schneider W. Controlled and automatic human information processing: 11. perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychol Rev.* 1977;**84(2)**:127-190.
44. Körding KP & Wolpert DM. Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature.* 2004;**427**:244-247.
45. Abernethy B & Russell DG. Advanced cue utilisation by skilled cricket batsmen. *Austr J Sci Med Sport.* 1984;**16(1)**:2-10.
46. Gibson AP & Adams RD. Batting stroke timing with a bowler and a bowling machine : a case study. *Austr J Sci Med Sport.* 1989;**21(1)**:3-6.

47. Aglioti SM, Cesari P, Romani M & Urgesi C. Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nat Neurosci.* 2008;**11**:1109-1116.
48. Seiler S, De Koning JJ & Foster C. The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952-2006. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;**39**:534-540.
49. Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, et al. Athlete atypicality on the edge of human achievement: performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE.* 2010;**5**:e8800.
50. Strelan P & Boeckmann RJ. Why drug testing in elite sport does not work: perceptual deterrence theory and the role of personal moral beliefs. *J Appl Soc Psychol.* 2006;**36**(12):2909-2934.
51. Tatem AJ, Guerra CA, Atkinson PM & Hay SI. Athletics: momentous sprint at the 2156 olympics? *Nature.* 2004;**431**:525.
52. Whipp BJ & Ward SA. Will women soon outrun men? *Nature.* 1992;**355**:25.
53. Reinboud W. Linear models can't keep up with sport gender gap. *Nature.* 2004;**432**:147; author reply 147.
54. Guillaume M, El Helou N, Nassif H, Berthelot G, Len S, et al. Success in developing regions: world records evolution through a geopolitical prism. *PLoS ONE.* 2009;**4**:e7573.
55. El Helou N, Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Nassif H, et al. Tour de france, giro, vuelta, and classic european races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years. *J Sports Sci.* 2010;**28**:789-796.
56. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, et al. Women and men in sport performance: the gender gap has not evolved since 1983. *Journal of Sports Science and Medicine.* 2010;**9**:214-223.
57. Franke WW & Berendonk B. Hormonal doping and androgenization of athletes: a secret program of the german democratic republic government. *Clin Chem.* 1997;**43**:1262-1279.
58. Kalinski MI. State-sponsored research on creatine supplements and blood doping in elite soviet sport. *Perspect Biol Med.* 2003;**46**:445-451.
59. Donato AJ, Tench K, Glueck DH, Seals DR, Eskurza I, et al. Declines in physiological functional capacity with age: a longitudinal study in peak swimming performance. *J Appl Physiol.* 2003;**94**:764-769.
60. Hawkins SA, Wiswell RA & Marcell TJ. Exercise and the master athlete--a model of successful aging?. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2003;**58**:1009-1011.
61. Len S, Berthelot G, Hellard P, Tafflet M, Guillaume M, et al. A linear combination of exponential growth and exponential decline explains performance evolution in individual athletes and human species. *Under Review.* 2010.

62. Rittweger J, di Prampero PE, Maffulli N & Narici MV. Sprint and endurance power and ageing: an analysis of master athletic world records. *Proc Biol Sci.* 2009;**276**:683-689.
63. Trappe S. Marathon runners: how do they age?..*Sports Med.* 2007;**37**:302-305.
64. Frontera WR, Suh D, Krivickas LS, Hughes VA, Goldstein R, et al. Skeletal muscle fiber quality in older men and women. *Am J Physiol Cell Physiol.* 2000;**279**:C611-8.
- 65 Expertise INSERMActivité physique - contextes et effets sur la santéMars 2008
66. Maharam LG, Bauman PA, Kalman D, Skolnik H & Perle SM. Masters athletes: factors affecting performance. *Sports Med.* 1999;**28**:273-285.
67. Moore DH2. A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature.* 1975;**253**:264-265.
68. Tanaka H, Monahan KD & Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol.* 2001;**37**:153-156.
69. Nilsson PM, Boutouyrie P & Laurent S. Vascular aging: a tale of eva and adam in cardiovascular risk assessment and prevention. *Hypertension.* 2009;**54**:3-10.
70. Rivera AM, Pels AE3, Sady SP, Sady MA, Cullinane EM, et al. Physiological factors associated with the lower maximal oxygen consumption of master runners. *J Appl Physiol.* 1989;**66**:949-954.
71. Hunt BE, Davy KP, Jones PP, DeSouza CA, Van Pelt RE, et al. Role of central circulatory factors in the fat-free mass-maximal aerobic capacity relation across age. *Am J Physiol.* 1998;**275**:H1178-82.
72. 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**:1931-1941.
73. Wells CL, Boorman MA & Riggs DM. Effect of age and menopausal status on cardiorespiratory fitness in masters women runners. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;**24**:1147-1154.
74. Nassif H, El Helou N & Toussaint J. Influence du sport sur la longévité. *Nutrition & Endocrinologie.* 2009;**7(43)**:291-293.
75. Deschenes MR. Effects of aging on muscle fibre type and size. *Sports Med.* 2004;**34**:809-824.
76. Lanza IR & Nair KS. Mitochondrial function as a determinant of life span. *Pflugers Arch.* 2010;**459**:277-289.
77. Jylhävä J & Hurme M. Gene variants as determinants of longevity: focus on the inflammatory factors. *Pflugers Arch.* 2010;**459**:239-246.

78. Hipkiss AR. Energy metabolism, altered proteins, sirtuins and ageing: converging mechanisms? *Biogerontology*. 2008;**9**:49-55.
79. Meléndez A, Tallóczy Z, Seaman M, Eskelinen E, Hall DH, et al. Autophagy genes are essential for dauer development and life-span extension in *c. elegans*. *Science*. 2003;**301**:1387-1391.
80. Romeo J, Wärnberg J, Pozo T & Marcos A. Physical activity, immunity and infection. *Proc Nutr Soc*. 2010;**69**:390-399.
81. Physical activity guidelines advisory committee report 2008, Washington, DC: U.S. department of health and human services.
82. Baromètre Santé Nutrition 2008. INPES
83. Teramoto M & Bungum TJ. Mortality and longevity of elite athletes. *J Sci Med Sport*. 2010;**13**:410-416.
84. Filipp F. Is science killing sport? gene therapy and its possible abuse in doping. *EMBO Rep*. 2007;**8**:433-435.
85. de Koning JJ. World records: how much athlete? how much technology?. *Int J Sports Physiol Perform*. 2010;**5**:262-267.
86. van Ingen Schenau GJ. The influence of air friction in speed skating. *J Biomech*. 1982;**15**:449-458.
87. Houdijk H, Heijnsdijk EA, de Koning JJ, de Groot G & Bobbert MF. Physiological responses that account for the increased power output in speed skating using klapskates. *Eur J Appl Physiol*. 2000;**83**:283-288.
88. Janssen M, Wilson BD & Toussaint HM. Effects of drafting on hydrodynamic and metabolic responses in front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;**41**:837-843.
89. Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, El Helou N, et al. Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Materials Today*. 2010;**13(11)**:46-51.
90. Bassett DRJ, Kyle CR, Passfield L, Broker JP & Burke ER. Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Med Sci Sports Exerc*. 1999;**31**:1665-1676.
91. International Human Powered Vehicle Association, official website, retrieved from:[Http://www.ihpva.org/home/](http://www.ihpva.org/home/)
92. Jeukendrup AE, Craig NP & Hawley JA. The bioenergetics of world class cycling. *J Sci Med Sport*. 2000;**3**:414-433.
93. Jeukendrup AE & Martin J. Improving cycling performance: how should we spend our time and money. *Sports Med*. 2001;**31**:559-569.

94. Faria EW, Parker DL & Faria IE. The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med.* 2005;**35**:313-337.
95. Lucia A, Hoyos J & Chicharro JL. Physiology of professional road cycling. *Sports Med.* 2001;**31**:325-337.
96. Padilla S, Mujika I, Orbañanos J & Angulo F. Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;**32**:850-856.
97. Olds TS, Norton KI & Craig NP. Mathematical model of cycling performance. *J Appl Physiol.* 1993;**75**:730-737.
98. González-Haro C, Galilea Ballarini PA, Soria M, Drobnic F & Escanero JF. Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *Br J Sports Med.* 2007;**41**:506-9; discussion 509.
99. Olds TS, Norton KI, Lowe EL, Olive S, Reay F, et al. Modeling road-cycling performance. *J Appl Physiol.* 1995;**78**:1596-1611.
100. Association Mémoire du Cyclisme website. Road cycling Races Results. Retrieved from: <Http://www.memoire-du-cyclisme.net/>
101. Giro d'Italia official website - La Gazzetta Dello Sport website. Giro official results. Retrieved from: <Http://www.gazzetta.it/speciali/giroditalia/>
102. Web Oficial de la Vuelta a España. Vuelta official results. Retrieved from: <Http://www.lavuelta.com>
103. Tour de France official website. Tour de France official data. Retrieved from: <Http://www.letour.fr>
104. IGN- Institut Géographique National website. Mountain summits altitudes retrieved from: <Http://www.ign.fr>
105. Willink R. On using the Monte Carlo method to calculate uncertainty intervals. *Metrologia.* 2006;**43**(6):39-42.
106. Industrie du vélo [homepage on the internet]. c2007. Available from: <Http://www.too-velo.com/content/view/5/11/#retour>
107. Musée National du Sport. Histoire du sport en france. Du second empire au régime de vichy. Paris, 2007: Vuibert (pp. 330-338).
108. Gaudard A, Varlet-Marie E, Bressolle F & Audran M. Drugs for increasing oxygen and their potential use in doping: a review. *Sports Med.* 2003;**33**:187-212.
109. Diamanti-Kandarakis E, Konstantinopoulos PA, Papailiou J, Kandarakis SA, Andreopoulos A, et al. Erythropoietin abuse and erythropoietin gene doping: detection strategies in the genomic era. *Sports Med.* 2005;**35**:831-840.

110. Lucia A, Earnest C & Arribas C. The tour de france: a physiological review. *Scand J Med Sci Sports*. 2003;**13**:275-283.
111. Juhn M. Popular sports supplements and ergogenic aids. *Sports Med*. 2003;**33**:921-939.
112. Berry DA. The science of doping. *Nature*. 2008;**454**:692-693.
113. Robinson N, Schweizer C, Cardis C, Saugy M & Kamber M. Haematological and biochemical parameters from all professional cyclists during the tour de suisse. *Schweiz Z Sportmed. Sporttraumatol*. 2000;**48**(3):104–110.
114. Miquet P & Blanchet B Le roman de l'epo. l'express [updated dec 2003; published Jun 2000]. Retrieved from: http://www.lexpress.fr/actualite/sciences/sante/le-roman-de-l-epo_494198.html
115. Noakes TD. Tainted glory--doping and athletic performance. *N Engl J Med*. 2004;**351**:847-849.
116. Ashenden MJ, Hahn AG, Martin DT, Logan P, Parisotto R, et al. A comparison of the physiological response to simulated altitude exposure and r-huepo administration. *J Sports Sci*. 2001;**19**:831-837.
117. Parisotto R, Gore CJ, Emslie KR, Ashenden MJ, Brugnara C, et al. A novel method utilising markers of altered erythropoiesis for the detection of recombinant human erythropoietin abuse in athletes. *Haematologica*. 2000;**85**:564-572.
118. Birkeland KI, Stray-Gundersen J, Hemmersbach P, Hallen J, Haug E, et al. Effect of rhepo administration on serum levels of stfr and cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;**32**:1238-1243.
119. Russell G, Gore CJ, Ashenden MJ, Parisotto R & Hahn AG. Effects of prolonged low doses of recombinant human erythropoietin during submaximal and maximal exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2002;**86**:442-449.
120. McCole SD, Claney K, Conte JC, Anderson R & Hagberg JM. Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol*. 1990;**68**:748-753.
121. Seiler S. One hundred and fifty years of rowing faster. *Sportscience*. 2006;**10**:12-45.
122. Schöffel N, Börger J, Quarcoo D, Scutaru C & Groneberg DA. [erythropoietin - state of science]. *Sportverletz Sportschaden*. 2008;**22**:201-206.
123. Bamberger M & Yaeger D. Over the edge. *Sports Illustrated*. 1997;**14**:62-70.
124. Baron DA, Martin DM & Abol Magd S. Doping in sports and its spread to at-risk populations: an international review. *World Psychiatry*. 2007;**6**:118-123.
125. D'Angelo C & Tamburrini C. Addict to win? a different approach to doping. *J Med Ethics*. 2010;**36**:700-707.

126. Kayser B, Mauron A & Miah A. Current anti-doping policy: a critical appraisal. *BMC Med Ethics*. 2007;**8**:2.
127. Gomez J. Use of performance-enhancing substances. *Pediatrics*. 2005;**115**:1103-1106.
128. Haugen KK. The performance-enhancing drug game. *Journal of Sports Economics*. 2004;**5**(1):67-86.
129. Shephard RJ. Absolute versus relative intensity of physical activity in a dose-response context. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;**33**:S400-18; discussion S419-20.
130. Warburton DER, Nicol CW & Bredin SSD. Health benefits of physical activity: the evidence. *CMAJ*. 2006;**174**:801-809.
131. Healthy people 2010, vol. II. Washington DC: U.S. Department of health and human services; 2000.
132. Canadian community health survey. Ottawa: statistics Canada; 2002/03.
133. Byberg L, Melhus H, Gedeberg R, Sundström J, Ahlbom A, et al. Total mortality after changes in leisure time physical activity in 50 year old men: 35 year follow-up of population based cohort. *Br J Sports Med*. 2009;**43**:482.
134. Karvonen MJ, Klemola H, Virkajärvi J & Kekkonen A. Longevity of endurance skiers. *Med Sci Sports*. 1974;**6**:49-51.
135. Paffenbarger RS & Lee IM. A natural history of athleticism, health and longevity. *J Sports Sci*. 1998;**16**(S1):31-45.
136. Tables de mortalité INED: espérances de vie de la population générale française. Retrieved from: [Http://www.ined.fr/cdrom_vallin_mesle/tables-de-mortalite/tab-mortalite.htm](http://www.ined.fr/cdrom_vallin_mesle/tables-de-mortalite/tab-mortalite.htm)
137. Kannisto V. Measuring the compression of mortality. *Demogr Res*. 2000;**3**:[24] p..
138. Kesaniemi YK, Danforth EJ, Jensen MD, Kopelman PG, Lefèbvre P, et al. Dose-response issues concerning physical activity and health: an evidence-based symposium. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;**33**:S351-8.
139. Lee IM & Skerrett PJ. Physical activity and all-cause mortality: what is the dose-response relation?. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;**33**:S459-71; discussion S493-4.
140. Paffenbarger RSJ, Hyde RT, Wing AL & Hsieh CC. Physical activity, all-cause mortality, and longevity of college alumni. *N Engl J Med*. 1986;**314**:605-613.
141. Lippi G. Genomics and sports: building a bridge towards a rational and personalized training framework. *Int J Sports Med*. 2008;**29**:264-265.
142. Snyder EM. Complexity of genetics in the athlete phenotype: a commentary on adrenergic-beta(2) receptor polymorphism and athletic performance. *J Hum Genet*. 2010;**55**:477-478.

143. Sarna S, Sahi T, Koskenvuo M & Kaprio J. Increased life expectancy of world class male athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 1993;**25**:237-244.
144. Meslé F. La dérive sanitaire des continents. Les actes du fig 2000: géographie et santé. Retrieved from: http://archives-fig-st-die.cndp.fr/actes/actes_2000/mesle/article.htm
145. Tokish JM, Kocher MS & Hawkins RJ. Ergogenic aids: a review of basic science, performance, side effects, and status in sports. *Am J Sports Med.* 2004;**32**:1543-1553.
146. Bahrke MS, Yesalis CE, Kopstein AN & Stephens JA. Risk factors associated with anabolic-androgenic steroid use among adolescents. *Sports Med.* 2000;**29**:397-405.
147. Site officiel de l'Agence Mondiale Antidopage (AMA). <Http://www.wada-ama.org>
148. Petróczi A. Attitudes and doping: a structural equation analysis of the relationship between athletes' attitudes, sport orientation and doping behaviour. *Subst Abuse Treat Prev Policy.* 2007;**2**:34.
149. Dunn M, Thomas JO, Swift W, Burns L & Mattick RP. Drug testing in sport: the attitudes and experiences of elite athletes. *Int J Drug Policy.* 2010;**21**:330-332.
150. McCrory P. Super athletes or gene cheats?. *Br J Sports Med.* 2003;**37**:192-193.
151. Macarthur DG & North KN. Genes and human elite athletic performance. *Hum Genet.* 2005;**116**:331-339.
152. Bray MS, Hagberg JM, Pérusse L, Rankinen T, Roth SM, et al. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2006-2007 update. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;**41**:35-73.
153. Brutsaert TD & Parra EJ. What makes a champion? explaining variation in human athletic performance. *Respir Physiol Neurobiol.* 2006;**151**:109-123.
154. Pérusse L, Rankinen T, Rauramaa R, Rivera MA, Wolfarth B, et al. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2002 update. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;**35**:1248-1264.
155. Scott RA & Pitsiladis YP. Genotypes and distance running : clues from africa. *Sports Med.* 2007;**37**:424-427.
156. Pitsiladis YP & Scott R. Essay: the makings of the perfect athlete. *Lancet.* 2005;**366 Suppl 1**:S16-7.
157. Wagner DR & Heyward VH. Measures of body composition in blacks and whites: a comparative review. *Am J Clin Nutr.* 2000;**71**:1392-1402.
158. Rankinen T, Roth SM, Bray MS, Loos R, Pérusse L, et al. Advances in exercise, fitness, and performance genomics. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;**42**:835-846.

159. Baoutina A, Alexander IE, Rasko JEJ & Emslie KR. Potential use of gene transfer in athletic performance enhancement. *Mol Ther.* 2007;**15**:1751-1766.
160. Williams AG, Rayson MP, Jubb M, World M, Woods DR, et al. The ace gene and muscle performance. *Nature.* 2000;**403**:614.
161. Lucia A, Gómez-Gallego F, Santiago C, Bandrés F, Earnest C, et al. Actn3 genotype in professional endurance cyclists. *Int J Sports Med.* 2006;**27**:880-884.
162. MacArthur DG & North KN. A gene for speed? the evolution and function of alpha-actinin-3. *Bioessays.* 2004;**26**:786-795.
163. MacArthur DG, Seto JT, Raftery JM, Quinlan KG, Huttley GA, et al. Loss of actn3 gene function alters mouse muscle metabolism and shows evidence of positive selection in humans. *Nat Genet.* 2007;**39**:1261-1265.
164. Yang N, MacArthur DG, Gulbin JP, Hahn AG, Beggs AH, et al. Actn3 genotype is associated with human elite athletic performance. *Am J Hum Genet.* 2003;**73**:627-631.
165. North KN, Yang N, Wattanasirichaigoon D, Mills M, Eastal S, et al. A common nonsense mutation results in alpha-actinin-3 deficiency in the general population. *Nat Genet.* 1999;**21**:353-354.
166. Niemi A & Majamaa K. Mitochondrial dna and actn3 genotypes in finnish elite endurance and sprint athletes. *Eur J Hum Genet.* 2005;**13**:965-969.
167. Chicharro JL, Hoyos J, Gómez-Gallego F, Villa JG, Bandrés F, et al. Mutations in the hereditary haemochromatosis gene hfe in professional endurance athletes. *Br J Sports Med.* 2004;**38**:418-421.
168. Njajou OT, Houwing-Duistermaat JJ, Osborne RH, Vaessen N, Vergeer J, et al. A population-based study of the effect of the hfe c282y and h63d mutations on iron metabolism. *Eur J Hum Genet.* 2003;**11**:225-231.
169. Deugnier Y, Loréal O, Carré F, Duvallet A, Zoulim F, et al. Increased body iron stores in elite road cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;**34**:876-880.
170. Wells DJ. Gene doping: the hype and the reality. *Br J Pharmacol.* 2008;**154**:623-631.
171. Schjerling P. Gene doping. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;**18**:121-122.
172. Trent RJ & Alexander IE. Gene therapy in sport. *Br J Sports Med.* 2006;**40**:4-5.
173. Cavazzana-Calvo M, Hacein-Bey S, de Saint Basile G, Gross F, Yvon E, et al. Gene therapy of human severe combined immunodeficiency (scid)-x1 disease. *Science (80-).* 2000;**288**:669-672.
174. Cartier N, Hacein-Bey-Abina S, Bartholomae CC, Veres G, Schmidt M, et al. Hematopoietic stem cell gene therapy with a lentiviral vector in x-linked adrenoleukodystrophy. *Science (80-).* 2009;**326**:818-823.

175. Fogel R. The escape from premature death and hunger. Cambridge university press, 2003.
176. El Helou N, Berthelot G, Tolaini J, Marc A & Tafflet M. Impact des paramètres environnementaux sur les performances en marathon. *Under Review*. 2010;.
177. Tsianos GI, Evangelou E, Boot A, Zillikens MC, van Meurs JBJ, et al. Associations of polymorphisms of eight muscle- or metabolism-related genes with performance in mount olympus marathon runners. *J Appl Physiol*. 2010;**108**:567-574.
178. Cheuvront SN & Haymes EM. Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Med*. 2001;**31**:743-762.
179. Kenefick RW, Cheuvront SN & Sawka MN. Thermoregulatory function during the marathon. *Sports Med*. 2007;**37**:312-315.
180. Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol*. 2010;**54**:297-306.
181. Shephard RJ. Athletic performance and urban air pollution. *Can Med Assoc J*. 1984;**131**:105-109.
182. Chimenti L, Morici G, Paterno A, Bonanno A, Vultaggio M, et al. Environmental conditions, air pollutants, and airway cells in runners: a longitudinal field study. *J Sports Sci*. 2009;**27**:925-935.
183. Marr LC & Ely MR. Effect of air pollution on marathon running performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;**42**(3):585-591.
184. Lippi G, Guidi GC & Maffulli N. Air pollution and sports performance in beijing. *Int J Sports Med*. 2008;**29**(8):696-698.
185. AirParif website. Air pollution data for Paris retrieved (March – May 2009) from: www.airparif.com
186. Air pollution data for Berlin retrieved (24 June 2009) from: [Http://www.env-it.de/stationen/public/language.do;jsessionid=fb278996ee26b0351076a5d974c8bd04?language=en](http://www.env-it.de/stationen/public/language.do;jsessionid=fb278996ee26b0351076a5d974c8bd04?language=en)
187. LondonAir website. Air pollution data for London retrieved (26 May 2009) from: [Http://www.londonair.org.uk/london/asp/default.asp](http://www.londonair.org.uk/london/asp/default.asp)
188. Ely MR, Cheuvront SN, Roberts WO & Montain SJ. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;**39**(3):487-493.
189. Galloway SDR & Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc*. 1997;**29**(9):1240-1249.

190. Hargreaves M. Physiological limits to exercise performance in the heat. *J Sci Med Sport*. 2008;**11**(1):66-71.
191. Ely MR, Chevront SN & Montain SJ. Neither cloud cover nor low solar loads are associated with fast marathon performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;**39**(11):2029-2035.
192. Ely MR, Martin DE, Chevront SN & Montain SJ. Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;**40**(9):1675-1680.
193. Zhang S, Meng G, Wang Y & Li J. Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. *Int J Biometeorol*. 1992;**36**:63-68.
194. Maughan RJ, Watson P & Shirreffs SM. Heat and cold : what does the environment do to the marathon runner?. *Sports Med*. 2007;**37**:396-399.
195. Hobson RM, Clapp EL, Watson P & Maughan RJ. Exercise capacity in the heat is greater in the morning than in the evening in man. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;**41**(1):174-180.
196. Montain SJ, Ely MR & Chevront SN. Marathon performance in thermally stressing conditions. *Sports Med*. 2007;**37**(4-5):320-323.
197. Arngrímsson SA, Pettitt DS, Stueck MG, Jorgensen DK & Cureton KJ. Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *J Appl Physiol*. 2004;**96**:1867-1874.
198. Coyle EF. Physiological regulation of marathon performance. *Sports Med*. 2007;**37**:306-311.
199. Febbraio MA. Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress. *Sports Med*. 2001;**31**:47-59.
200. Walters TJ, Ryan KL, Tate LM & Mason PA. Exercise in the heat is limited by a critical internal temperature. *J Appl Physiol*. 2000;**89**:799-806.
201. González-Alonso J. Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med*. 2007;**37**:371-373.
202. Sakate T. The effect of air temperature on physical working capacity. *J Hum Ergol (Tokyo)*. 1978;**7**:127-134.
203. Zouhal H, Groussard C, Vincent S, Jacob C, Abderrahman AB, et al. Athletic performance and weight changes during the "marathon of sands" in athletes well-trained in endurance. *Int J Sports Med*. 2009;**30**:516-521.
204. Weller AS, Millard CE, Stroud MA, Greenhaff PL & Macdonald IA. Physiological responses to a cold, wet, and windy environment during prolonged intermittent walking. *Am J Physiol*. 1997;**272**:R226-33.

205. Roberts WO. Determining a "do not start" temperature for a marathon on the basis of adverse outcomes. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;**42**:226-232.
206. Marino FE, Lambert MI & Noakes TD. Superior performance of african runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol.* 2004;**96**:124-130.
207. Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI, et al. Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Arch.* 2000;**441**:359-367.
208. Hopkins WG, and Hewson DJ. Variability of competitive performance of distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;**33**(9):1588-92.
209. Quinn MD. The effect of wind and altitude in the 400m sprint. *J Sports Sci.* 2004;**22**(11-12):1073-81.
210. Péronnet F, Thibault G, and Cousineau DL. A theoretical analysis of the effect of altitude on running performance. *J Appl Physiol.* 1991;**70**(1):399-404.
211. Roi GS, Giacometti M, and von Duvillard SP. Marathons in altitude. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;**31**(5):723-8.
212. Korrick SA, Neas LM, Dockery DW, Gold DR, Allen GA, Hill LB. Effects of ozone and other pollutants on the pulmonary function of adult hickers. *Environ Health Perspect.* 1998;**106**:93-9.
-

ANNEXES

Annexe 1 :

Article original et intégral - The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest.

Référence: Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. (2008) The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. PLoS ONE 3(2): e1552.
doi:10.1371/journal.pone.0001552.

The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest

Geoffroy Berthelot¹, Valérie Thibault¹, Muriel Tafflet^{1,2}, Sylvie Escolano^{1,2}, Nour El Helou¹, Xavier Jouven^{2,3}, Olivier Hermine^{3,4}, Jean-François Toussaint^{1,3,5*}

1 Institute for Biomedical Research and Sports Epidemiology (IRMES), Paris, France, 2 INSERM, IFR69, U780, Villejuif, France, 3 Université Paris-Descartes, Paris, France, 4 Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) UMR 8147, Hôpital Necker, Paris, France, 5 Centre d'Investigation en Médecine du Sport (CIMS), Hôtel-Dieu, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP), Paris, France

Abstract

World records (WR) in sports illustrate the ultimate expression of human integrated muscle biology, through speed or strength performances. Analysis and prediction of man's physiological boundaries in sports and impact of external (historical or environmental) conditions on WR occurrence are subject to scientific controversy. Based on the analysis of 3263 WR established for all quantifiable official contests since the first Olympic Games, we show here that WR progression rate follows a piecewise exponential decaying pattern with very high accuracy (mean adjusted r^2 values = 0.91 ± 0.08 (s.d.)). Starting at 75% of their estimated asymptotic values in 1896, WR have now reached 99%, and, present conditions prevailing, half of all WR will not be improved by more than 0,05% in 2027. Our model, which may be used to compare future athletic performances or assess the impact of international antidoping policies, forecasts that human species' physiological frontiers will be reached in one generation. This will have an impact on the future conditions of athlete training and on the organization of competitions. It may also alter the Olympic motto and spirit.

Citation: Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al (2008) The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. PLoS ONE 3(2): e1552. doi:10.1371/journal.pone.0001552

Editor: Alejandro Lucia, Universidad Europea de Madrid, Spain

Received: November 13, 2007; **Accepted:** January 4, 2008; **Published:** February 6, 2008

Copyright: © 2008 Berthelot et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: We thank the Centre National de Développement du Sport and the Ministry of Health, Youth and Sport for financial contribution.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

*E-mail: irmes@insep.fr

Introduction

Olympic Games were reintroduced in 1896 by Pierre de Coubertin. One hundred and eleven years later, world record collection shows the progression of human performance as elite athletes periodically pushed back the frontiers of "ultra-physiology". This unplanned experiment could have been written as the phenotypic maximization of present human genotype under the pressure of regulated competition [1]. This large scale investigation can now be appraised, but the best methodology to do it is a disputed scientific issue [2–5], with some literary perspectives [6,7]. Linear regression models [2,8] have been criticized [3] for their inaccuracy and non physiological relevance. A flattened S-shaped model has been elaborated by Nevill and Whyte [4,5] on 8 running and 6 swimming events, but closer observation would suggest more detailed variations of the WR curves, adding historical or technical influences to biological parameters (Fig. 1). Here we identify a common progression pattern for world records from all quantifiable Olympic events and propose a model that predicts the end of the quest.

Materials and Methods

We conducted a qualitative and quantitative analysis of 3263 WR in all 147 measurable Olympic events from five disciplines [9–13] in order to identify WR progression patterns. Data were gathered from 1896 to 2007 (modern Olympic era).

Descriptive analysis: λ , κ factors

Two indicators were introduced in order to describe WR. Because the WR number established each year also depends on the number of events, we defined factor λ as the annual ratio at year t of the new WR number over the total number of official Olympic events:

$$\lambda_t = \frac{\Sigma(\text{newWR})_t}{\Sigma(\text{events})_t} \quad (1)$$

WR evolution is also analyzed through the progression step κ , which measures the relative improvement of the n^{th} best performance as compared to the $(n-1)^{\text{th}}$ value:

$$\kappa_n = \frac{|WR_n - WR_{(n-1)}|}{WR_{(n-1)}} \quad (2)$$

with a mean $\bar{\kappa}_t$ annually calculated for all official events at year t .

Function description

WR series for each event were fitted by the function

$$y_j(t) = \Delta_{WR} \cdot \exp(-a_j \cdot t) + b_j \quad (3)$$

Where $\Delta_{WR} = WR_{ij} - WR_{j0}$ is an event indicator for the studied j period; it is positive for the chronometric events (with decreasing WR values) and negative for the non-chronometric ones

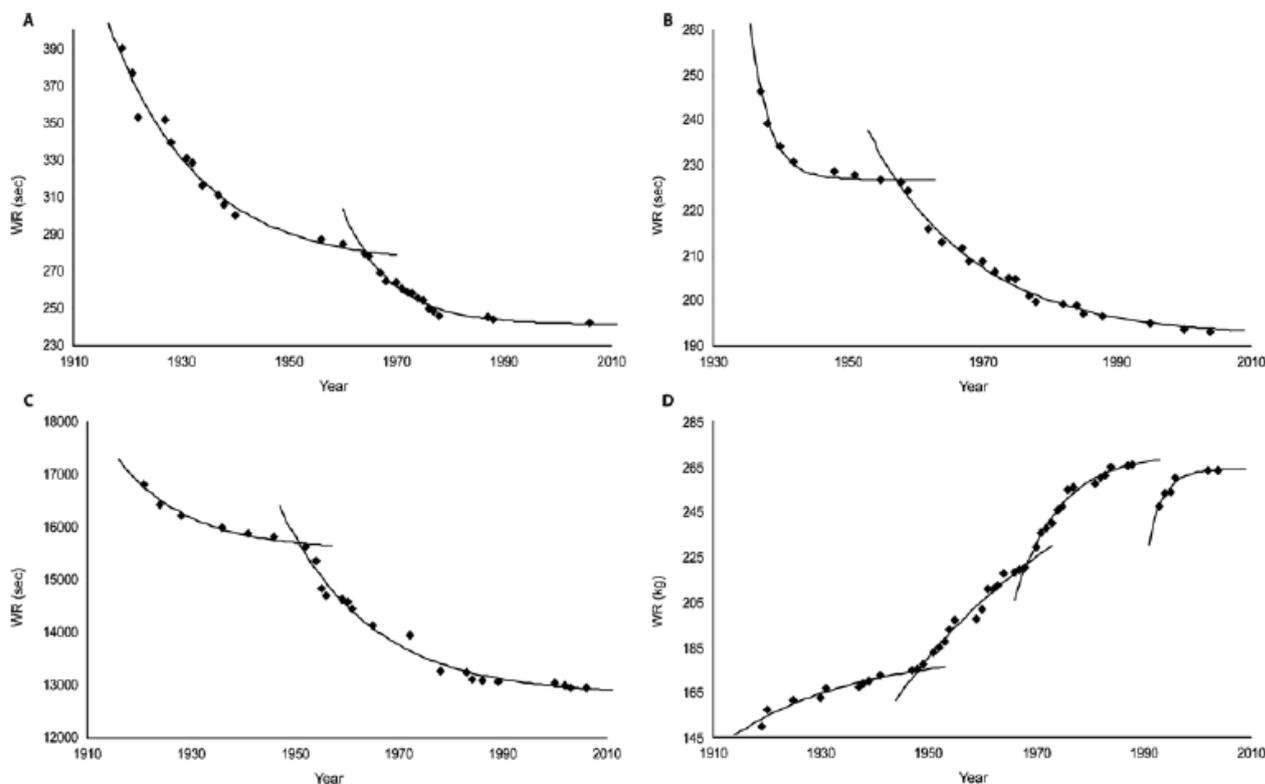


Figure 1. Model fitting on 4 events. A. Women 400 m freestyle (swimming) with biexponential decaying curve, adjusted $r_i^2 = 0.976$ and $r_{ii}^2 = 0.966$; B. Men 4x100 m freestyle relay (swimming), $r_i^2 = 0.985$, $r_{ii}^2 = 0.988$; C. Men 50 km walk (track), $r_i^2 = 0.972$, $r_{ii}^2 = 0.977$; D. Clean & Jerk Super Heavyweight (weight lifting), $r_i^2 = 0.939$, $r_{ii}^2 = 0.937$, $r_{iii}^2 = 0.975$ and $r_{iv}^2 = 0.946$. Weight categories were altered in 1948, 1968 and 1992 and control reinforced in 1988–1992 in weight lifting.
doi:10.1371/journal.pone.0001552.g001

(increasing WR values); $WR_{i,j}$ and $WR_{f,j}$ are the initial and final WR values, respectively; a_j is the positive curvature factor given by non linear regression; b_j is the asymptotic limit. Normalization of t in the $[0, 1]$ interval ensures the objective function (3) to be well-defined for all values of t . As a consequence, we used:

$$t'_j = \frac{t_j - t_{i,j}}{t_{f,j} - t_{i,j}} \tag{4}$$

where t' is the WR year after linear transformation of t ; $t_{i,j}$ and $t_{f,j}$ are the years of initial and final WR in the current j period, respectively. Equation (3) assumes that WR will achieve an asymptotic value within a given span starting at $WR_{i,j}$.

Splitting WR series into periods

A procedure based on the best adjusted r^2 is used to split WR series into periods. The algorithm is initiated by the first three WR values. The series is iteratively fitted by adding the next WR point using equation (3). For each fit, the adjusted r^2 is obtained; local maxima provide the changes of incline corresponding to the beginning of a new period. The minimum period duration is 6 years, the minimal WR number is three per period.

For each event, this piecewise exponential decaying model provides successive periods. A period refers to a time slot defined by a group of consecutive WR, following a rupture of incline. During the period j , parameters a_j and b_j are estimated using the

Levenberg-Marquardt algorithm [14–16] (LMA) in a non linear least-squares regression to fit the model to WR. High values of the curvature coefficient a are seen in highly curved periods showing weak margin of final progression. Coefficient b is the asymptotic value; the comparison of the initial (WR_i) and final (WR_f) records to b are described through the b' and b'' ratios respectively. The progression step over the Olympic era is equal to $b'' - b'$ and expressed as a percentage of the asymptotic value.

Coefficients description

The initial progression range is given by b' . In order to compare the predicted final progression, b'' are calculated for terminal periods of events.

For chronometric events ($WR_i > WR_f$): $b' = \frac{b_j}{WR_{i,j}}$ and $b'' = \frac{b_j}{WR_{f,j}}$; for non chronometric events ($WR_i < WR_f$): $b' = \frac{WR_{i,j}}{b_j}$ and $b'' = \frac{WR_{f,j}}{b_j}$.

This presentation also allows for a comparison of each record as a percentage of the estimated asymptotic value.

Prediction

Data set used for prediction was reduced to 125 events. From the 22 discarded events, two resulted from javelin weight change and 20 referred to weight lifting; 9 Clean and Press events were removed from official list in 1972 (Fig. S2) and 11 suffered major rule's alterations (weight categories). For prediction purpose, the

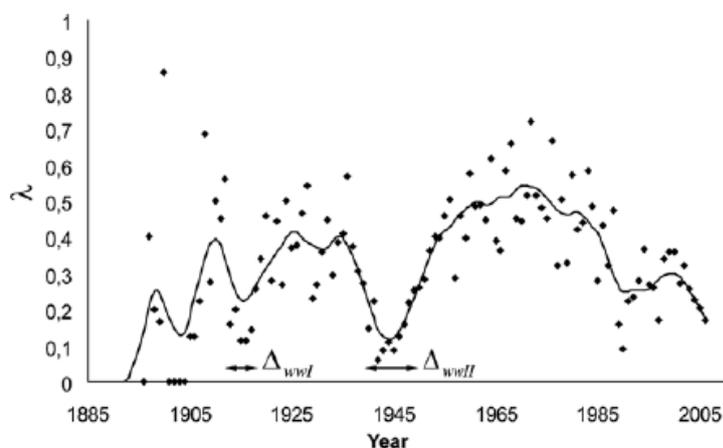


Figure 2. Evolution of factor λ : new WR number over official Olympic event number. Exact numbers (black dots) are filtered with a 60 Hz second order low pass butterworth filter (black curve). World wars show major impact on λ : Δ_{wwI} =6.4 years ; Δ_{wwII} = 13.4 years. doi:10.1371/journal.pone.0001552.g002

inverse function of equation (3), is given by:

$$t' = \frac{1}{-a} \cdot \left[\log \left(\frac{y-b}{\Delta_{WR}} \right) \right] \quad (5)$$

Coefficients of equation (5) are calculated for the last period of each event through LMA. The result is used to estimate the year t when the 99.95% (1/2000) limit is reached. This limit is set by $y = b + \frac{b}{2000}$ for chronometric events, and $y = b - \frac{b}{2000}$ for non chronometric records. The 1/2000 value was chosen in reference to the chronometric limits used on the quickest track race: it represents half of a 1/100th of a second on the 100m (and about 4s on a marathon or 100g in weight lifting disciplines).

Estimating prediction variability

Credibility interval is computed using a simulation method of Monte Carlo [17]. Previously estimated coefficients from equation(5) are used to draw 10 000 new coefficients in a bidimensional normal distribution. Median was chosen as a robust measure of the center of the distribution in a non parametric approach.

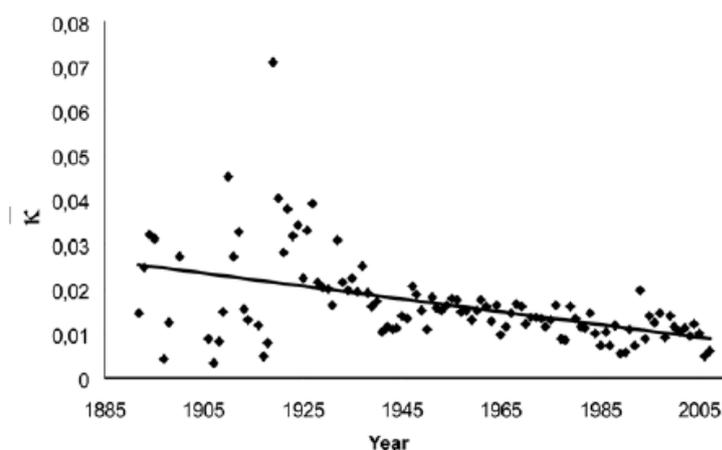


Figure 3. Annual evolution of WR relative improvement: $\bar{\kappa}_t$ decreases from 0.024 in the first 30 years to 0.010 in the last 10 years (Linear model: $y = -1.45 \cdot 10^{-4}x + 0.301$, $F(1,102) = 27.14$, $P < 0.001$). This decrease is representative of the growing difficulty to improve previously established WR values. doi:10.1371/journal.pone.0001552.g003

We used the 2.5th percentile, median and 97.5th percentile to produce the prediction errors for the estimated year at 99.95% and the estimated WR asymptotic values. The credibility interval [18] is given by the mean of the 2.5th and 97.5th percentiles for all 125 predictable events (Table S1).

Results

Chronometric events represent 58% of the data set (swimming, track, cycling, speed skating) with a decreasing tendency of WR values; 42% are non chronometric events (field, weight lifting) with increasing WR values.

Factor λ evolution during the Olympic era (Fig. 2) reveals three major phases of decline starting in 1913, 1938 and 1971 respectively. World Wars impact on λ results in two major lag times, estimated by their width at mid-height: Δ_{wwI} = 6.4 years for World War I and Δ_{wwII} = 13.4 years for World War II. The calculated mean delay between each new WR is 2.62 ± 3.05 (s.d.) years.

$\bar{\kappa}_t$ significantly diminishes over the whole studied era (linear model: $F(1,102) = 27.14$, $P < 0.001$) (Fig. 3) supporting the hypothesis of a constant reduction of WR progression possibilities.

Using the best adjusted r^2 iterative algorithm, 363 periods were obtained with mean $a = 3.00 \pm 2.87$, $b' = 0.75 \pm 0.15$ (Fig. S4), $b'' = 0.99 \pm 0.008$, an average progression step between initial and final records of 24%, and mean adjusted $r^2 = 0.91 \pm 0.08$ (Fig. S3). The evolutionary profile of WR series over the Olympic era shows 2 to 3 periods for most of the events (2.47 periods \pm 1.18, range 1–6), with a mean of 8.98 WR per period and a mean duration of 25.8 years \pm 14.8 per period.

We predicted the asymptotic value of each record, using the inverse function of equation (3) on the last period of 125 exploitable events (Table S1). A Monte-Carlo procedure was used to define the credibility interval of the prediction. The mean credibility interval of the asymptotic WR values is $[-2.28\% ; +2.28\%]$. We also predicted the year when a record will be established at 99.95% of its asymptotic value using the same method on the last period of the 125 exploitable events. The distribution of the 125 dates is expressed by decades (Fig. 4): 12.8% of these asymptotic WR have been reached in 2007. By 2027, half of the records will reach 99.95% of their asymptotic value, within a [2002–2120] credibility interval (Table S1 for each event prediction).

Discussion

The proposed piecewise exponential decaying model, describing momentary expansion in a finite context, suggests a major global fading of WR progression. During an initial phase of rapid improvement, interrupted by two major events (Fig. S1), WR progression rate may have been described by a linear model. With a 40 years hindsight on the WR rate decline (Fig. 2), debate on the limits now clearly emerges. As expected from biology, accurately fitted curves (high r^2 values) now refute the linear model. In all measurable Olympic contests from five different disciplines, involving either aerobic (10000 m skating) or anaerobic (weight lifting) metabolic pathways, leg muscles mainly (cycling) or all muscles (decathlon), lasting seconds (shots) or hours (50 km walk), either in men or women, small (Fly weight) or tall athletes (100 m free style), individual or collective events (relays), all progression curves follow the same pattern, supporting the universality of the model.

Recently introduced events, such as women weight lifting starting in 1998 (Fig. S2), may require closer follow-up. Also final periods appearing in the last decade, with smaller data samples, may have a wider progression margin than estimated. Record measurement accuracy may be enhanced by using more precise technologies (times recorded in milliseconds, jumps in millimeters). Such decisions, however, are expected to have no effect on the WR progression rate λ , as it only alters the curve sampling and not the exponential shape nor the asymptotic value.

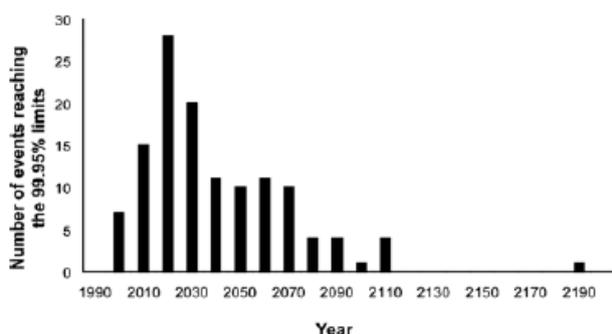


Figure 4. Distribution of estimated limits at 99.95% of the asymptotic value. Results are sampled by decades. Half of the asymptotic records will be established in 2027, and 90% in 2068. doi:10.1371/journal.pone.0001552.g004

Historical circumstances and WR evolution are closely linked: the impact of world wars results in two delays (Fig. 2) with Δ_{world} being twice as large as Δ_{year} . Starting in 1971, a much larger λ reduction is observed (from 0.72 to 0.17), in the absence of major conflict [19] and despite the Cold War, which boosted sport competition among east European and western nations. In addition economic development between 1950 and 1980, with major technological, nutritional and medical advances, offered a constant elevation of life resources in the few countries (USA, Russia, Australia, Canada, Japan and European countries) that provide 95% of WR. This last WR rate decrease also happened despite a considerable expansion of participating countries (and athletes): from 14 nations in 1896 in Athens (240 competitors), 69 nations in Helsinki's 1952 games (4950 athletes) and 202 nations for the last summer games in Athens again (11100 athletes). Rule modifications and antidoping control reinforcements may have generated specific WR evolutions, as in Clean & Jerk super heavyweight (Fig 1.D), where weight categories changed in 1948, 1968 and 1992. Finally, the λ decrease still appeared despite improvement of selection and training processes (time allotted to practice, new jumping or race-starting techniques, recruitment of taller athletes [20]). All of these may have triggered new periods, but did not alter the global pattern, which is common to sport events as different as marathon, 4 \times 100 m medley relay or pole vault.

Individual or team doping strategies have been used throughout the Olympic era, and state controlled protocols were developed since 1970 [21,22]: both may have contributed to slow down the λ slope. Such practices however did not prevent the decline observed after the Mexico Games. Situations where doping would be legalized or not properly prevented [23–26] may again partially alter the record course in the future. The fact that suspected or belatedly convicted athletes hold some of the final records may exaggerate our predictive model, such that the year when half of WR will reach the 99.95% limit may even be closer. In fact recent data show no progression of the 10 best performers in the last 20 years for the 100 m track women or men high jump [27] suggesting these WR may not be challenged anymore, especially when anti-doping agencies increase their actions and penalties. This is also observed when comparing the sprint events in running, swimming and speed skating over the second half of the XXth century [28].

Major international rule changes, new technologies or gene profiling have also been tested in sport [29–30]. However 50% of asymptotic WR values will be obtained in one generation: sport organizations may then try to create new events, drop the WR quest, favor sports less directly associated with pure performance or promote health benefits of physical activity [31]. The “citius, altius, fortius” motto may be reworded within this century. Toward a “sanius ?” remains an open question.

In summary, an epidemiological analysis of sport performances demonstrates that WR progression follows a piecewise exponential decaying pattern, altered by historical events. Results point out that in 2007, WR have reached 99% of their asymptotic value. Present conditions prevailing for the next 20 years, half of all WR won't be improved by more than 0.05%. As compared to the positivism triumphing at the time Coubertin inspired Olympic renewal, the present analysis emphasizes the ineluctable rarefaction of the quantifiable proofs of human physiological progression.

Supporting Information

Figure S1 Evolution of cumulative annual number of records. The growth of WR is altered by the two world wars, and is slowing down since 1988.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0001552.s001 (0.15 MB TIF)

Figure S2 Evolution of cumulative annual number of events with official WR. In 1972, 9 weight-lifting events were discarded from Olympic event list; 14 women weight lifting events were introduced in 1998.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0001552.s002 (0.15 MB TIF)

Figure S3 Adjusted r^2 values for the 363 periods showing no variation over the modern Olympic era (Linear model: $F(1,361) = 1.268$, $P = 0.261$) and a mean value of 0.91 ± 0.08 .

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0001552.s003 (0.20 MB TIF)

Figure S4 Evolution of b' : this parameter increases (Linear model: $F(1,145) = 106.7$, $P < 0.001$) during the Olympic era, such that recently introduced events will reach their asymptote faster than early XXth century contests.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0001552.s004 (0.17 MB TIF)

Table S1 Table of predicted WR asymptotic value, year of the 99.95% limit, credibility intervals and period number per event. Women and men are respectively symbolized by (W) and (M). C&J

References

- MacArthur DG, Seto JT, Rafferty JM, Quinlan KG, Huttlely GA, et al. (2007) Loss of ACTN3 gene function alters mouse muscle metabolism and shows evidence of positive selection in humans. *Nature Genet* 39: 1261–1265.
- Whipp BJ, Ward S (1992) Will women soon outrun men? *Nature* 355: 25.
- Reinboud W (2004) Linear models can't keep up with sport gender gap. *Nature* 432: 147.
- Nevill AM, Whyte GP, Holder RL, Peyrebrune M (2007) Are there limits to swimming World Records? *Int J Sports Med* 28: 1–6.
- Nevill AM, Whyte GP (2005) Are there limits to running World Records? *Med Sci Sports Exerc* 37: 1785–1788.
- Lovett RA (2007) Olympic talent. *Nature* 448: 104–107.
- Miller PS (2006) The computifal game. *Nature* 441: 784.
- Tatem AJ, Guerra CA, Atkinson PM, Hay SI (2004) Momentous sprint at the 2156 Olympics? *Nature* 431: 525.
- IOC. Official website of the Olympic movement. <http://www.olympic.org>.
- Swimming U home. <http://www.usaswimming.org>.
- FINA. Official FINA website. <http://www.fina.org>.
- Chidlovski AR Lift Up, History of Olympic Weightlifting. <http://www.chidlovski.net/liftup>.
- Sport Links. <http://www.geocities.com/Colosseum/Arena/3170/sport.html>.
- Levenberg K (1944) A Method for the solution of certain problems in least squares. *Q Appl Math* 2: 164–168.
- Marquardt D (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J Appl Math* 11: 431–441.
- More JJ (1977) The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory, in *Numerical Analysis*. Proceedings of the 1977 Dundee conference on numerical analysis (Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo) (G. A. Watson, ed.), Lecture notes in mathematics 630, Springer Verlag, 1978, pp 105–116.
- Mosegaard K, Malcolm S (2002) Monte Carlo analysis of inverse problems. *Inverse Probl* 18: 29–54.
- Willink R (2006) On using the Monte Carlo method to calculate uncertainty intervals. *Metrologia* 43: 39–42.
- Harbom L (2005) Armed conflict and its international dimensions, 1946–2004. *J Peace Res* 42: 623–635.
- Norton K, Oks T (2001) Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med* 31: 763–783.
- Kalinski MI (2003) State-sponsored research on creatine supplements and blood doping in elite Soviet sport. *Perspect Biol Med* 46: 445–451.
- Geipel I (2001) *Verlorene Spiele*. Journal eines Dopingprozesses. Transit Verlag ed. Berlin.
- Eichner ER (2007) Blood doping: infusions, erythropoietin and artificial blood. *Sports Med* 37: 389–391.
- Kayser B, Mauron A, Miah A (2007) Current anti-doping policy: a critical appraisal. *BMC Med Ethics* 8: 2.
- Editorial (2007) A sporting chance. *Nature* 448: 512.
- Mitchell GJ (2007) Report to the commissioner of baseball of an independent investigation into the illegal use of steroids and other performance enhancing substances by players in major league baseball. <http://mlb.mlb.com/mlb/news/mitchell/index.jsp>.
- Reinboud W. Progression in athletic. <http://www.at-a-lanta.nl/weia/Progressie.html>.
- Seiler S, De Koning JJ, Foster C (2007) The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952–2006. *Med Sci Sports Exerc* 39: 534–540.
- Buckley JG (2000) Biomechanical adaptations of transtibial amputee sprinting in athletes using dedicated prostheses. *Clin Biomech* 15: 352–358.
- Dennis C (2005) Rugby team converts to give gene tests a try. *Nature* 434: 260.
- Warburton DE, Nicol CW, Bredin SS (2006) Health benefits of physical activity: the evidence. *Can Med Assoc J* 174: 801–809.

are Clean and Jerk weight lifting events. Two versions of the Track women 100 m are presented, version 1 includes the last WR, version 2 leaves it out.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0001552.s005 (0.29 MB DOC)

Acknowledgments

This article is dedicated to Loic Lefevre's memory. We thank Dr Robin Choudhury and Pr Zahi A. Fayad for careful reviews. We thank the INSEP teams for their full support.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: OH GB JT XJ. Performed the experiments: GB JT VT NE. Analyzed the data: GB VT MT SE. Contributed reagents/materials/analysis tools: GB MT SE. Wrote the paper: GB JT.

Annexe 2:

Article original et intégral - Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988.

Référence: Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, et al. (2010a) Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. PLoS ONE 5(1): e8800. doi:10.1371/journal.pone.0008800.

Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988

Geoffroy Berthelot^{1*}, Muriel Tafflet^{1,2}, Nour El Helou^{1,3}, Stéphane Len¹, Sylvie Escolano^{1,2}, Marion Guillaume¹, Hala Nassif^{1,3}, Julien Tolaini¹, Valérie Thibault¹, François Denis Desgorces^{1,3}, Olivier Hermine⁴, Jean-François Toussaint^{1,3,5}

1 IRMES, Insep, Paris, France, **2** INSERM, U970, Paris, France, **3** Paris Descartes University, Faculty of Sciences, Paris, France, **4** Service d'hématologie Hôpital Necker and CNRS UMR 8147, Paris, France, **5** Centre d'Investigation de la Médecine du Sport (CIMS), Hôtel-Dieu, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Paris, France

Abstract

The growth law for the development of top athletes performances remains unknown in quantifiable sport events. Here we present a growth model for 41351 best performers from 70 track and field (T&F) and swimming events and detail their characteristics over the modern Olympic era. We show that 64% of T&F events no longer improved since 1993, while 47% of swimming events stagnated after 1990, prior to a second progression step starting in 2000. Since then, 100% of swimming events continued to progress. We also provide a measurement of the atypicality for the 3919 best performances (BP) of each year in every event. The secular evolution of this parameter for T&F reveals four peaks; the most recent (1988) followed by a major stagnation. This last peak may correspond to the most recent successful attempt to push forward human physiological limits. No atypicality trend is detected in swimming. The upcoming rarefaction of new records in sport may be delayed by technological innovations, themselves depending upon economical constraints.

Citation: Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, et al. (2010) Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. PLoS ONE 5(1): e8800. doi:10.1371/journal.pone.0008800

Editor: Conrad P. Earnest, Pennington Biomedical Research Center, United States of America

Received: October 23, 2009; **Accepted:** January 4, 2010; **Published:** January 20, 2010

Copyright: © 2010 Berthelot et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: The authors thank the Centre National de Développement du Sport and the Ministry of Health and Sport for financial contributions. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: geoffroy.berthelot@insep.fr

Introduction

Sport performances may cease to improve during the XXIth century, possibly due to physiological limits [1] and interactions between genomic [2] and environmental parameters [3]. The progression of top athletes' performances remains unknown for quantifiable sport events. We hypothesize that such an evolution also mirrors our social and historical development [4] and symbolize our quest for the Citi^{us}. Modelling this progression enables us to identify the underlying trends and behaviours in sports and history on a world scale. After the publication of initial mathematical models [5,6], world records (WR) were shown to follow a piecewise exponential model [1] over the modern Olympic era (1896–2007). The present study is based on the analysis of a large scope of sport performances as an indicator of our species' physiological maxima. It encloses the human physical potential and may be seen as a complement to direct laboratory measurements on a sample of elite athletes [7].

In this study we analyse the single best result of the top 10 world performers every year from two major olympic disciplines (track & field – T&F – and swimming) in order to establish their law of progression after one century of sport development. We also introduce the concept of “atypicality”, defined as the singularity trait of a given performance, and we measure its trend in the sport law of progression. Atypicality is seen in all systems. A previous study ranked T&F WR using extreme value theory [8] but did not investigate their temporal tendencies or the relationship between the best performer and the other athletes. A closer observation

allows for scoring all performances using 3 statistical descriptors, characterizing atypicality, and providing a reliable trend of the *avant-garde* of human performers.

Materials and Methods

We collected the single best result of the top 10 world performers every year in 70 events from the major two quantifiable Olympic disciplines: 36 T&F events over the modern Olympic era (1891–2008) and 34 swimming events over the 1963–2008 period [9–11]. A total number of 41351 performances including 3919 Best Performances (BP) were gathered.

Growth Law

The law of progression after one century of sport development is modelled using a Gompertz function, widely used in biology [12], economic dynamics [13] or technology diffusion [14–15]. The physiological limit for each event was given by computing the year corresponding to 99.95% (1/2000th) of the estimated asymptotic value (Table S1). Events presenting a limit before 2008 were considered as “halted” events. In addition, we conducted a residual analysis (Materials and Methods S1) and determined the Most Recent Change Of Incline (MRCOI, Materials and Methods S1) for swimming events.

Descriptive Analysis

Descriptive statistics were also conducted to assess the impact of the Olympic Games on performances every four years and to

measure the yearly variation between each performer using the yearly mean relative performance improvement $\overline{\kappa}_t$ and the coefficient of variation $\overline{cv}(t)$.

Measurement of the Atypicality

We finally focused on the *atypicality* of each BP using a set of specific descriptors: d_1 measured its relative distance to all other performances during the year, d_2 was the “durability” of a BP over the years before it is beaten by another performance and d_3 characterized the weight of each BP over all other performances for each event during the Olympic era. The highest 5% values of each descriptor are selected and studied for both disciplines. We define “Atypicality” A as the distance from each BP to the origin of the descriptors’ uniformized Euclidian space.

Results

Growth Law

The average adjusted R^2 for all 147 historical curves is 0.68 ± 0.22 (mean \pm standard deviation).

Among T&F events, 63.9% no longer progress (77.8% of the 18 women events; 50% of the 18 men events). The average year for the detected dates of halt in performance is 1992.8 ± 7.9 (1991.8 \pm 8.0 for women; 1994.8 \pm 7.9 for men). Dates of halt range from 1980.9 (1500m women) to 2007.1 (triple jump men, Table S1).

The changes of incline in the T&F curve are mostly related to World Wars I and II (WWI, WWII) or changes in event timing methods, improving measurement accuracy, which is especially important over short events. However, in the last twenty years no rule alterations or technological improvements were made that could have resulted in a new curve.

Thirteen T&F events still progress (4 women’s and 9 men’s), nine of which are middle and long distance races.

Among swimming events, 100% still progress. The average MRCOI in swimming is 1997.2 ± 2.7 and the peak appears in 2000. Specifically, the mean MRCOI for fly and breast swim styles is 1994.4 ± 2.5 while the mean MRCOI for freestyle and back is 1998.1 ± 2.1 . Prior to the MRCOI, progression in 16 (47.1%) of the 34 events had halted: 8 women and 8 men events. Average year of halt is 1990 ± 4.4 (1988.6 \pm 4.8 for women, 1991.5 \pm 3.6 for men).

Descriptive Analysis

The impact of WWI and WWII for T&F events over $\overline{\kappa}_t$ are computed: a regression of -0.44% of the mean performances within a six-year time span from 1913 to 1918 is observed for WWI; and -0.45% in a 6-year time span from 1940 to 1945 for WWII.

Average Olympic periodicity is measured with a mean increase of T&F performances of $0.99\% \pm 0.56$ for Olympic year t , $-0.32\% \pm 0.49$ for $t+1$, $0.48\% \pm 0.45$ for $t+2$ and $0.37\% \pm 0.41$ for $t+3$.

The mean yearly coefficient of variation $\overline{cv}(t)$ regresses over the century and range from 3.0×10^{-2} (1891) to 1.08×10^{-2} (2008) for T&F, and 0.81×10^{-2} (2008) for swimming.

Atypical Performances Measured through A

All of the descriptors’ distributions for T&F and swimming reveal a right-skewed profile: outlying performances are located in right tails.

Secular evolution of the highest 5% values for each descriptor reveals 4 historical peaks in T&F: 1943 (14 cases), 1988 (13 cases), 1993 (7 cases) and 1998 (16 cases). Evolution of the highest 5%

values remains steady in swimming over the period 1982–2008 except in 1994 where 17 cases are spotted.

The secular trend is given for each descriptor: descriptor d_1 decreases throughout the century, reaching a stable value in the 1980’s, showing that the distance from the best performer to the others is decreasing, except in the WWII era’s peak in 1943. Life expectancy or “durability” of a BP (d_2) is stable over the century, with high values appearing in the 1980’s in T&F. The most “durable” BPs were established during this period. The deviation produced by each BP over all other performances of the same event (d_3) is stable over the century. High values are found during the following years: 1943 (d_1 , d_3), 1988 (d_2), 1993 (d_3) for T&F and 1994 (d_1 , d_4) for swimming.

Historical evolution of yearly “Atypicality” (A) shows 4 peaks in T&F: 1916, 1943, 1968 and 1988 of amplitudes 0.39, 0.46, 0.31 and 0.46 respectively. Four corresponding cycles were found with durations of: 21, 28, 23 and 27 years accordingly.

There are no significant variations of A in swimming between 1982 and 2008.

Discussion

Progression Law of the “10 Best” and Descriptive Statistics

Analysis of top athletes’ performances suggests that the progression of human performances may reach its limit soon [1,3,5,6,8]. WR were shown to follow a similar development [1,3] that also highlighted that 1/4 of T&F WR had reached their limit in 2008. We here introduce a new tool to describe the physiological dynamics of elite sport performances by modelling growth curves over a large data sample in 34 events since 1963 and 36 events over 118 years.

The two studied disciplines show different progression schemes: most (63.9%) of T&F events have stopped progressing since 1993 ± 8 years while all swimming events were progressing until 2009 (Fig. 1). This halt occurred 34 years earlier than the estimated stagnation of half of the WR in 5 Olympic disciplines [1]; it may reveal that most of T&F athletes are already beyond the edge of stagnation. Both genders present a slightly different evolution in T&F events, suggesting male events still have some potential reserve whereas the majority of women events (77.8%) has stopped progressing since 1992 ± 8 years. Women may have reached their limits before men, despite a later entry into Olympic competition [16]. Positive values of the mean relative performance improvement are also attributable to the recent introduction of women events (pole vault, marathon, triple jump and 1500m).

The analysis of residuals ($YADR$) in T&F events reveals the impact of both world wars on performance development (Fig. S1). Following the Cold War period, a large regression (3.07%) is noticed in 4 events (shot put women, discus throw women, high jump men, long jump men, Fig. S2). The fact that the major two powers were in a dense competition [4] may have led to a transitory extra-improvement which disappeared shortly after the war. From that point on, physiological progression may be limited in a majority of T&F events, and performance will not increase until international instances or federations allow for major technological improvement [17,18].

The recent progression period in swimming results owes much to the introduction of swimsuits (Fig. 2). This new technology, allowed by FINA in 1999, enhances hydrodynamic penetration and largely reduces drag forces [9,19]. Results show a divergence in recent performance development between “profiled” styles (freestyle, back) and “turbulent” swim styles (fly, breast). Previous studies support this observation as they show that swimsuits may

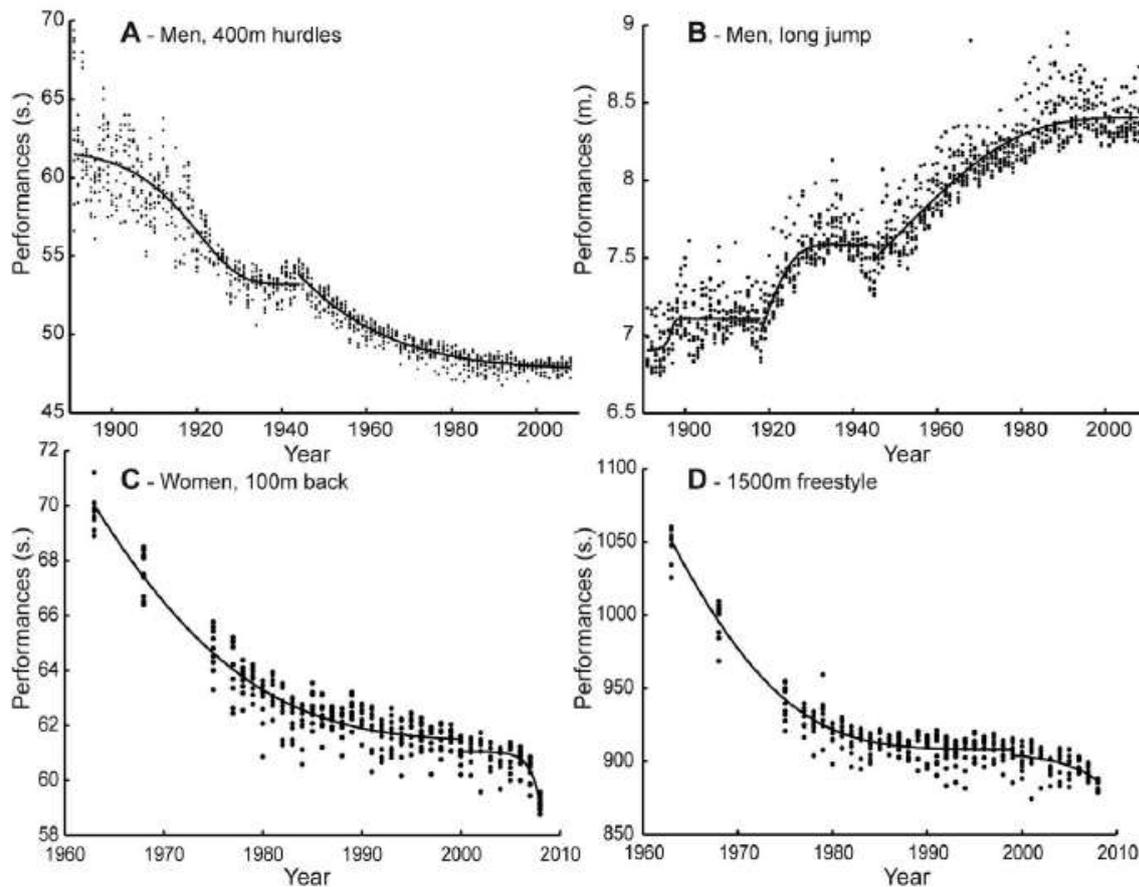


Figure 1. Model fitting on 4 events. **A.** Men 400m hurdles (T&F) fitting ($R^2_i=0.77$; $R^2_{ii}=0.91$), progressing event. **B.** Men long jump (T&F) ($R^2_i=0.22$; $R^2_{ii}=0.55$; $R^2_{iii}=0.81$), "halted" event since 2001.5 (Table S1). **C.** Women 100m back (swimming) ($R^2_i=0.90$; $R^2_{ii}=0.63$). **D.** Men 1500m freestyle (swimming) ($R^2_i=0.92$; $R^2_{ii}=0.31$). Fewer data are available in swimming (C, D) between 1963 and 1977. Prior to the MRCOI, C was in progression and D was a "halted" event since 1991.9. A new progression trend appears after the MRCOI (2000 (C)/1999 (D)) for swimming events, as a result of the introduction of swimsuits.
doi:10.1371/journal.pone.0008800.g001

have more impact in breaststroke, the most turbulent style with the largest drag resistance to flow [20,21]. The next step of performance development is seen in 2008 in relation to the introduction of second-generation swimsuits. This major performance increase culminated in the last Olympic Games (Beijing, 2008), where a single swimsuit was the common determinant of 96% of the 22 new WR, 95% of gold medals and 90% of all medals [22,23].

Sport performance is an important indicator of the optimization of physiological functions, enzyme isoforms (actin, myosin, alpha-actinin [2]), energy use in aerobic and anaerobic metabolisms, oxygen transport and psychological resources that mobilize them [24]. Genes encoding each of these proteins or functions and their co-segregation or clustering are theoretically limited [25]. Applying the Gompertz model to the top performances of 70 sport events illustrates this concept through a description of performances evolving toward their limits. In fact, for a majority of T&F events, best performances show a secular progression hindered by the two WWs before reaching a phase of slower progression at the end of the XXth century (Fig. 2). The evolution difference between the two disciplines is mostly based on technological improvement and rules alterations. In Beijing, T&F records were scarce compared to

swimming: only 5 new WR were established with 3 assigned to the same exceptional athlete. The Berlin (2009 T&F World Championship: 3 WR) *vs.* Rome (2009 Swimming World Championship: 43 WR) competition confirmed the demonstration.

Atypicality of the BP

The Gompertz model describes the evolution of the first 10 world performers in the past century (Fig. 1). However, some top performers stand apart from this group, suggesting their performances are remarkable. Such singular marks are in contrast with the tight evolution of the whole group. The stability of the yearly mean coefficient of variation (Fig. S3) is noticeable after 1960, suggesting that all athletes are benefiting from similar conditions for competitions (training facilities, technological and medical advances). The initial era (1891–1930) was a period during which social or economical conditions may have greatly differed between athletes. Later on, sport's internationalisation (1960–2008) has led to the implementation of similar organizations, competition calendars and regulations among nations [4]. The continuous technological advances aiming to enhance performance were previously described by Robert Fogel as a "Techno-physiological evolution" [26].

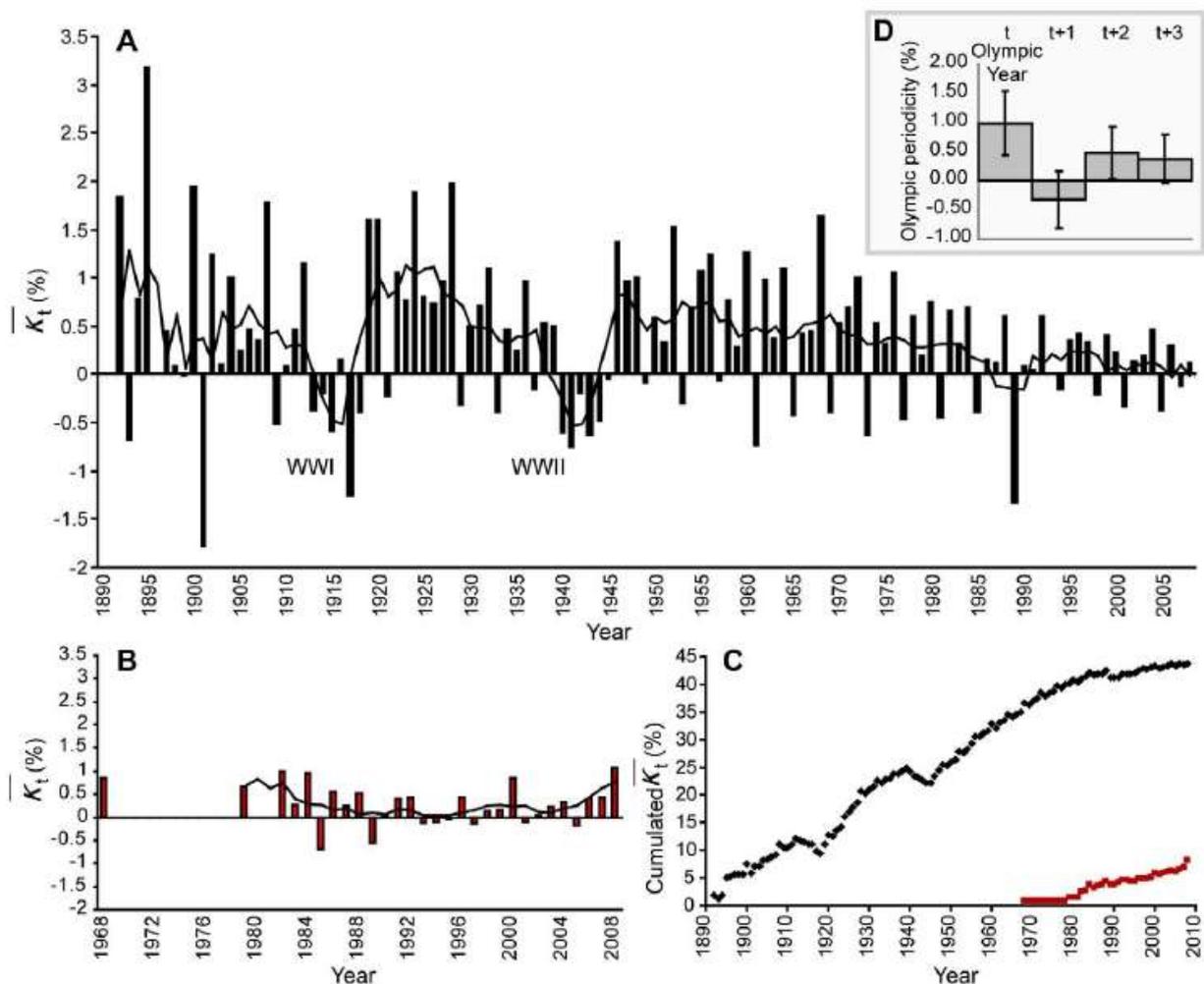


Figure 2. Evolution of performance improvement $\bar{\kappa}_t$ and Olympic periodicity. A. Evolution of $\bar{\kappa}_t$ in T&F. B. Evolution of $\bar{\kappa}_t$ in swimming. C. Cumulative evolution of $\bar{\kappa}_t$ in T&F (black dots) and swimming (red squares). D. Average Olympic periodicity with standard deviation in T&F and swimming. Both $\bar{\kappa}_t$ evolutions in T&F and swimming (A, B) are given with a 4 year smoothing average (black line). After a large period of performance improvement, hindered by the two World Wars, the development of performance slow down since 1960. A larger regression is observed in 1989. At this time, random anti-doping tests were established. The impact of the Olympic games, aka Olympic periodicity reveals that performances increase by 1% during an Olympic year (t), while they regress in the following year ($t+1$).
doi:10.1371/journal.pone.0008800.g002

The study of the highest 5% values of descriptors reveals 4 peaks for T&F and 1 peak for swimming (Fig. 3). Considering the post 1930 era in T&F, the 1943 peak is related to WWII. In this context, exceptional athletes are even more unique. The case of Fanny Blankers-Koen highlights that brilliant performers can score a maximum number of highest performances in such a period (4 gold medals in London Olympic games, 5 European titles and 16 WR in 8 events: 100 yards, 100m, 200m, 100m hurdles, high jump, long jump, pentathlon and 4*100m relay). This may be due to the presence of fewer skilled opponents.

The 1988 peak matches an Olympic year (Fig. 3). Eleven outstanding WR were beaten this year and 7 of them, in women events exclusively, still remain today. Only 3 were established in Seoul (200m women, 4*400m relay women, heptathlon). The others were established a few weeks earlier in Stara Zagora (BUL, 100m hurdles), Indianapolis (USA, 100m), Neubrandenburg (GDR, discus throw) and Leningrad (USSR, long jump). In this

period, local competitions may also have had fewer monitoring procedures favouring illegal enhancement behaviours. Procedures for unexpected, out-of-competition anti-doping controls were officially approved one year later and 1988 can be considered as the T&F golden year of exceptional marks, which subsequently resulted in a large stagnation in the women's events.

Outstanding BP values of the 1993 peak do not correspond to an Olympic year, but may be linked to a generation of exceptional performers. This year, Chinese women athletes achieved exceptional performances in T&F with 33% of the BP, 33% of the second performances and 39% of the third performances. These ratios have never been equalled by China since then. On 1993 at the Chinese National Games in Beijing, 5 Chinese women athletes have beaten the 3000m WR, a singular moment in T&F history. A similar occurrence was only observed on the 26th of July 1976 in Montreal, when 6 women athletes have beaten the WR in the same 800m race. All were East European athletes (Union of Soviet

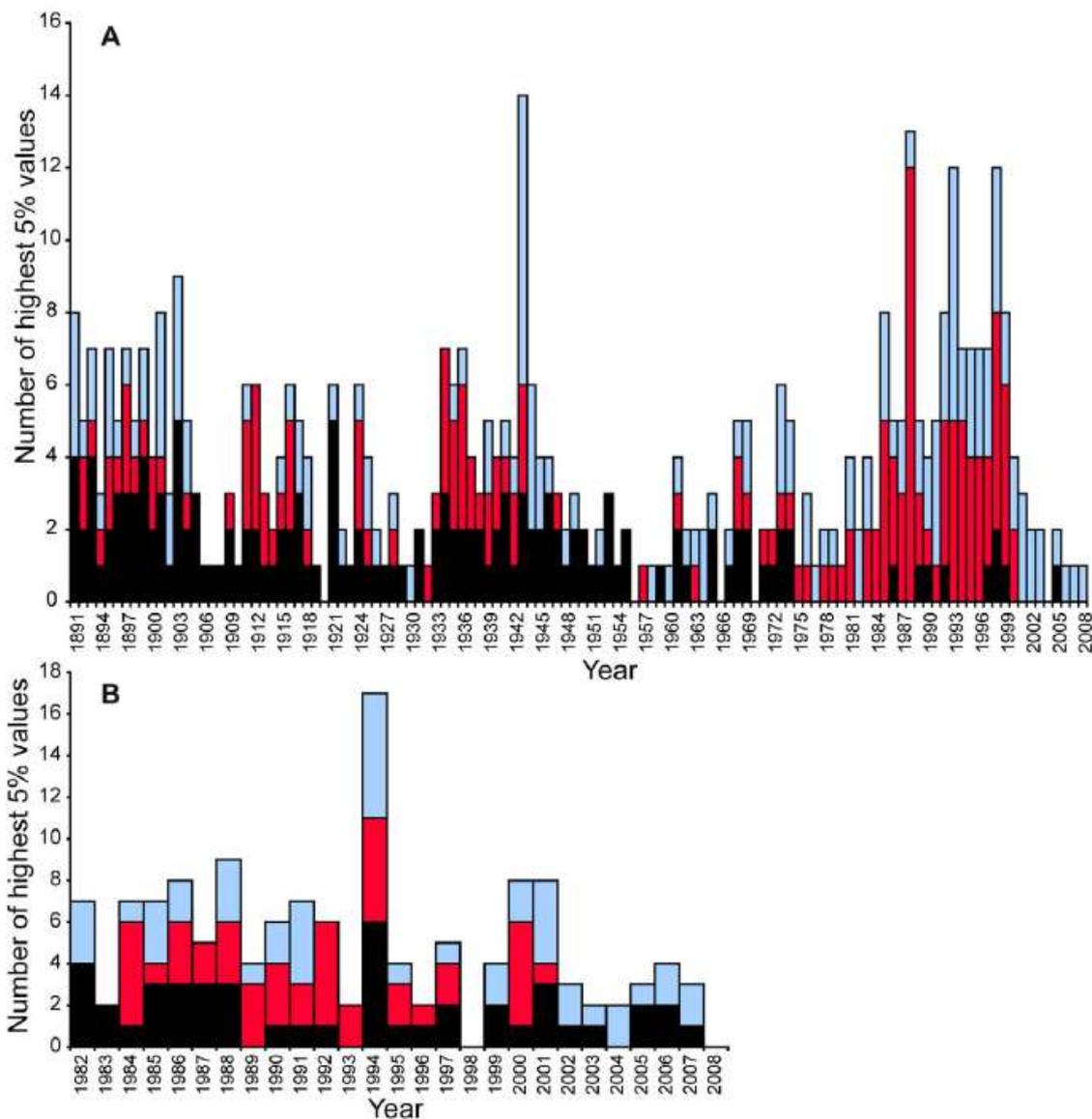


Figure 3. Number of highest 5% values by year and descriptor. A. T&F. B. swimming. The highest 5% values are gathered from each descriptor distribution in both disciplines: d_1 (black), d_2 (red), d_3 (light blue). doi:10.1371/journal.pone.0008800.g003

Socialist Republics (USRR), German Democratic Republic (GDR) and Bulgaria).

In swimming, evolution of atypical performances peaked in 1994 (Fig. S4). This year, Chinese swimmers achieved exceptional performances, obtaining 64.7% of the women's BP. In the last 30 years, only the GDR has established such a supremacy, with a 70.6% ratio in 1983, and 64.7% in 1987.

Both disciplines present different distributions and spatial repartitions of descriptors (Fig. S4, Fig. S5). As a result, measure A shows two different evolutions (Fig. 4). In T&F the first 2 peaks of A have the same significance as the first 2 peaks of the highest 5% values, corresponding to the world wars (Fig. 4). The third peak corresponds to the year of the Mexico Olympic Games (1968), during which numerous outstanding performances were established. This corresponds to the year with the highest number

of WR [1]. The largest and final peak (1988) is followed by a major regression of performances and a "halt" of T&F progression. This peak may correspond to the last successful attempt of our species to push its physiological limits forward.

The observed discrepancy between athletes of different countries may be related to training protocols improvements. Russian training loads were increased three fold between 1968 and 1998, in speed and strength sports [27]. Most countries have followed such a trend in training protocols and volumes. Between 1950 and 1990, East European countries such as the GDR were involved in doping protocols [28] and may be responsible for many performances by undetected doped athletes [28–33]. As a more recent example, recombinant erythropoietin (EPO) was marketed in 1989 and the International Olympic Committee prohibited its use in sports in 1990 [34,35]. Several studies

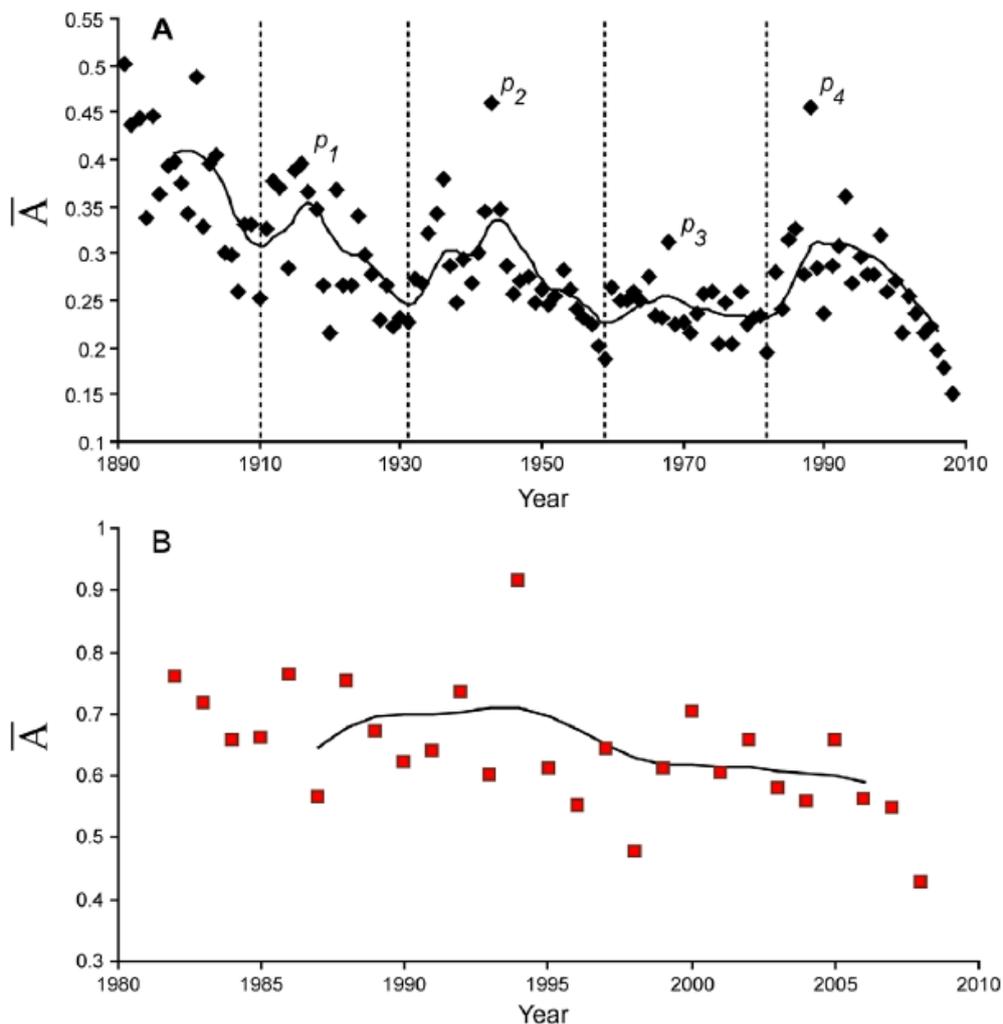


Figure 4. Average yearly A over time for each discipline. A. Secular evolution of A for T&F (black dots); B. Evolution of A for swimming (red squares). Both evolutions are given with a 60 Hertz, second order low pass Butterworth filter. Besides the initial era (1890–1910), 4 peaks (p_1 – p_4) appear in T&F. Swimming curve (B) does not show any trend over the years. The 1994 peak is mainly related to Chinese swimmers, who performed very high performances (also observable in 1993 (p_4) in T&F).
doi:10.1371/journal.pone.0008800.g004

quantified EPO's effect on performance by measuring maximal oxygen uptake (VO_{2max}) and showed a 6.3 to 6.9% increase [36,37]. The introduction of out-of-competition controls in 1988 may have led to a reduction of drugs use among athletes. The later introduction of World Doping Anti-Agency (WADA) in 1999 has led to the harmonization of rules and regulations governing the anti-doping struggle in 2004. These recent efforts in the fight against doping may have had an effect on the proportion of doped athletes in competition. This may have been the case in T&F where we see a general decline of performance after 1988 except in middle and long distance running races [7]. The same effect is observable in cycling [32]. In the present study, we cannot quantify the proportion of doped athletes so far. However, the analysis of this proportion among BP, using available lists from official sources [9,38] might allow an estimation of the ratio of physiological *vs.* pharmacologically enhanced performances.

In swimming, A remains stable over the last quarter of century as swimsuits benefited most of the best performers (Fig. 4). Major

advancements in sports heavily rely on materials developments. Duralumin, carbon, polyurethane (tartan track, first used in the 1968 Olympic Games, or swimsuits) granted temporary improvements in Olympic disciplines. Innovation is a driving force of performance development and technology will need continuous research development in order to produce materials with higher energetic efficiency and to defy performances stagnation. These new programs will also depend on economical incentives and balances [39].

Conclusion

The Gompertz model of the first 10 world performers reveals that performances now stagnate in T&F while swimming still progressed until today. Atypicity quantifies the irregularity of the yearly best performer. The pinnacle of atypical T&F performances occurred in 1988, hastening the race toward human limits. This present halt of performances and the previously demonstrated stagnation of WR [1,3] emphasize that our physiological evolution

will remain limited in a majority of Olympic events. Present performances may now be enhanced through extremely exceptional individuals at the frontier of our genomic condition or with the artificial help of technology. However, the recent decision of FINA regarding the ban of specific swimsuits in 2010 will impact the future performance progression. If such a decision is confirmed, we may observe a rapid convergence toward the previously estimated physiological asymptotes. The limitation of artificial enhancements may drive performances back down to the physiological frontiers, which in turn depend upon growing economical or environmental constraints.

Supporting Information

Table S1 Evolution of the 10 best performers in all 70 events. Women events (W) and Men events (M) are sorted by disciplines (T&F vs. swimming), and distances/type of efforts for T&F. All swimming events show progression after the MRCOI.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s001 (0.10 MB DOC)

Materials and Methods S1 Model and descriptors (d1-d3) description. Description of the model and the Gompertz function. Description of the three statistical descriptors d1-d3.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s002 (0.08 MB DOC)

Figure S1 Secular evolution of the yearly average distance of residuals (YADR). A. Secular evolution of YADR in T&F (gray bars, left ordinate) with the number of changes of inclines (red bars, right ordinate). B. Secular evolution of YADR in swimming (gray bars, left ordinate) with the number of MRCOI detected each year (red bars, right ordinate). The analysis of residuals of T&F events (A) presents several stages: two major deviations periods (Et1, Et2) consecutive to WWs and two more recent peaks (Et3, Et4) including the largest one (Et4). After the initial era (1890 to 1900), high positive deviations from the model are spotted during the following periods: 1908 to 1915 (Et1, peak in 1912: 1.31%), 1935 to 1942 (Et2, peak in 1939: 1.25%), 1953 to 1963 (Et3, peak in 1956: 1.04%), 1977 to 1991 (Et4, peak in 1988: 1.1%). Swimming YADR (B) presents numerous variations of low amplitudes (peak in 1984 at 0.6%). The major number of MRCOI detected in swimming is spotted in 1999 and 2000, contemporary to the introduction of swimsuits, allowed by the FINA in 1999.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s003 (0.85 MB TIF)

References

- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. (2008) The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. *PLoS ONE* 3: e1552.
- MacArthur DG, Seto JT, Raftery JM, Quinlan KG, Huttley GA, et al. (2007) Loss of ACTN3 gene function alters mouse muscle metabolism and shows evidence of positive selection in humans. *Nat Genet* 39(10): 1261–1265.
- Desgorges F-D, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. *PLoS ONE* 3: e3653.
- Guillaume M, El Helou N, Nassif H, Berthelot G, Len S, et al. (2009) Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism. *PLoS ONE* 4(10): e7573.
- Nevill AM, Whyte GP (2005) Are there limits to running World Records? *Med Sci Sports Exerc* 37: 1785–1788.
- Nevill AM, Whyte GP, Hokler RL, Peyrebrune M (2007) Are there limits to swimming World Records? *Int J Sports Med* 28: 1–6.
- Schumacher YO, Pottgiesser T (2009) Performance profiling: a role for sport science in the fight against doping? *Int J Sports Physiol Perform* 4(1): 129–33.
- Eimmahl JHJ, Magnus JR (2008) Records in Athletics Through Extreme-Value Theory. *Journal of the American Statistical Association* 103(484): 1382–1391.
- Swimnews, Available: <http://www.swimnews.com/> via the Internet. Accessed 09 Feb 2009.
- FINA, Available: <http://www.fina.org/> via the Internet. Accessed 15 Sep 2009.
- Rabinovich M (2008) Track and Field Statistics. Available: <http://trackfield.brinkster.net/Logon.asp> via the Internet. Accessed 14 May 2009.
- Rossi S, Deslauriers A, Morin A (2003) Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia* 21(1): 33–39.
- Jarne G, Sanchez-Choliz J, Fatas-Villafranca F (2005) "S-Shaped" Economic Dynamics. The logistic and Gompertz curve generalized. *The Electronic Journal of Evolutionary Modeling and Economic Dynamics* 1048: 1–37.
- Michalakelis C, Varoutas D, Sphicopoulos T (2008) Diffusion models of mobile telephony in Greece Source. *Telecommunications Policy* 32(3–4): 234–245.
- Cardenas A, Garcia-Molina M, Sales S, Capmany J (2004) A new model of bandwidth growth estimation based on the gompertz curve: application to optical access networks. *Lightwave Technology, Journal of* 22: 2460–2468.
- Thibault V, Berthelot G, Tafflet M, Guillaume M, El Helou N, et al. (2009) Stability of gender gaps for 30 years in elite sport. *Fundamental & Clinical Pharmacology* 23(1): 88.
- Hood M (2005) Running against the wind [sports prosthetics]. *Spectrum, IEEE* 42: 13–14.
- Miodownik M (2007) The bionic future of sport. *Materials Today* 10: 6.
- Toussaint HM, Truijens M, Elzinga MJ, van de Ven A, de Best H, et al. (2002) Effect of a Fast-skin 'body' suit on drag during front crawl swimming. *Sports Biomech* 1(1): 1–10.
- Holmér I (1974) Propulsive efficiency of breaststroke and freestyle swimming. *European Journal of Applied Physiology* 33(2): 95–103.

Figure S2 Model fitting on 6 T&F. A. Men discus throw (T&F) (R2i = 0.85; R2ii = 0.83; R2iii = 0.94), "halted" in 1984.2. B. Women discus throw (T&F) (R2i = 0.88; R2ii = 0.92), "halted" in 1988.4. C. Women long jump (R2i = 0.70; R2ii = 0.90), "halted" in 1996.8. D. Women high jump (R2i = 0.78; R2ii = 0.95), "halted" in 1995.2. E. Men shot put (R2i = 0.43; R2ii = 0.80; R2iii = 0.93), "halted" in 1983.9. F. Women shot put (R2i = 0.86; R2ii = 0.90), "halted" in 1983.9.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s004 (0.68 MB TIF)

Figure S3 Evolution of cv(t) factor in T&F and swimming. cv(t) values are decreasing over time in T&F (black dots); cv(t) values show no trend in swimming (red squares) on a shorter follow-up period. T&F cv(t) evolution is linked to historic events: after World War II values are getting tighter (<0.015) suggesting all performances are progressing in the same range.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s005 (0.16 MB TIF)

Figure S4 Secular evolution of descriptors. Evolution is given in T&F (A, B, C, black dots) and swimming (D, E, F, red squares). Descriptor d2 presents a decreasing evolution from 2003 to 2008, which is related to time. It is assessed by T, measuring the number of performances still unbeaten (green squares) in both disciplines. High average values of T&F descriptors are spotted at d2: 1988, d3: 1993.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s006 (0.37 MB TIF)

Figure S5 Spatial repartition and distributions of the 3 uniformized descriptors d1, d2, d3. Spatial repartition and distributions of the 3 uniformized descriptors d1, d2, d3 for T&F (A, black dots and bars) and swimming (B, red dots and bars). All distributions are unimodal with positive skew. For T&F: d1 skew = 2.9; d2 skew = 3.8; d3 skew = 4.5; for swimming: d1 skew = 0.6; d2 skew = 3.6; d3 skew = 1.7; p-value < 0.001 for all (d'Agostino Skewness test, alternative hypothesis: positive skewness). Outliers are located in right tails.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0008800.s007 (0.61 MB TIF)

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: GB JFT. Performed the experiments: GB MT. Analyzed the data: GB MT NEH SE JT OH JFT. Contributed reagents/materials/analysis tools: GB MT SL SE MG HN JT VT FDD OH. Wrote the paper: GB JFT.

21. Kolmogorov SV, Rumyantseva OA, Gordon BJ (1997) Hydrodynamic Characteristics of Competitive Swimmers of Different Genders and Performance Levels. *Journal of applied biomechanics* 13(1): 88–97.
22. Wood J (2008) Record breaking or rule breaking? *Materials Today* 11(5): 1.
23. Len S, Berthelot G, Toussaint JF (2008) The Beijing Human Performance Report. Bilan des performances à Pékin in *Sport Performance in Beijing* eds INSEP. pp 258–263.
24. Joyner M, Coyle F (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of Physiology* 586: 35–44.
25. Williams AG, Folland JO (2008) Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *The Journal of physiology* 586: 113–121.
26. Fogel R (2003) *The escape from premature death and hunger*. Cambridge: Cambridge university press.
27. Silber M (1998) *Pharmacology and Sport; Sport Pharmacology in the Soviet Union*. Sport Sci. Available: <http://www.sportsci.org/encyc/drafts/Pharmacology.doc> via the Internet. Accessed 13 May 2009.
28. Franke W, Berendonk B (1997) Hormonal doping and androgenization of athletes: a secret program of the German Democratic Republic government. *Clinical Chemistry* 43: 1262–1279.
29. Riordan J (1999) The impact of communism in sport, eds J. Riordan & A. Kneger.
30. Riordan J (1993) *Rewriting Soviet Sports History*. *Journal of Sports History* 20: 3.
31. Donald BA (2008) The science of doping. *Nature* 454: 692–693.
32. El Helou N, Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Nassif H, et al. (2009) Tour de France, Giro, Vuelta and European classic races show a unique speed progression of road cycling in the last 20 years. *Fundamental & Clinical Pharmacology* 23(1): 85–86.
33. Dilger A, Frick B, Tolsdorf F (2007) Are Athletes doped? Some theoretical arguments and empirical evidence. *Contemporary Economic Policy* 25: 604–615.
34. International Olympic Committee (IOC) official website. www.olympic.org.
35. Diamanti-Kandaris E, Konstantinopoulos PA, Papailiou J, Kandarakis SA, Andreopoulos A, et al. (2005) Erythropoietin abuse and erythropoietin gene doping. Detection strategies in the genomic era. *Sports Med* 35(10): 831–40.
36. Ashenden MJ, Hahn AG, Martin DT, Logan P, Parisotto R, et al. (2001) A comparison of the physiological response to simulated altitude exposure and r-HuEpo administration. *J Sports Sci* 19: 831–7.
37. Parisotto R, Gore CJ, Emslie KR, Ashenden MJ, Brugnara C, et al. (2000) A novel method utilizing markers of altered erythropoiesis for the detection of recombinant human erythropoietin abuse in athletes. *Haematologica* 85(6): 564–72.
38. International Association of Athletics Federations (2009) Available: <http://www.iaaf.org> via the Internet. Accessed 25 Sep 2009.
39. Lu A (2008) Do New Materials make the Athlete? *Science* 321: 626.

Annexe 3 :

Article original et intégral - Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983.

Référence: Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, et al. Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983. Journal of Sports Science and Medicine. 2010;9:214-223.

Research article

Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983

Valérie Thibault ¹✉, Marion Guillaume ¹, Geoffroy Berthelot ¹, Nour El Helou ¹, Karine Schaal ¹, Laurent Quinquis ¹, Hala Nassif ¹, Muriel Tafflet ^{1,3}, Sylvie Escolano ^{1,3}, Olivier Hermine ^{2,4} and Jean-François Toussaint ^{1,2,5}

¹ IRMES, INSEP, Paris, France, ² Université Paris-Descartes, Paris, France, ³ INSERM U970, Centre de Recherche Georges Pompidou, Paris, France, ⁴ Service Hématologie, Hôpital Necker and CNRS UMR, Paris, France, ⁵ CIMS, Hôtel-Dieu, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Paris, France

Abstract

Sex is a major factor influencing best performances and world records. Here the evolution of the difference between men and women's best performances is characterized through the analysis of 82 quantifiable events since the beginning of the Olympic era. For each event in swimming, athletics, track cycling, weightlifting and speed skating the gender gap is fitted to compare male and female records. It is also studied through the best performance of the top 10 performers in each gender for swimming and athletics. A stabilization of the gender gap in world records is observed after 1983, at a mean difference of $10.0\% \pm 2.94$ between men and women for all events. The gender gap ranges from 5.5% (800-m freestyle, swimming) to 18.8% (long jump). The mean gap is 10.7% for running performances, 17.5% for jumps, 8.9% for swimming races, 7.0% for speed skating and 8.7% in cycling. The top ten performers' analysis reveals a similar gender gap trend with a stabilization in 1982 at 11.7%, despite the large growth in participation of women from eastern and western countries, that coincided with later-published evidence of state-institutionalized or individual doping. These results suggest that women will not run, jump, swim or ride as fast as men.

Key words: World records, best performances, gender difference, elite sport.

Introduction

Sex has been identified as a major determinant of athletic performance through the impact of height, weight, body fat, muscle mass, aerobic capacity or anaerobic threshold as a result of genetic and hormonal differences (Cureton et al., 1986; Maldonado-Martin et al., 2004; Perez-Gomez et al., 2008; Sparling and Cureton, 1983). Some authors have suggested that gender differences in race records may disappear (Beneke et al., 2005; Tatem et al., 2004; Whipp and Ward, 1992); other have studied physiological limits in sport with non linear models, but with limited data (Nevill and White, 2005; Nevill et al., 2007). However, men and women differences should first be studied through the complete panel of quantifiable Olympic disciplines. Over the modern Olympic era (1896-2007) the evolution of time, distance or height values of world records was shown to follow a piecewise exponential model (Berthelot et al., 2008). Further, women presently display lower record values compared to men. An asymptote for all events has been suggested, with a limit in women's

performances that remains inferior to men's. Thus, gender gaps will probably be settled when men and women reach their physiological limits. Here we compare the improvement of male and female world records and ten best performances (*ie.* the best performance of the top ten performers of each gender every year) over the modern Olympic era in order to measure the evolution of gender gaps.

Methods

The data set included 82 events from five quantifiable Olympic disciplines (International Olympic Committee, 2008; Official Fina website, 2008; USA Swimming website, 2008): athletics, swimming, speed skating, track cycling and weightlifting. The number of each Olympic event by discipline is given in Table 1. Only events strictly comparable between men and women were studied. For track events, selected races have the same distances for both (women's 100m hurdles and men's 110m hurdles have been excluded) and of field events, only jumps were included. Throws were excluded as projectile weights are different for men and women. All weight categories in weightlifting do not exactly match (8 divisions for men from 56kg to 105+kg and 7 for women from 48kg to 75+kg). Therefore weightlifting world records analysis was performed through 3 classes only: the heaviest (Heavyweight), the lightest (Flyweight), and an in-between matching category (Lightweight, 63-69kg for women and 64-70kg for men).

For all 82 Olympic events, world records progressions were compiled. Each gender gap series started with the first common chronological record for both men and women. An unbeaten record was extended until it is improved (there is not one newly established record every year); 2768 gaps were measured for world records (Figure 1).

Ten best performers database

For 60 swimming and athletics events, the best performance of the first ten performers were collected every year from three data sources (International Olympic Committee, 2008; Official Fina website, 2008; USA Swimming website, 2008) over the 1891 - 2008 period for 26 athletics events and the 1963 - 2008 period for 34 swimming events; 23864 performances were analysed (*ie.* 11932 ten

Table 1. Comparable events between male and women. Only events strictly comparable are included in the study (100m Hurdles Women, 110m Hurdles Men and throws excluded).

Track and Field	Swimming	Cycling*	Speed Skating*	Weightlifting*
High Jump	50m FS	Sprint	500 m	Fly weight (-56kg / -48kg)
Long Jump	100m FS		1000 m	Light weight (-69kg / -69kg)
Pole Volt	200m FS		1500 m	Heavy weight (+105 / +75kg)
Triple Jump	400m FS		5000 m	
	800m FS			
100 m	1500m FS			
200 m	100m Back			
400 m	200m Back			
800 m	100m Breast			
1 500 m	200m Breast			
5 000 m	100m Fly			
10 000 m	200m Fly			
4x100 m *	4x100m FS			
4x400 m *	4x100m MR			
400m hurdles	4x200m FS			
20km Walk *	200m IM			
Marathon	400m IM			

* No data for TBP

best performances gaps) from a compiled International Olympic Committee database collecting 45968 best performances (International Olympic Committee, 2008) with associated gender and citizenship.

Estimate of gender gaps

The gender gaps between world records (WR) and between ten best performances were calculated, as well as their scattering evolution and number of records beaten yearly.

For each year, the gap between the two records is calculated as follows:

for chronometric events ($WR_m < WR_w$)

$$\Delta_i = WR_{wi} - WR_{mi}$$

for non-chronometric events ($WR_m > WR_w$)

$$\Delta_i = WR_{mi} - WR_{wi}$$

Where WR_{mi} is the world record of women at year i , WR_{wi} is the world record of men at year i .

The gaps of the top ten performers were measured each year. Ten gaps were calculated; the first female performance compared to the first male performance, the second female to the second male and so forth. The yearly ten best performances gender gap TBP_i is the mean of the 10 individual gaps:

$$TBP_i = \frac{1}{10} * \sum_{j=1}^{10} \Delta_{ij}$$

Where Δ_{ij} is the gender gap for the j -th performance at year i .

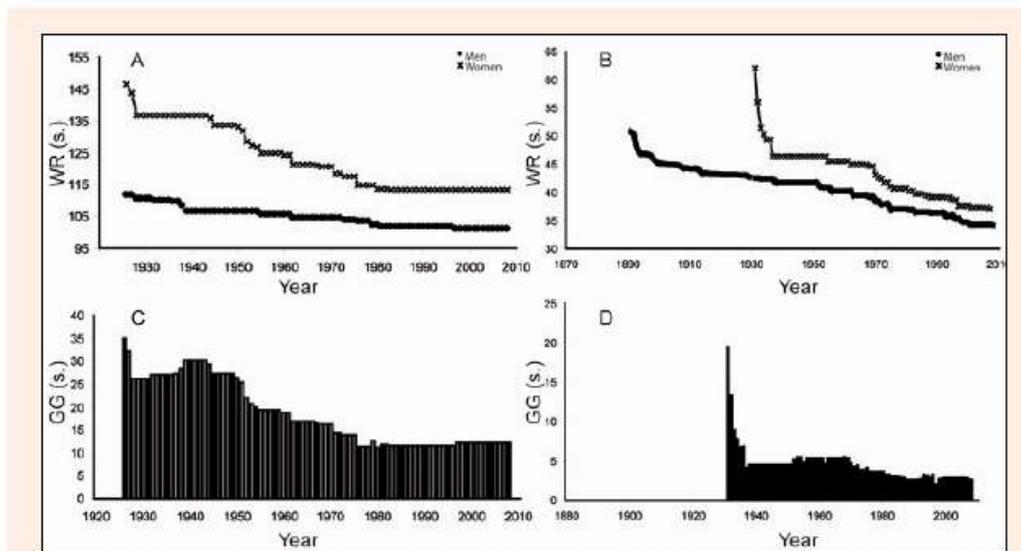


Figure 1. World Record and Gender Gap evolution over the Olympic era in A. 800m, Athletics world records B. 500 m, Speed skating, world records C. 800m, Athletics D. 500 m, Speed skating.

Change of incline

A breaking slope method was used for the gender gap (GG) curves of 66 Olympic events in swimming, athletics, speed skating and track cycling. It aimed to find the best combination of two linear regressions, which showed the largest difference between their slope – a significant decrease in gender gaps variations. For each event, a first model was performed with a minimum of eight points (eights years of records or performances) to fit the first linear regression. The second regression was fitted with the points that were left (from the ninth point to the last one). An eight year segment representing two Olympiads was chosen as the minimum time span over which a period could be considered as stable. Then, a second model was created with the first slope now including one more point, and the second slope including the points left.

All possible two part linear models were thus performed until all points were included in the first slope. For each model, coefficients of each slope, differences of slopes and global R^2 of each regression are collected. Finally, the model with the greatest R^2 and the most significant slope difference was kept. The breakpoint date was then determined by the cross point of the two linear regressions of the chosen model.

Gender gaps evolution according to time was modelled by

$$GG = \alpha + \beta t + (\alpha' + \beta' t) I_{[t \geq \tau]}$$

Where $I_{[t \geq \tau]}$ is an indicator function taking value 0 if $t < \tau$ and 1 if $t \geq \tau$.

Stated otherwise, the trends before and after the breakpoint date τ are linear, but the slope of the two lines may differ on either side of the breakpoint. Regression parameters α, β, α' and β' were estimated by maximum likelihood; the R^2 coefficient measured the global fit of the model to the data.

Analyses were conducted using SAS software 9.2 version (SAS Institute, Cary, NC, USA)

Estimation of stabilized gender gaps

After the breakpoint dates, the stabilized gender gaps $\bar{\Delta}_m$ were calculated and expressed as follows:

$$\bar{\Delta}_m = \frac{\sum_{i=j}^n \Delta_i}{\sum_{i=j}^n \frac{WR_{mi} + WR_{wi}}{2}}$$

with \bar{j} being the date of stabilization.

Variation coefficients

The standard deviation of the ten best was measured for each event in order to calculate the yearly coefficient of variation $c_v(t)$:

$$c_v(t) = \frac{\sigma_{p(t)}}{p(t)}$$

with $\overline{p(t)}$ representing the mean value of the 10 perform-

ances vector at year t and $\sigma_{p(t)}$: standard deviation of the performances vector.

Wilcoxon test

The coefficients of variation of the gender gaps for the two periods (before and after breakpoint date) were compared by a Wilcoxon signed-rank test. This non-parametric test was used since the data (performances values) could not be assumed to be normally distributed.

Historical analysis

The annual cumulative proportions were used to describe the secular evolution of world records (Guillaume et al., 2009).

Factor $a_{c,t}$ is the annual ratio of the number of world records for the country c over the total number of world records:

$$a_{c,t} = WR_{c,t} / WR$$

P is the annual cumulative proportion over the Olympic era:

$$P_{c,t_0,t} = \sum_{t_0}^t a_{c,t}$$

for the first year t_0 , year t and the country c . Factor P defines the annual cumulative world records progression rate for each country.

For the evolution analysis of factor P , the mean slope of annual cumulative proportions (S) was calculated by linear regressions over 4 periods: 1921-1940, 1951-1970, 1971-1990, 1991-2008. S was defined as:

$$S(P) = \Delta P_{c,t_0,t} / \Delta t$$

Statistical analysis was performed with the R software (R Development Core Team, 2008). One way linear regressions were used to calculate the slopes of factors G and P . Statistical significance was considered at $p < 0.01$.

World records' evolution profile

In two disciplines (athletics and swimming), a graphic representation of the number of world records obtained each year through a 4-year smoothing mean illustrated the gender profile of their evolution since the beginning of the Olympic era.

Results

Descriptive analysis: Gender gaps

The breaking slopes method shows a breakpoint date separating the events into two periods. The first one fits the fast reduction of the gender gaps, while the second one corresponds to a period of stability (after 1978, Figure 1C). Results of the Wilcoxon test show that the two periods are significantly different, with the coefficients of variation of the second period being inferior to the first one. Slope breaks results are listed in Table 2.

Table 2. Breakpoint dates; GG at stability; and Variation coefficient before breakpoint date (CV BD) and after (CV AD) for all events. * If a breakpoint date is not detectable (recently officialised women event), the given value is the last 2008 GG.

	Breakpoint date	Stable GG (%)	CV BD	CV AD	Breakpoint date	Stable GG (%)	CV BD	CV AD
Track and Field	RECORD				TBP			
High jump	1961	17.17	0.12	0.04	1967	17.89	0.08	0.08
Long jump	1988	18.76	0.13	0.01	1985	19.08	0.15	0.08
Pole Vault	-	*26.89	-	-	2002	22.48	0.16	0.06
Triple Jump	1998	16.63	0.07	0.00	1998	16.46	0.12	0.05
100M	1993	6.50	0.32	0.07	1984	9.00	0.25	0.08
200M	1991	9.19	0.15	0.10	1986	10.18	0.17	0.08
400M	1984	9.98	0.16	0.11	1979	11.26	0.16	0.09
800M	1982	10.38	0.30	0.03	1978	11.28	0.34	0.08
1 500M	1975	10.55	0.17	0.06	1977	12.25	0.12	0.08
5 000M	1989	12.85	0.12	0.04	-	*10.29	-	-
10 000M	1989	10.80	0.19	0.06	-	*11.98	-	-
4*100M	1985	13.96	0.28	0.05				
4*400m	1977	11.23	0.15	0.06				
400m Hurdles	1982	11.86	0.09	0.07	1982	11.59	0.16	0.07
20km Walk	1995	10.02	0.33	0.07				
Marathon	1976	10.60	0.29	0.30	1973	12.70	0.32	0.15
Swimming	RECORDS				TBP			
50m FS	2001	10.66	0.07	0.03	1995	13.15	0.11	0.11
100m FS	1961	10.27	0.44	0.07	1975	10.99	0.06	0.06
200m FS	1979	8.47	0.42	0.11	1977	9.48	0.17	0.09
400m FS	1980	7.36	0.46	0.14	1979	8.74	0.21	0.09
800m FS	1978	5.52	0.41	0.13	1983	6.53	0.10	0.12
1500m FS	1968	6.36	0.34	0.10	1983	8.35	0.33	0.10
100m Back	1981	9.53	0.25	0.07	1979	10.72	0.12	0.06
200m Back	1995	7.92	0.25	0.08	1979	9.60	0.17	0.07
100m Breast	1961	10.03	0.25	0.13	1986	10.88	0.08	0.08
200m Breast	1961	9.49	0.30	0.14	1986	10.00	0.10	0.08
100m Fly	1984	9.34	3.66	0.27	1979	11.02	0.17	0.07
200m Fly	1981	8.20	0.28	0.12	1975	9.73	0.15	0.09
4*100m FS	1981	10.32	0.17	0.04	1975	9.99	0.10	0.08
4*100m MR	1981	10.57	0.17	0.04	1978	9.04	0.19	0.08
4*200m FS	2002	10.60	0.05	0.05	1988	12.79	0.59	0.07
200m IM	1982	9.45	0.16	0.12	1989	10.14	0.10	0.08
400m IM	1982	7.91	0.22	0.12	1979	11.62	0.17	0.06
Speed Skating	RECORDS							
500m	1988	6.94	6.13	0.63				
1000m	1992	7.04	10.11	0.69				
1500m	1988	6.73	10.42	0.89				
5000m	1991	7.10	8.09	0.74				
Cycling	RECORDS							
Sprint	1993	8.68	1.44	0.86				
Average	1983.11	9.97	1.27	0.18	1982.00	11.68	0.18	0.08
SD	10.72	2.94	2.75	0.24	7.61	3.46	0.11	0.02

Athletics analysis

Analysis of world records in athletics shows that global stability was reached in 1983.7 (± 9.57). Gender gaps have been stable in jumping and running events since 1982.3 and 1984.8 respectively. Gender gaps decreased in the running events from 30.0% (± 6.48) in 1922 to 10.7% (± 1.85) since their stabilisation, and from 30.1% (± 8.52)

to 17.5% (± 1.11) for jumping events. For the ten best performances, the global stability date is 1983.9 (± 4.45). The ten best performances' gender gaps evolved from 25.3% (± 4.46) for races at the beginning of the Olympic era to 11.2% (± 1.25) since stabilization and from 30.0% (± 3.86) to 19.0% (± 2.57) after 1984 for jumps.

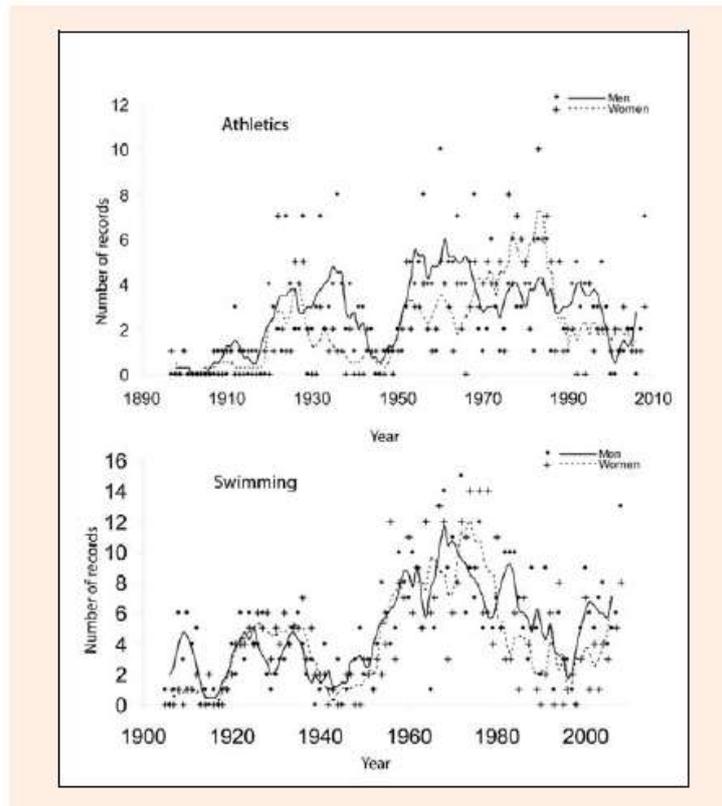


Figure 2. Number of world records per year and gender. Solid line is 4 year-smoothing mean for men’s world records and dotted line for women’s world records.

Swimming analysis

Gender gaps have been stable since 1979.9 in swimming events. In swimming, world records gender gaps evolved from 22.9 % (± 5.44) at the beginning of the century

(1916) to 8.9 % (± 1.54) since their stabilization. For the ten best performances, results show stability in 1981.5 at 10.16 % (± 1.60) while it was 13.4% (± 1.86) in 1963.

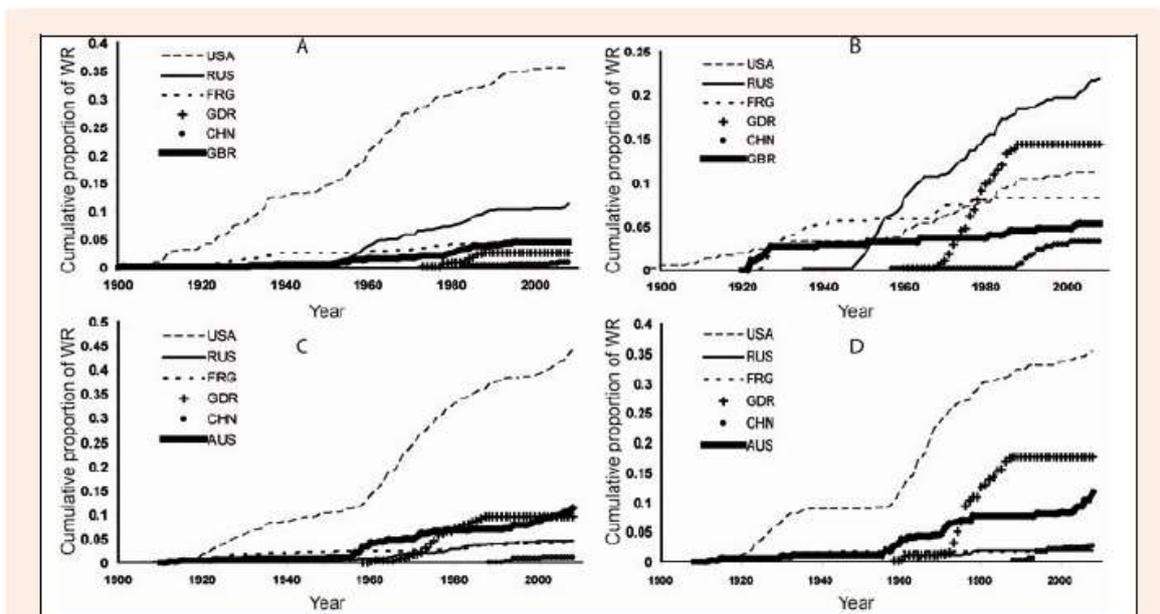


Figure 3. Annual Cumulative Proportions of world records, by major contributing country, illustrating the geographical dispersion of world records for each gender in A. Athletics Men B. Athletics Women C. Swimming Men D. Swimming Women (0,1 = 10%). USA: United States of America. RUS: USSR and Russia, FRG: Germany, Federal Republic of Germany and reunited Germany. GDR: German Democratic Republic. CHN: China. GBR: Great-Britain. AUS: Australia.

Table 3. Slope of linear regressions of annual cumulative proportions of WR for the major 6 countries.

T & F Men	1920-1939	1950-1969	1970-1989	1990-2008
USA	0.005	0.0071	0.0027	0.0013
RUS		0.0033	0.0022	0.0003
ALL	0.0011	0.0003	0.0005	0
GDR			0.0015*	-
CHN			0.0002	0.0003
GBR	0.0002	0.0005*	0.0013	0.0002
T & Women				
USA	0.0007	0.0005	0.0022	0.0006
RUS	0.0002	0.0047	0.0041	0.0018
ALL	0.0031	0.0005	0.0005	0
GDR		0.0004	0.0071	-
CHN		0.0002	0.0002	0.0009
GBR	0.0012	0.0004	0.0005*	0.0005*
Swimming Men				
USA	0.0037	0.0075	0.0063	0.0031
RUS		0.0009	0.0012	0.0005
ALL	0.0007	0.0001	0.0007	0.0003*
GDR		0.0007	0.0042	-
CHN			0	0.0005
AUS	0.0002	0.0024	0.0007*	0.0022
Swimming Women				
USA	0.0043*	0.008	0.0041	0.0015
RUS		0.0006	0.0006	0
ALL	0.0007	0	0	0.0006*
GDR		0.0008	0.0091	-
CHN			0.0001	0.0012
AUS	0.0003*	0.0022	0.0010*	0.0017*

P < 0.001 for all the results except those indicated * T & F = Track & Field

Cycling, speed skating and weightlifting

Only one event was comparable in cycling. The gender gap in the sprint has been stable since 1993 at 8.7%. In speed skating the gender gap no longer fluctuates since 1989.7 (± 2.1) at 6.95% (± 0.16).

The gender gap in weight lifting world records is at 36.8% (± 6.2) since women officially started competing in 1998. With 10 years of hindsight only, no breakpoint date has been detected yet.

Historical analysis

World records evolution (Figure 2) was altered by both world wars, with a decreasing number of records during these two periods. A similar trend is also observed at the beginning of the 1980s for swimming and of the 1990s for athletics. A major peak in swimming for both male and female appears around 1970, while such peaks occur at different dates in athletics: 1960 for men and 1983 for women.

Since the beginning of the Olympic era, the United States of America has dominated men's athletics and men and women's swimming (Figure 3). The German Democratic Republic (GDR) was the first European country to dominate women's athletics and swimming, starting after the Second World War.

The linear regression slopes for swimming and athletics are listed in Table 3. For the USA, the largest slope corresponds to the period from 1950 to 1970, except for women's athletics (1970-1989). In athletics, the men's slope is greater (0.007) than the women's (0.002). The GDR's greatest slope corresponds to the period from 1970 to 1989 and is more important for the women (0.009 for swimming and 0.007 for athletics) than for the men

(0.004 and 0.0015, respectively). The greatest slopes observed in the Chinese performances occur after 1990.

World record evolution profile and participation

The number of participants in the Olympics and number of records did not follow the same evolution (Figure 2, Figure 4). Indeed, the number of women participating has increased over the last two decades, while the frequency at which world records occur has been decreasing.

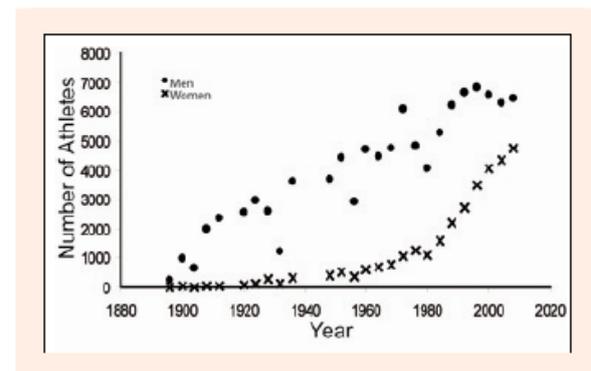


Figure 4. Participant number at the Olympic Games by gender.

Discussion

Our results show that the gender gap in Olympic sport performance has been stable since 1983. These suggest that women's performances at the high level will never match those of men. This stabilization is the expression of a significant narrowing of gaps for all events (Cheuvront et al., 2005). Indeed, even when performances still

improve, these progressions are proportional for each gender. The reduction and stabilization of the gender gaps in performance is a general pattern observed in all athletes and all disciplines (Figure 4). Stability appears through all of the parameters studied: coefficients of variation, slope coefficients, coincident breakpoint dates between world records and ten best performances. This stability is not affected by external, non physiological factors such as technology and doping advancements that could challenge it.

The yearly analysis of the number of world records shows a major, 22-year time lag in athletics between the men's and women's peaks, corresponding to the period where the fastest reduction in the gender gap occurred. After 1950, women began to benefit from improvements in training techniques that were developed from the men's training experience during the first half of the XXth century. Like men, they also benefited from a better medical and nutritional environment. The fast improvement rate of female performances' observed since then could also be explained by the increasing number of events proposed to women and by the investment of East European nations in women's sports (Geipel, 2001; Seppelt and Schück, 1999). In fact, the last period of acceleration in these improvements prior to the breakpoint date of the early 1980s coincides with published evidence of institutionalized doping. According to former GDR athletes, many of them were being administered drugs to enhance muscle strength, aggressiveness and performance since 1966 (Franke and Beredonk, 1997; Geipel, 2001). However the trend linking performance-enhancing drugs and women in particular is still unknown. While it should be considered that the technological advancements leading to increased efficiency of some androgenic drugs on the physiology of female athletes could have played a role in some countries' investment in women's sport programs, the inverse could also be true. It may have been the idea of a potential progression margin in female sport as analyzed just after

the Second World War, associated with the discovery of ergogenic and androgenic steroids that could have induced the interest and investment in the development of doping techniques to be applied to female athletes. Women doping during the 1970s could have sped up female progression and accelerated the gender gap reduction.

During the Cold War, many countries were fighting for the largest political influence. One manner in which to obtain international prestige was realized through athletic performance (Guillaume et al, 2009). While women's sports were not as developed as men's, east European countries, such as GDR, invested in female performance programs (Staatsplan 14.25) (Franke and Beredonk, 1997; Seppelt and Schück, 1999). With the use of androgenic steroids, beating records and winning medals were probably seen as an easier challenge for women than men. Such a strategy of optimized returns may have translated into an early and intense investment of communist countries in women's sport (Geipel, 2001; Seppelt and Schück, 1999), later followed by other countries or individuals (Guillaume et al., 2009). In fact, the geographical repartition analysis of world records evolution (Figure 5) shows a wider distribution of nations for women's athletics than for men's, with a women's domination by Russia after the Second World War, while men's competitions show a larger dominance by USA athletes.

Unlike athletics, a time lag is not observed in swimming, where women's competitions chronologically started much earlier. While men's first records were obtained in 1927 on average for all swimming races, women's world records were first set in 1932. Only 5 years separate the beginning of swimming competitions for each gender while 28 years separated the first men records (1914 on average for all events) from first women records (1942) in athletics.

In women's weightlifting, we did not detect a

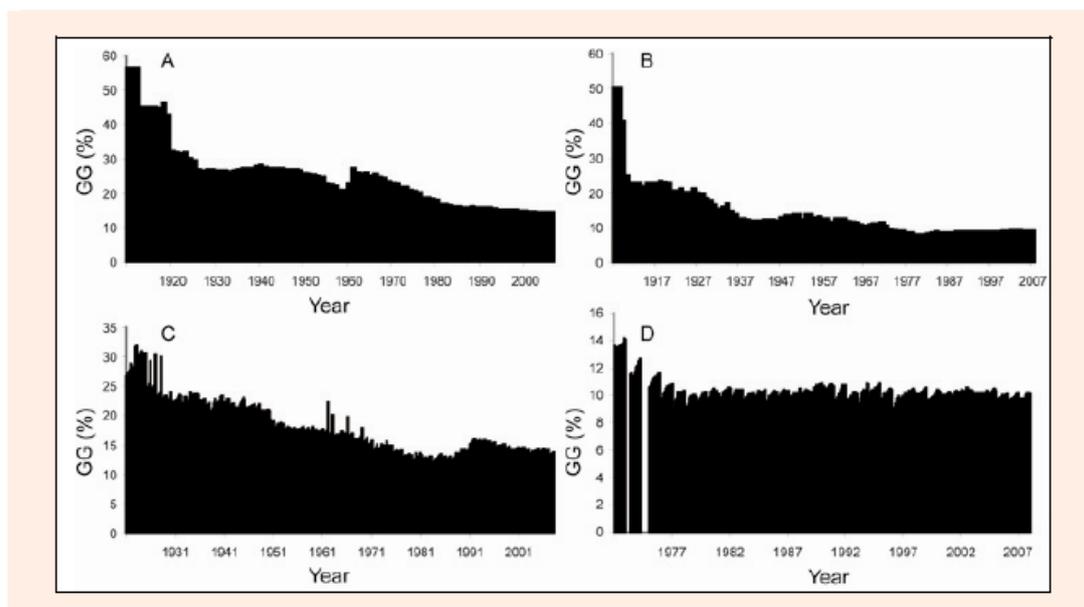


Figure 5. Global GG evolution in percentage for A. Track and field WR. B. Swimming WR C. Track and field TBP D. Swimming TBP (missing data in 1964 and 1974). The peak after 1960 is due to the introduction of female marathon WR.

breaking point due to the recent introduction of women into this sport. Performances and gender gap have nevertheless both reached a plateau. Besides, 50.4% of world records in women weightlifting are set by Chinese athletes (Guillaume et al., 2009).

A recent and slight increase in gender gaps can be observed for 12 out of 38 events. This is not specific to any particular discipline, and corresponds to the enhancement of men's performances with a simultaneous regression or stabilization of women results. Also a small discrepancy is shown between the predicted year where women and men will reach world records asymptotic limits (2028 vs 2042 respectively) (Berthelot et al., 2008). Taking into consideration that men may continue to progress in a few events, gender gaps may slightly increase before reaching full stability (Seiler et al., 2007; Holden, 2004).

Random and unannounced drug testing was introduced in athletics in 1989. The declining use of banned performance-enhancing drugs may have also contributed to the most recent and slight increase of gender gaps. Men still improve, though at a lower rhythm, while women stopped their progression. Men are more likely to adopt behaviours at increased risk, whereas a higher percentage of women engage in preventive actions linked to health and longevity (Courtenay, 2000; Mercer et al., 2007). Another explanation could be the higher interest of media in male sport, and the greater rewards offered.

This major investment of East European countries in women's sport can be assessed by the annual cumulative proportions slope coefficient. Soviet Union has a slope twice as high as the USA's for women's world records during the 1970s and the 1980s. East Germany's progression slopes are always greater for women than for men and similar to the Russian women's progression for athletics. The percentage of women's world records obtained by GDR athletes is about 33.1% between 1970 and 1989 and 30.7% for the Soviet Union, compared to 11.2% for the United States of America and 3.2% for West Germany. This massive representation of two countries (Riordan, 1996; Seppelt and Schück, 1999), in which the incidence of doping was proven or highly suspected, could have accelerated the reduction of the gender gaps (Franke and Beredonk, 1997; Geipel, 2001). However, it should be clear that these are not the only nations in which female athletes have resorted to illegal performance enhancing procedures.

The connection between women's participation in international events and performance may not be quite relevant. On average, the mean date of the first men's world records was 1925 (± 21), while mean date for women first world record was 1955 (± 36). Despite a 30 year time lag average between men and women mean debuts, women rapidly progressed before the gender gaps stabilized. The number of participants in the Olympic Games is a measurable indicator of the involvement of elite athletes globally. Quotas and incentives of organizing authorities encourage the participation of women. While only 37 women attended the 1908 Olympic Games, in 2008 they represented 42.4% of all registered athletes (4746 women and 6450 men) at the Olympic Games in

Beijing (International Olympic Committee, 2008). The number of competing women is still increasing while the number of men has reached a maximum at the 1988 Olympic Games in Seoul (Figure 4). After taking into account the evolution of world records previously studied in this analysis, there is no measurable effect of the increasing number of women participating in the Olympic Games on world records, ten best performances and gender gaps evolution. The major increase in women's participation takes place in the 1980s, while the world record peak already occurred (Berthelot et al., 2008), and the gender gaps stability period has begun.

A breakpoint date could not be detected in 3 events: pole vault (a female event not contested from 1930s to the 1960s), 5000m and 10000m due to their recent introduction into the Olympic program. Women's weight lifting world records only began in 1998, when most of men's world records had already reached their maximal values. This explains why gender gaps are still narrowing in this discipline (though at a slower pace in the last few years). The wide discrepancy between the magnitude of gender gaps in weightlifting and jumping events and the four other disciplines studied here could be explained by the different physiological mechanisms involved to mobilize energy. The predominantly explosive type of effort required in weightlifting and jumping (Maldonado-Martin, 2004; Wilmore and Costill, 2004) could explain the greater disadvantage that women have to face against men, compared to other disciplines.

Conclusion

It appears that gender gaps in sport performance have been stable for a long time: women may never catch up with men. This stabilization of 26 years is the expression of a significant drop in the variation of these gaps' magnitude. After a significant narrowing of gender gaps, women and men now evolve in parallel, in the same direction. The late implication of women in competition, their increasing participation, as well as the individual doping behaviours and state programs for performance enhancement may all have had a historical role but no longer reduce the gap. Without any technological improvement specifically dedicated to one gender or the other, performances will probably evolve in a similar manner for both men and women. The gap may be set.

Acknowledgments

We thank all INSEP teams for their full support, Caroline Carpentier, Ghislaine Quintillan, Elisabeth Rosnet and Nadine Dubois for fruitful discussions, and the Centre National de Développement du Sport for financial contribution.

References

- Beneke, R., Leithäuser, R.M. and Doppelmayr, M. (2005) Women will do it in the long run. *British Journal of Sports Medicine* 39, 410.
- Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Escolano, S., El Helou, N., Jouven, X., Hermine, O. and Toussaint, J.F. (2008) The Citius End: World Records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE* 3(2). Available from URL: <http://www.plosone.org>
- Cheuvront, S.N., Carter, R., Deruisseau, K.C. and Moffatt, R.J. (2005)

- Running performance differences between men and women: an update. *Sports Medicine* 35, 1017-1024.
- Courtenay, W.H. (2000) Constructions of masculinity and their influence on men's well-being: a theory of gender and health. *Social Science and Medicine* 50, 1385-1401.
- Cureton, K., Bishop, P., Hutchinson, P., Newland, H., Vickery, S. and Zwiren, L. (1986) Sex difference in maximal oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 54, 656-660.
- Franke, W.W. and Berendonk, B. (1997) Hormonal doping and androgenisation of athletes: a secret program of the German Democratic Republic government. *Clinical Chemistry* 43, 1262-1279.
- Geipel, I. (2001) *Verlorene Spiele: Journal eines Dopingprozesses*. Transit Verlag, Berlin.
- Guillaume, M., El Helou, N., Nassif, H., Berthelot, G., Len, S., et al. (2009) Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism. *PLoS ONE* 4(10). Available from URL: <http://www.plosone.org>
- Holden, C. (2004) An everlasting gender gap? *Science* 305, 639-640.
- International Olympic Committee. (2008) Official website of the Olympic movement. Lausanne: International Olympic Committee. [cited 2008 Jan 1]. Available from URL: <http://www.olympic.org>
- Maldonado-Martin, S., Mujika, I. and Padilla, S. (2004) Physiological variables to use in the gender comparison in highly trained runners. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 44, 8-14.
- Mercer, T., Winter, E., Bromle, P., Richard Davison, R.C. and Jones, A. (2007) *Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines: Exercise and Clinical Testing*, 1st edition. Abingdon, Oxon: Routledge.
- Nevill, A.M. and Whyte, G.P. (2005) Are there limits to running World Records? *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37, 1785-1788.
- Nevill, A.M., Whyte, G.P., Holder and R.L. and Peyrebrune, M. (2007) Are there limits to swimming world records? *International Journal of Sports Medicine* 28, 1012-1017.
- Official FINA website. (2008) Lausanne: International Federation of Swimming [cited 2008 Jan 1]. Available from: <http://www.fina.org>
- Perez-Gomez, J., Rodriguez, G.V. and Ara, I. (2008) Role of muscle mass on sprint performance: gender differences? *European Journal of Applied Physiology* 102, 685-694.
- R Development Core Team. (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, [cited 2008 Jan 1]. Available from URL: <http://www.R-project.org>
- Riordan, J. (1996) Rewriting soviet sports history. *Journal of Sports History* 20, 247-258.
- Seiler, S., De Koning, J.J. and Foster, C. (2007) The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952-2006. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39, 534-540.
- Seppelt, H.J. and Schück, H. (1999) *Accusation: Children doping. The GDR-Sports legacy* (Anklage: Kindersdoping. Das Erbe des DDR-Sports). Berlin : Tenea Verlag.
- Sparling, P.B. and Cureton, K.J. (1983) Biological determinants of the sex difference in 12-min run performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 15, 218-223.
- Tatem, A.J., Guerra, C.A., Atkinson, P.M. and Hat, S.I. (2004) Momentous sprint at the 2156 Olympics? *Nature* 431, 525.
- USA Swimming web site. (2008) Colorado Springs (CO): USA Swimming [cited 2008 Jan 1]. Available from URL: <http://www.usaswimming.org>
- Whipp, B.J. and Ward, S. (1992) Will women soon outrun men? *Nature* 355, 5.
- Wilmore, J. and Costill, L.D. (2004) *Physiology of sport and exercise*. 3rd edition. Human Kinetics, Champaign (IL).

Key points

- Sex is a major factor influencing best performances and world records.
- A stabilization of the gender gap in world records is observed after 1983, at a mean difference of $10.0\% \pm 2.94$ between men and women for all events.
- The gender gap ranges from 5.5% (800-m freestyle, swimming) to 36.8% (weight lifting).
- The top ten performers' analysis reveals a similar gender gap trend with a stabilization in 1982 at 11.7%.
- Results suggest that women will not run, jump, swim or ride as fast as men.

AUTHORS BIOGRAPHY



Valérie THIBAUT

Employment

IRMES, Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, 11 Avenue du Tremblay 75012 - Paris - FRANCE

Research interest

Sport pathophysiology and epidemiology

E-mail: Valerie.thibault@insep.fr

Marion GUILLAUME

Employment

IRMES, Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, 11 Avenue du Tremblay 75012 - Paris - FRANCE

Research interest

Sport pathophysiology and epidemiology

E-mail: Marion.Guillaume@insep.fr

Geoffroy BERTHELOT

Employment

?

Research interest

Sport pathophysiology and epidemiology

E-mail: Geoffroy.Berthelot@insep.fr

Nour EL HELOU

Employment

IRMES, Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, 11 Avenue du Tremblay 75012 - Paris - FRANCE

Research interest

Sport pathophysiology and epidemiology

E-mail: Nour.Elhelou@insep.fr

Karine SCHAAL

Employment

IRMES, Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, 11 Avenue du Tremblay 75012 - Paris - FRANCE

E-mail: Karine.Schaal@insep.fr

Laurent QUINQUIS

Employment

IRMES, Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, 11 Avenue du Tremblay 75012 - Paris - FRANCE

Research interest

Sport pathophysiology and epidemiology

E-mail: irmes@insep.fr

Annexe 4 :

Article original et intégral - Technology & swimming: 3 steps beyond physiology.

Référence: Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, El Helou N, et al. Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. Materials Today. 2010b ;13(11): 46-51.

Technology & swimming: 3 steps beyond physiology

We focus here on the impact of material science in swimming by measuring the impact of the three successive generations of swimsuits on human performance and estimate the upcoming performance drop consecutive to the decision of the FINA to suspend their use. We investigate the recent evolutions of the best performers over the 1990 – 2009 period and demonstrate that three bursts of performances occurred in 2000, 2008 and 2009. The overall observed gains of these bursts exceed 2.0% for both sexes. The drop in performance that may result from this rule change may return to similar levels as seen in 1999.

Geoffroy Berthelot^{a*}, Stéphane Len^a, Philippe Hellard^a, Muriel Tafflet^{a,b}, Nour El Helou^{a,c}, Sylvie Escolano^{a,b}, Marion Guillaume^a, Karine Schaal^a, Hala Nassif^{a,c}, François Denis Desgorces^{a,c}, Jean-François Toussaint^{a,c,d}

^a IRMES, Insep, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France.

^b INSERM, U970, 56 rue Leblanc, 75015 Paris, France.

^c Paris Descartes University, Faculty of sciences, Paris, France

^d Centre d'Investigation en Médecine du Sport (CIMS), Hôtel-Dieu, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Paris, France

*E-mail: geoffroy.berthelot@insep.fr

The science of engineering materials and the development of materials science during human history have strongly evolved over the past two centuries^{1,2}. Other new technological fields such as particle physics, computer science, nanoscience also flourished³, all leading to innovations that impacted sport. Polymers and metal alloys such as carbon fibres are exemplars of materials now widely used in various disciplines⁴. In 2008, polyurethane made its first appearance in swimming with the use of a new swimsuit generation. The result was a sudden improvement of performances, allowing athletes to go beyond physiological limits that have been nearly reached^{5,6}. This study aimed to quantify the gain provided by the three generations of

swimsuits introduced in 1999, 2008, 2009 and to estimate the upcoming performance drop in 2010. Using a recently published methodology⁷, we analyzed the single best result each year for the world's top ten swimmers from 1990 to 2009 in order to assess the sudden progression trends and quantify the total performance gain.

Materials and methods

We collected the best performance of the world's top ten swimmers every year in 34 swimming events from 1963 to 2009⁸⁻¹⁰. A total of 6790 individual performances were selected from the data spanning the 1990 – 2009 period as they present a complete measure each year.

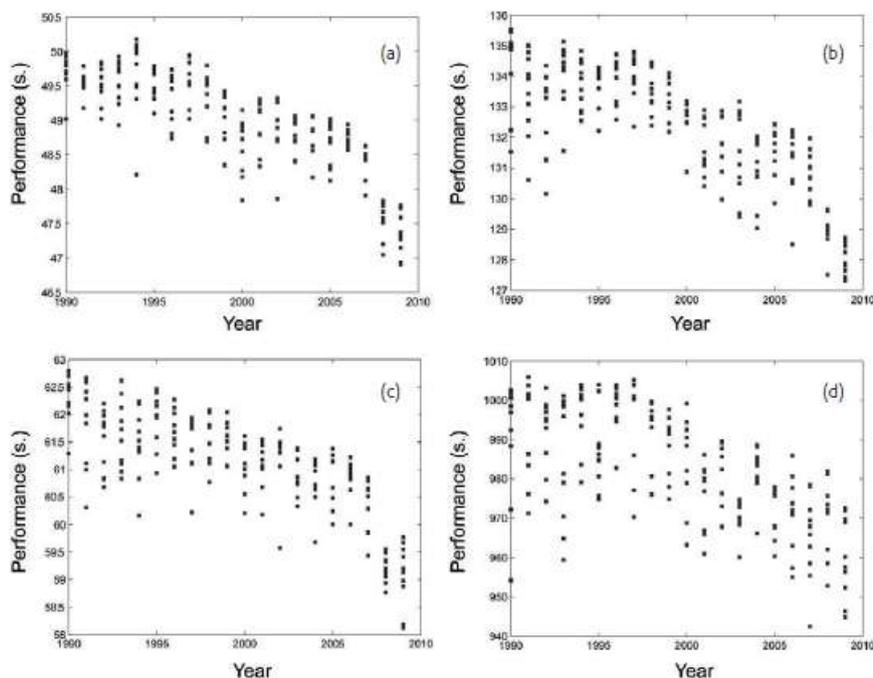


Fig. 1 Four swimming events. (a) Men 200m Breast (b) Men 50m Freestyle (c) Women 100m Back (d) Women 1500m Freestyle (Swimming).

The mean time and standard deviation of the 10 best performances were computed for each year in all events (Fig. 1).

Anova test

An ANOVA test was conducted to estimate the variance of the mean of the 10 best swimmers. This test was intended to study the yearly evolution of performances and to identify any significant sudden development of performances. The test was performed each year between the means from 1990 to 2009 for all events. The number of significant values ($p < 0.05$) was then summed each year for both sexes (Fig. 2).

Performance gains

The relative improvement or "gain" percentage between the mean m of the 10 best from the year t and $t+1$ was defined as:

$$g_t = \left(\frac{m_{t-1} - m_t}{m_{t-1}} \right) \times 100$$

and was computed between all years of all events from 1990 to 2009. To study the overall impact of the three generations of swimsuits in their year of introduction and use, gains obtained in 2000, 2008 and 2009 were summed in one measure by year for all events (overall summed gains) and for each event (summed gains).

The "negative gains" correspond to a performance drop of the mean of the 10 best between the year t and $t-1$.

We analyzed whether swim distance and styles were predictors of summed gain with a linear model (distance and styles separately

first and together second). The analysis was performed by gender. Distributions were assumed to be normal. The linear model was performed using MATLAB statistical toolbox.

Predicted performance drop

The prediction of performances drop l_t corresponding to the present ban can be estimated using the relative difference between the mean of top performances in 2009 and the modelling of the previously developed model for the 10 best performances⁷. The model is adjusted to the performances in each event from 1963 to 1999 and extrapolated in 2010. Thus the predicted values are estimated from the physiological period, before the introduction of the swimsuits:

$$l_{2010} = \left(\frac{m'_{2010} - m_{2009}}{m_{2009}} \right) \times 100$$

Where m'_{2010} is the value estimated by the model of the 10 best mean in 2010, m_{2009} is the mean value of the 10 best in 2009.

Results

Anova test

Three peaks of variations are measured in 2000, 2008 and 2009 between the means corresponding to the year of introduction of each swimsuit. The first peak (2000) has a higher number of significant variations recorded for women vs. men (13 vs. 9). The second peak (2008) presents the highest number of variations, with an equal

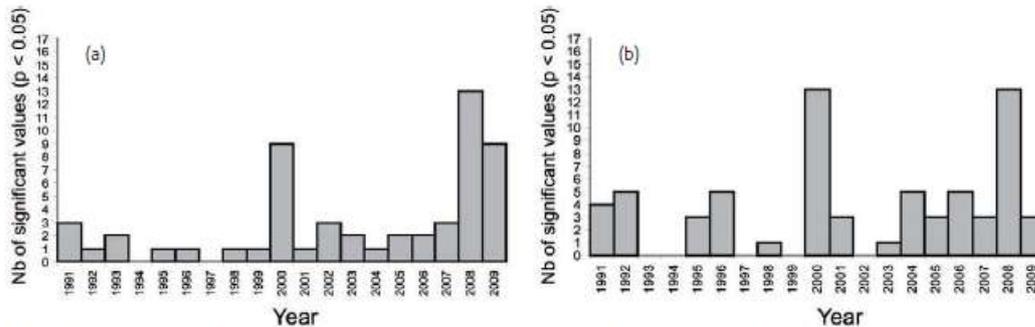


Fig. 2 Number of significant values. (a) for men (b) for women. The number of significant values ($p < 0.05$) of the ANOVA test are plotted by year. Three peaks are visible for men (2000, 2008 and 2009), while only two peaks are visible for women (2000, 2008).

repartition of significant variations between men and women (13). The third peak (2009) shows a high number of variations for men (9) and few variations for women (3).

Performance gains

The gains are given for each event during the year of introduction of each new swimsuit generation (Table 1, Fig. 3). The mean values of gains by year are: $0.74\% \pm 0.26\%$ (2000); $1.16\% \pm 0.48\%$ (2008); $0.68\% \pm 0.55\%$ (2009) for men’s events and $1.00\% \pm 0.37\%$ (2000); $0.97\% \pm 0.57\%$ (2008); $0.27\% \pm 0.70\%$ (2009) for women’s events. The cumulative mean values for the three years are: $2.58\% \pm 1.29\%$ for men and $2.24\% \pm 1.64\%$.

Overall summed gains of each events for the three specifics periods are: 12.66% (men, 2001), 19.71% (men, 2008), 11.48% (men, 2009) and 17.06% (women, 2001), 16.50% (women, 2008), 4.59% (women, 2009).

The number of negatives gains are: 0 (2000); 1 (2008); 4 (2009) for men and 0 (2000); 1 (2008); 3 (2009) for women. The nine events concerned are: 800m freestyle men in 2008, 200m fly men (2009), 400m medley men (2009), 400m freestyle men in 2009, 1500m freestyle men (2009), 1500m freestyle women (2008), 200m fly women (2009), 400m medley women (2009) and the 4x100m medley relay women (2009). Gains are also given by gender and distances (Table 1).

The linear model reveals that a relation exists between summed gains and distance ($p=0.0048$ for men and $p=0.0144$ for women). Swimming styles show no relations with gains ($p=0.6245$ for men and $p=0.0985$ for women).

A sensitivity analysis was then performed without the 1500 meter event and show that the distance effect is less significant in women events ($p = 0.08$).

Predicted performance drop

The calculated difference with the 1999 asymptote provides a potential drop of $3.65\% \pm 0.78$ for all 34 events. The potential drop for men is $3.83\% \pm 0.84$; and for women: $3.47\% \pm 0.70$ (Fig. 4, Table 2).

Discussion

The evolution of numerous research fields and the development of technology in the recent era essentially benefited industrialized countries¹¹. Technological improvement also helped increase the internationalization of sports meetings, enabling increased competition between nations, and increasing the importance and meaning of sport in society¹². Today, material science has become a major determinant of victory^{13,14}. Here we propose an analysis of the most recent technological enhancements in swimming, i.e. swimsuits, based on the measurement of swimmers’ best performances. The analysis of this Olympic discipline was a convenient starting point for the analysis of

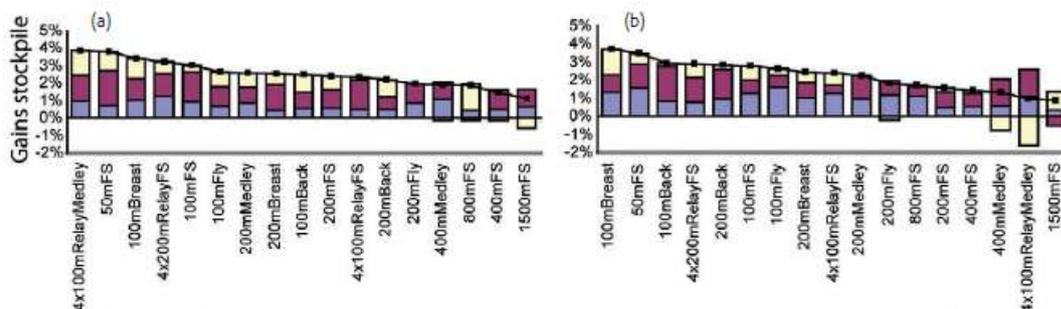


Fig. 3 Gains stockpile. (a) for men (b) for women. The obtained gains for the three swimsuits (1GS blue, 2GS dark red, 3GS light yellow) are stockpiled and sorted by summed gains. The sum of the gain is given for each year (black points and line).

Table 1 Table of gains. Gains are given for each event and each swimsuit in descending order for men and women.

Men				
Event	2000 (1GS)	2008 (2GS)	2009 (3GS)	sum
4x100m relay medley	0.99%	1.48%	1.38%	3.86%
50m freestyle	0.74%	2.02%	1.05%	3.81%
100m breast	1.01%	1.25%	1.16%	3.43%
4x200m relay freestyle	1.30%	1.25%	0.69%	3.24%
100m freestyle	0.93%	1.72%	0.38%	3.02%
100m fly	0.70%	1.12%	0.84%	2.65%
200m medley	0.90%	0.85%	0.87%	2.62%
200m breast	0.44%	1.46%	0.67%	2.57%
100m back	0.56%	0.91%	1.03%	2.51%
200m freestyle	0.60%	1.03%	0.77%	2.39%
4x100m relay freestyle	0.48%	1.73%	0.16%	2.37%
400m freestyle	0.51%	1.14%	0.71%	2.35%
200m back	0.48%	0.74%	0.98%	2.19%
200m fly	0.88%	1.09%	-0.01%	1.95%
400m medley	1.06%	0.99%	-0.14%	1.91%
800m freestyle	0.45%	-0.12%	1.52%	1.85%
1500m freestyle	0.64%	1.04%	-0.57%	1.11%
Women				
Event	2000 (1GS)	2008 (2GS)	2009 (3GS)	sum
100m breast	1.32%	0.97%	1.44%	3.74%
50m freestyle	1.57%	1.35%	0.56%	3.48%
100m back	0.83%	1.93%	0.18%	2.95%
4x200m relay freestyle	0.78%	1.37%	0.73%	2.88%
200m back	1.00%	1.61%	0.25%	2.85%
100m freestyle	1.28%	0.71%	0.80%	2.79%
100m fly	1.63%	0.63%	0.39%	2.65%
200m breast	1.05%	0.80%	0.60%	2.45%
4x100m relay freestyle	1.26%	0.46%	0.68%	2.40%
200m medley	0.97%	1.31%	0.01%	2.28%
200m fly	1.19%	0.79%	-0.18%	1.80%
800m freestyle	1.12%	0.56%	0.06%	1.74%
200m freestyle	0.49%	0.84%	0.24%	1.56%
400m freestyle	0.53%	0.73%	0.18%	1.44%
400m medley	0.59%	1.49%	-0.77%	1.30%
4x100m relay medley	1.10%	1.48%	-1.61%	0.97%
1500m freestyle	0.35%	-0.51%	1.03%	0.87%

the impact of major technological innovations on human performances; the highly controlled conditions of swimming competitions facilitated the measure of this impact.

Swimming speed is limited by the resistive forces of water, also known as drag. They include skin friction, wave, and pressure forces¹⁵⁻¹⁸,

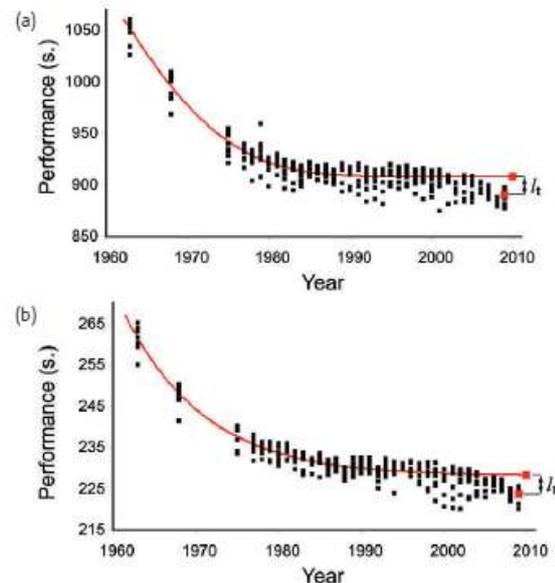


Fig. 4 Predicted Performance drop in (a) 1500m freestyle men (b) 400m freestyle men. The model (red line) is adjusted to the performances (black squares) from 1963 to 1999 and extrapolated in 2010. The estimated performance drop is 2.12% for the 1500m and 2.10% for the 400m.

the most relevant force being pressure resistance that generates turbulent flow along the swimmer's body^{14,15}. Several studies previously showed that using a swimsuit or wetsuit during effort gave its user an advantage by reducing drag resistance to water flow¹⁹⁻²³. The first generation swimsuit (1GS) was officially authorized by the FINA in October, 8th 1999⁸. The second generation swimsuit (2GS) was introduced in February, 13th 2008. The third generation swimsuit (3GS) mostly used in 2009 was a derivative of the previous version with an enhancement of the preceding features. The very high number of new World Records (WR) set in a very short time span created controversy as it followed the introduction of the last two generations. FINA decided to suspend the use of swimsuits on January, 1st 2010. On the other hand, it authorized the use of the new angled starting blocks.

According to the analysis of the 10 best performers' swimming times between 1990 and 2009 (Results), three bursts of rapid evolution in a number of swimming events stand out. The evolution of performances was expected to be a smooth progression, as the discipline was part of the first Olympic Games of 1896 along with track and field. To our knowledge, there was no other new ground breaking technique introduced during the studied era, strongly suggesting that each of these bursts corresponds to the introduction of each new suit generation in 2000, 2008 and 2009 respectively.

A higher number of women events were affected by the 1GS than men events (Fig. 2, 4). Furthermore the peak of gains for women occurred in 2000 (Fig. 2). This suggests that the compression of women's body parts (such as the breast) by the swimsuit may have been the key factor reducing drag resistance as early as 2000.

Table 2 Performances drop per event. The performance drop I_{2010} (%) is estimated for each swimming event. The drop is more important on short distances. The given values may correspond to the average expected performance drop of the 10 best swimmers in each event if the FINA decide to draw back all technological enhancements provided since 2000 (including jammers, bodyskins, ...).

Event	2010 pred. value	I_{2010} (%)
4x100m medley relay men	220.58	5.14
50m freestyle men	22.30	4.85
100m back men	54.94	4.60
4x100m freestyle men	199.92	4.49
100m breast women	68.81	4.45
4x100m freestyle relay women	224.83	4.40
50m freestyle women	25.22	4.35
200m medley men	121.34	4.32
100m back women	61.59	4.22
4x200m freestyle relay men	441.68	4.17
100m breast men	61.38	4.15
100m freestyle men	49.29	4.02
200m breast men	133.02	3.87
100m fly men	52.64	3.87
100m freestyle women	55.12	3.84
200m back men	118.71	3.80
100m fly women	59.45	3.73
200m fly men	118.01	3.72
4x200m freestyle relay women	484.84	3.70
200m back women	131.52	3.64
800m freestyle men	480.16	3.61
200m breast women	147.52	3.56
200m freestyle women	119.59	3.42
200m freestyle men	108.12	3.35
200m medley women	134.67	3.33
200m fly women	130.54	3.27
1500m freestyle women	990.28	3.14
400m medley men	257.37	2.96
400m freestyle women	250.10	2.88
4x100 medley relay women	248.54	2.54
400m medley women	282.22	2.35
800m freestyle women	511.98	2.15
1500m freestyle men	908.18	2.12
400m freestyle men	228.36	2.10

Body shape is one of the factors altering drag¹⁵. For women, this reshaping of the body imparted by the swimsuits may have been the predominant factor, in the technological advancements made since 1999, leading to improved performances.

The introduction of the 2GS in 2008 brought polyurethane to the realm of high level swimming. With an innovative seamless technology, this suit was made of polyurethane woven fabric with a texture based on shark scales³, resulting in a large reduction of skin friction^{3,14,19,24,25}. The 2GS provided an increased number of gains in men and women events (Fig. 2, 3). Its mean impact was 1.2% ±0.5% for men's events and 1.0% ±0.6% for women's events, and had a large effect on all distances and styles (Fig. 3), except on the women's 1500m freestyle and the men's 800m freestyle.

On May 19th 2009, FINA issued a list of 202 swimsuits approved for competition. Some full polyurethane swimsuits, the 3GS, were authorized until January 2010. However the impact of the 3GS on the 10 best performers is less homogeneous than the 2GS. Women showed a lower performance progression (Fig. 2, Fig. 3), while men experienced improvement.

The impact of the three technological leaps due to the introduction of each swimsuit was measured in all events on the chosen years that presented significant variations: 2000, 2008 and 2009. We did not take into account the learning curve following the introduction of these new technologies. Thus, the given technological advances are measured by "default" and may exceed the 2.6% (men) and 2.2% (women) measured here if we consider the entire period 1990 - 2009. Furthermore, the proportion of the swimmers who competed without the swimsuits was not known. This proportion tends to be small but might constitute a bias in our analysis.

The three measured impacts resulted in a larger improvement on short than long distances for both sexes ($p < 0.05$). It suggests the gain provided by the swimsuits may become marginal in long races. The resistance of polyurethane to tension and stretch might be limited on long distances, such as the 1500m freestyle (Fig. 3). Another point is that the number of turns increases with the distance and turns generate hydrodynamic turbulences. It is possible that the swimsuit was not designed to improve speed during tumble turns. The relative improvement may therefore be reduced as distance increases.

Compiling the following year of introduction of the three swimsuits, the average gain in performance improvement ranged from 1.11% to 3.86% for men and from 0.87% to 3.74% for women. Such considerable bursts of performance improvements in 12 months were not observed in any other Olympic discipline in the 1990 - 2009 period. However, similar improvements were observed at the introduction of new Olympic disciplines during the 1896 - 1914 period⁵, which may be considered as the athletes' learning curve. In cycling, similar bursts were observed when parallelogram systems (1930's), duralumin or carbon fiber cycles (1980's) were introduced²⁶. These bursts are now attributed to technological improvement rather than a learning curve or a physiological development.

The estimated potential drop on the 1990 - 2009 period of 3.7% ±0.8 for the year 2010 was based on the conditions prevailing from 1963 to 1999 (Fig. 4). This value was obtained by modeling the

evolution of the 10 best performances from this period⁷. The model was based on a Gompertz function and did not admit any brutal evolution. As the effect induced by the introduction of the swimsuits presented such a profile, we decided to model only the evolution of performances from 1963 to 1999, which follows a more typical physiological curve.

Since 2000, the three successive generations of swimsuits provided high gains along with new world records. At each competition, the media, the audience, the coaches and the athletes were expecting a new world record. Today, with the new FINA regulations, new records will be much more difficult to establish and raises some questions as to how the performance drop might affect the athletes psychologically. However, the estimated potential drops (Table 2) do not take into account the introduction of the new angled starting blocks or the technological innovations that may appear in the new swimsuits. In fact, this computed estimation corresponds to a return in traditional swim briefs, before the introduction of more elaborated swimsuits in the 2000 period. Since the ban of polyurethane swimsuits in 2010, the athletes compete in bodyskins, kneeskins or jammers that still provide a gain as compared to swim briefs. Along with the introduction of the new angled starting blocks, the predicted performance loss may be overestimated. The swimmers may therefore be expected to return to the 1999 – 2007 values. We can make the assumption that the new starting blocks may only increase the initial speed of the swimmers for the three styles in which they are used. The effect may fade with distance, resulting in little impact on performances over long distances. However the use of this new technology and any future technological innovations -whose implementation might be permitted by the FINA- may reduce the expected performance drop after the ban of these three generations of swimsuits in 2010.

The enhancement of performances brought about by technological advances was previously described by Robert Fogel as a "Techno-

physiological evolution"²⁷. Swimsuits illustrate this process. The cost of one swimsuit is about \$400 for one race. With the removal of high tech swimsuits from the sport, the financial investment of each team in each event will likely decrease. The trend observed between 2000 and 2009 could be used to demonstrate the close relationship between funds, technology and performance in this sport.

Conclusion

To our knowledge, no previous study has been published with a precise and comparable quantification of the performance gain provided by the three swimsuit generations. These resulted in bursts of performance including new world records as soon as these technologies were introduced. The present analysis demonstrates the fact that technology has become a major factor increasing human sports performance. It may be our best hope to perform beyond our physiological limits^{5,6} while maintaining audience interest. However, the technological enhancement of performance may become limited by the financial costs that are needed to develop and maintain such technology. This questions the ability of sports official authorities to subsidize innovations in a moving economical context. Now that FINA has prohibited these swimsuits, we expect a return to the previous thresholds in 2010, that may be set between the level of the 1999 and 2007 asymptotes, except for the appearance of new technology on authorized jammers and kneeskins swimsuits or around the pools. 

Acknowledgments

We acknowledge the Centre National de Développement du Sport and the Ministry of Health and Sport for financial contribution. We thank Claude Fauquet for essential discussion and the Fédération Française de Natation for its close collaboration.

REFERENCES

- Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers – 7th ed.*, Pearson Education, Inc., (2009), pp1-17.
- Ashby, M. F., *Materials selection in mechanical design – 3rd ed.*, Elsevier, (2005), pp 1-9
- Bhushan, B., *Phil Trans R Soc A* (2009) **367**, 1445.
- Brown, R. P., *Polymers in Sport and Leisure*, Rapra technology Ltd., (2001).
- Berthelot, G., et al., *PLoS ONE* (2008) **3** (2), doi:10.1371/journal.pone.0001552.
- Desgorces, F. -D., et al., *PLoS ONE* (2008) **3** (11), doi:10.1371/journal.pone.0003653.
- Berthelot, G., et al., *PLoS ONE* (2010) **5** (1), doi:10.1371/journal.pone.0008800.
- FINA, www.fina.org.
- Swimnews, www.swimnews.com.
- USA Swimming, www.usaswimming.org.
- Brewer, E., et al., *The Case for Technology in Developing Regions*, (2005), IEEE Computer Society, pp 25-38.
- Guillaume, M., et al., *PLoS ONE* (2009) **4** (10), doi:10.1371/journal.pone.0007573.
- Miodownik, M., *Materials Today* (2007) **10** (9), 6.
- Neptune, R. R., et al., *Annu Rev Biomed Eng* (2009) **11**, doi:10.1146/annurev-bioeng-061008-124941
- Vorontsov, A. R., and Rumyantsev, V. A., *Encyclopaedia of Sports Medicine* (2000) **9**, 193.
- Kraemer, W. J., et al., *J Strength Cond Res* (1996) **10** (3), 180.
- Mollendorf, J. C., et al., *J Sci Med Sport* (2004) **36**, 1029.
- Pendergast, D. R., et al., *Sports Engineering* (2006) **9**, 65.
- Toussaint, H. M., *The Fastskin body suit: Hip, hype, but does it reduce drag during front crawl swimming?* Presented at 20th International Symposium on Biomechanics in Sports Swimming, Caceres Spain, 2002
- Toussaint, H. M., et al., *Sport Biomech* (2002) **1** (1), 1.
- Tomikawa, M., et al., *J Sci Med Sport* (2008) **11** (4), 417.
- Cordain, L., and Kopriva, R., *Brit J Sport Med* (1991) **25**, 31.
- Montagna, G., et al., *Study and optimization of swimming performance in swimsuits designed with seamless technology*. Presented at World Textile Conference AUTEX 2009, Izmir Turkey, 2009
- Bechert, D. W., et al., *J Fluid Mech* (1997) **338**, 59.
- Bechert, D. W., et al., *Naturwissenschaften* (2000) **87** (4), 157.
- El Helou, N., et al., *Fundamental & Clinical Pharmacology* (2009) **23** (1), 85.
- Fogel, R., *The escape from premature death and hunger*, Cambridge University Press, (2003).

Annexe 5 :

Article original et intégral - Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years; publié dans le Journal of Sports Sciences en Mai 2010 :

Référence: El Helou N, Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Nassif H, et al. (2010) Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years. Journal of Sports Sciences, 28 (7): 789–796.

This article was downloaded by: [Toussaint, Jean-François]

On: 14 May 2010

Access details: Access Details: [subscription number 922235627]

Publisher Routledge

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Journal of Sports Sciences

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.informaworld.com/smpptitle-content=t713721847>

Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years

Nour El Helou ^{ab}; Geoffroy Berthelot ^c; Valérie Thibault ^a; Muriel Tafflet ^c; Hala Nassif ^{ab}; Frédéric Champion ^c; Olivier Hermine ^d; Jean-François Toussaint ^{ab*}

^a Institut de Recherche Biomédicale et d'Epidémiologie du Sport (IRMES), Paris ^b Université Paris Descartes, Paris ^c INSERM U909, Paris ^d Department of Haematology, Hôpital Necker, Paris ^e CIMS, Hotel-Dieu, Paris, France

First published on: 14 May 2010

To cite this Article El Helou, Nour, Berthelot, Geoffroy, Thibault, Valérie, Tafflet, Muriel, Nassif, Hala, Champion, Frédéric, Hermine, Olivier and Toussaint, Jean-François (2010) 'Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years', *Journal of Sports Sciences*, First published on: 14 May 2010 (iFirst)

To link to this Article: DOI: 10.1080/02640411003739654

URL: <http://dx.doi.org/10.1080/02640411003739654>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.informaworld.com/terms-and-conditions-of-access.pdf>

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years

NOUR EL HELOU^{1,2}, GEOFFROY BERTHELOT¹, VALÉRIE THIBAUT¹,
MURIEL TAFFLET³, HALA NASSIF^{1,2}, FRÉDÉRIC CAMPION¹, OLIVIER HERMINE¹, &
JEAN-FRANÇOIS TOUSSAINT^{2,5}

¹Institut de Recherche Biomédicale et d'Epidémiologie du Sport (IRMES), Paris, ²Université Paris Descartes, Paris,
³INSERM U909, Paris, ⁴Department of Haematology, Hôpital Necker, Paris, and ⁵CIMS, Hotel-Dieu, Paris, France

(Accepted 1 March 2010)

Abstract

Road cycling ranks among the most intense endurance exercises. Previous studies and mathematical models describing road cycling have not analysed performances per se. We describe the evolution of road cycling performance over the past 116 years. We studied the top ten cyclists' mean speeds in eight famous classic races and three European Grand Tours, using a previously published multi-exponential model that highlights the different progression periods of an event during the century. In addition, we measured an indicator of difficulty for the Tour de France by calculating the climbing index (i.e. the total altitude climbed over total distance). The eleven races' mean speed increased progressively from 23.13 km · h⁻¹ in 1892 to 41.19 ± 2.03 km · h⁻¹ in 2008. Road cycling development, like other quantifiable disciplines, fits a piecewise progression pattern that follows three periods: before, between, and after the two World Wars. However, a fourth period begins after 1993, providing a speed progression of 6.38% from the third one. The Tour de France's climbing index also provided insight into a recent paradoxical relationship with speeds: when the climbing index increased, the winner's speed also increased. Our results show a major improvement (6.38%) in road cycling performance in the last 20 years and question the role of extra-physiological parameters in this recent progression.

Keywords: Road cycling, technology, erythropoietin, speed records, physiological limits

Introduction

Road cycling competitions are among the most intense of endurance exercises and take place in constantly changing conditions. Parameters influencing road cycling performance are numerous and include external and internal factors. External factors include climatic and environmental parameters, which are not controllable (Jeukendrup, Craig, & Hawley, 2000; Jeukendrup & Martin, 2001), development of technology and aerodynamic equipment (Faria, Parker, & Faria, 2005), conditions specific to the race (course profiles and difficulty; Lucia, Hoyos, & Chicharro, 2001; Padilla, Mujika, Orbananos & Angulo, 2000), and advances in sport science (medicine, nutrition, and pharmacology). Internal factors include the rider's profile expressed as physiology, genetics, and anthropometry (Faria et al., 2005; Jeukendrup et al., 2000; Jeukendrup & Martin, 2001; Lucia et al., 2001; Padilla et al., 2000). Other factors are improvements in training techniques and facilities,

strategies and tactics designed for the race to reduce drag (air resistance) and save energy for the more demanding efforts of "escapes" from the bunch, climbs or sprints (Faria et al., 2005). The UCI (Union Cycliste Internationale), race organizers, and the cycling federations do not provide official road cycling world records, but rather measure riders' arrival times and mean speeds for each race; performance can thus be quantified as the riders' mean speed (km · h⁻¹). Most previous studies and mathematical models on road cycling speed have not analysed race performance expressed as mean speeds, assuming that they might not be comparable from year to year due to changing conditions. Rather, they analysed performance expressed as maximal power output (Basset, Kyle, Passfield, Broker, & Burke, 1999; González-Haro, Galilea Ballarini, Soria, Drobic, & Escanero, 2007; Olds, Norton, & Craig 1993; Olds et al., 1995).

Our aim is to describe the evolution of road cycling performance expressed as mean speeds,

Correspondence: N. El Helou, IRMES, 11 Avenue de Tremblay, 75012 Paris, France. E-mail: nour.elhelou@insp.fr

ISSN 0264-0414 print/ISSN 1466-447X online © 2010 Taylor & Francis
DOI: 10.1080/02640411003739654

based on a previously developed model (Berthelot et al., 2008), based on the hypothesis that the progression pattern of road cycling is similar to that of other sports.

Methods

The mean speeds of top-ten riders and speed records were measured in 11 European classic races and Grand Tours, and compared with other quantifiable sport disciplines.

Data collection

Data collected for the 11 events included each race's total distance D (km) and total times T (h) for the top ten riders each year from 1892 to 2008. A total of 8540 performances, including those of 854 winners, were obtained from Association Mémoire du Cyclisme (<http://www.memoire-du-cyclisme.net/>), La Gazzetta Dello Sport (<http://www.gazzetta.it>), Web Oficial de la Vuelta a España, and Tour de France official websites. Performance expressed as mean cycling speed ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) was calculated as follows:

$$\text{mean cycling speed} = D/T$$

We studied three categories of races:

- four single-day races (Milan–San Remo first raced in 1907, Paris–Roubaix 1896, Flèche Wallonne 1936, and Liège–Bastogne–Liège 1892) with distances ranging from 200 to 290 km;
- four stage races (Paris–Nice first raced in 1933, Dauphiné Libéré 1947, Quatre Jours de Dunkerque 1955, and Midi Libre 1949) with distances of 500 km (first editions) to 2100 km over 4–6 days of competition; and
- the three Grand Tours (Tour de France 1903, Giro d'Italia 1909, and Vuelta a España 1935) with distance ranging from 2250 to 5750 km, usually over 3 weeks.

Winners' and top-ten riders' yearly mean cycling speeds were calculated for each race and race category.

Descriptive race analysis

Tour de France profiles were integrated from 1960 (no data available before 1960) to 2008 as the total altitude climbed (m), calculated by the addition of all ascended mountain passes or summit altitudes (all categories), obtained from the sources cited above, and cross-checked with geographical sources (IGN-Institut Géographique National). The climbing index (CI, %) was consequently calculated by

dividing the total climbed altitude (A , m) by the total distance (D , km):

$$\text{CI} = A/D$$

Model description

Each series of yearly performances for each race was fitted by a previously developed piecewise exponential model (Berthelot et al., 2008):

$$y_j(t) = \Delta \cdot \exp^{-a_j t'} + b_j$$

where y is the studied performance at year t and j is the studied period (a cycling race). Δ is the trend of performance evolution, $\Delta = p_{i,j} - p_{f,j}$ ($p_{i,j}$ and $p_{f,j}$ are the initial and final performance values respectively). In road cycling, Δ values are negative since $p_{i,j}$ is less than $p_{f,j}$. t' is as previously defined by Berthelot et al. (2008):

$$t' = \frac{t_j - t_{i,j}}{t_{f,j} - t_{i,j}}$$

where t' is the performance year after linear transformation of t ; $t_{i,j}$ and $t_{f,j}$ are the years of initial and final performance values in the current period j , respectively. This uniformization of t in the $[0, 1]$ interval ensures the objective function (see Berthelot et al., 2008, model function definition) to be well defined for all values of t . The "initial" and "final" performances of a period are the first and last performances (y) included in the studied period j . a_j is the positive curvature factor and b_j is the asymptotic limit.

Coefficients a and b were obtained through a non-linear least-squares regression, and estimated predictions (period years and number, asymptotic speed values) were calculated for the last period of each event with a credibility interval using a Monte Carlo simulation method. Previously estimated coefficients from the model equation (Berthelot et al., 2008) were used to draw 10,000 new coefficients in a bi-dimensional normal distribution. The new coefficients were then used in the model's equation to produce 10,000 performance values. We used the 2.5th percentile, median, and 97.5th percentile of these 10,000 draws to produce the prediction errors for the estimated year at 99.95% and the estimated asymptotic values. The credibility interval (Willink, 2006) is given by the mean of the 2.5th and 97.5th percentiles for all events.

For each race, this piecewise exponential model provided successive periods. A period refers to a time slot defined by a group of consecutive performances, following a *change of incline*. A procedure based on the best adjusted r^2 was used to split performance series into periods. The algorithm was initiated by

the first three performance values. The series was iteratively fitted by adding the next performance value using the equation presented above (Berthelot et al., 2008). For each fit, adjusted r^2 was obtained, *local maxima* were identified and thereby defined the years when the *slope incline* changed, thus defining the beginning of a new period. The minimum period duration was 6 years and the minimum number of performances was three per period.

Mean performance for the 11 races

The mean speed of the winners of the 11 races was calculated for each year. These values were used to calculate winning riders' mean speed and to provide an index of road cycling performance evolution.

Top-ten analysis

In addition, we calculated the mean speed of the 11 races' top ten riders each year ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$). Standard deviations of the ten best mean speeds were then measured for each race (and for the mean of all races) to calculate the coefficient of variation. The yearly mean coefficient of variation ($cv(t)$) for all races is defined by:

$$cv(t) = \frac{\sigma_{p(t)}}{p(t)}$$

where $p(t)$ is the mean value of the top ten performances at year t and $\sigma_{p(t)}$ is the standard deviation of the performance vector; $mcv(t)$ was computed each year from 1892 to 2008, as the mean of the coefficients of variation of the 11 races.

Speed records

We identified the speed records of each race as the successive best performances ever recorded, and fitted them with the model.

Results

Mean cycling speed

Road cycling mean speed progression is shown in Figure 1. This curve shows the yearly speed progression of the 11 races' top ten cyclists and reveals four periods. The mean speed evolution curve of the 11 winners was similar to that of the same races top ten. Winners' speeds ranged from $23.13 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1892 (Liège–Bastogne–Liège; Figure 2) to $45.81 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Milan San Remo 1990). Road cycling mean speed at the beginning of the twentieth century was $26.44 \pm 2.56 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, increasing to $41.19 \pm 2.03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2008.

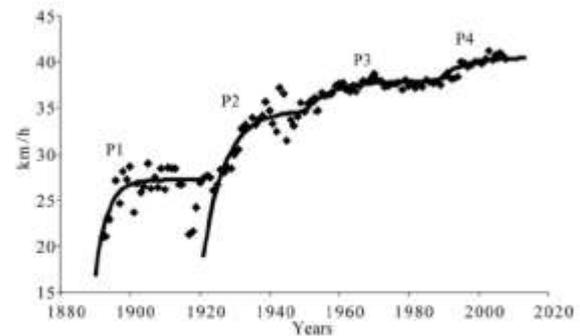


Figure 1. Mean cycling speed progression curve of the top ten riders in 11 European professional bicycle races. Four periods are observed; the first three included the two World Wars (from P1 to P3). A fourth period (P4) appears after 1993.

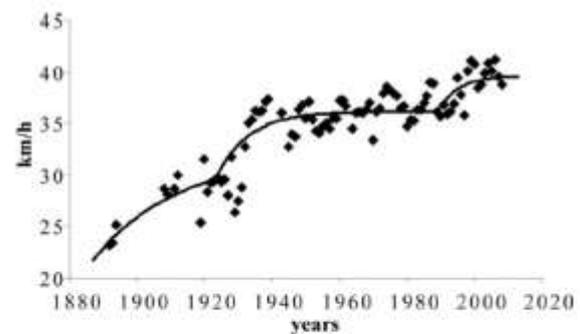


Figure 2. Liège–Bastogne–Liège winners' speed progression. A new period appears after 1990 with a speed progression of 5.07% compared with the previous asymptote (mean $R^2 = 0.54 \pm 0.1$).

Single-day races had the shortest distances and times; their mean speed records were the highest (Table I).

Period 1 (Figure 1) corresponded to the early years of competitive cycling, before the First World War. A second period was evident between the world wars. The highest rate of performance increase was seen in this period (from $27.12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1919 to $34.81 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1939). A 2.4% decline was observed during the Second World War, from $34.98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1940 to $34.13 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1945. This was followed by a slow progression (1945–1989) that characterized period 3. In 30 years, from 1960 to 1989, mean cycling speed was relatively constant at about $37.77 \pm 0.44 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Finally, a late episode of performance improvement (period 4) started after 1993, reaching a peak of $41.23 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2003 and a value of $41.19 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2008. The asymptotic value improved by 6.38% from period 3 to period 4.

Spread of performance

Mean standard deviation of the top ten riders' performances for each race decreased from

Table I. Race categories.

Category	Date first raced (year)	Beginning speed ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	Last speed record ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
Single-day races	1907.8 ± 19.8	28.17 ± 4.51	44.05 ± 2.03
Stage races	1946.0 ± 9.3	35.99 ± 2.80	43.16 ± 2.54
Tours	1915.7 ± 17.0	27.16 ± 1.44	41.53 ± 1.14
All 11 races	1923.8 ± 22.8	30.74 ± 5.14	42.88 ± 2.02

Note: Single-day races have the shortest distances; they were the first to start (in 1907 ± 19.8 years) and are the fastest ones (record: $44.05 \pm 2.03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Stage races started after the Second World War (1946 ± 9.3 years); they have the highest beginning speed ($35.99 \pm 2.80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). The Tours are the longest races, and consequently have lower speeds (record: $41.53 \pm 1.14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

$0.60 \pm 0.74 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1909 to $0.11 \pm 0.05 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 1945 and $0.049 \pm 0.075 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2008. The coefficient of variation ($cv(r)$) decreased from 0.021 to 0.001 in the same period (Figure 3).

Speed records

The evolution of speed records is shown in Figure 4 for four races: Paris–Roubaix, Tour de France, Flèche Wallonne, and Giro d’Italia (mean $R^2 = 0.94 \pm 0.06$). Most recent records varied from $38.93 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Giro d’Italia 2003) to $45.81 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Milan San Remo 1990). All current records were set in period 4, except for Paris–Roubaix, which was set in 1964 (due to large modifications of race distance or number and length of cobblestone segments thereafter).

The effect of course profile

Tour de France characteristics are shown in Figure 5. From 1960 until 1989, when total altitude climbed (A) increased, winners’ speed decreased (Figure 5A) – that is, when A increased by 1000 m, the winner’s speed decreased by $0.12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Figure 5A). Starting in 1990, an inverse relationship was observed: when A increased by 1000 m, the winner’s speed increased by $0.10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Figure 5B), despite a constant increase in the climbing index (Figure 5C). A linear relationship appeared between distances and speeds (Figure 5D).

Discussion

This study is the first to analyse the evolution of road cycling performance since its origin in the nineteenth century. Modelling performance with the multi-exponential pattern is original and has not been developed by any other group. Previous models (Nevill & Whyte, 2005; Nevill, Whyte, Holder, & Peyrebrune, 2007) were used to describe the secular evolution of less than 30 events and did not fit track-and-field jumps and throws, or weightlifting. In addition, previous models did not take into consideration fluctuations relative to external factors

such as the impact of world wars, rule changes, and innovations in technology; they fit all performances of an event with a single curve. Our model (Berthelot et al., 2008; Desgorces et al., 2008) has been applied to date to 157 events (including quantifiable Official Olympics events) using a multi-exponential pattern that is sensitive to local fluctuations relative to external factors; it highlights the different progression periods of an event during the century, and each exponential fit of a period is independent from the others for a specific event.

The evolution of road cycling performance (Figure 1) is similar to that reported previously in five quantifiable Olympic disciplines and 10 other major sport events (Berthelot et al., 2008; Desgorces et al., 2008). Four periods were observed in road cycling. The first two were periods of rapid improvement and were each interrupted by a world war. Period 1 was the initiation phase of road cycling before the First World War: large variations in speeds were observed, and only five races were run at that time (Liège–Bastogne–Liège, Paris–Roubaix, Tour de France, Milan–San Remo, and Giro d’Italia, in chronological order). Period 2, between 1919 and 1939, showed the highest rate of performance improvement. During that time the sport matured through the improvement of training techniques, technological innovations including bike composition and gear and transmission development, and economic incentives. After the Second World War, a slight progression was followed by a stabilization phase that characterized period 3. This stabilization was similar to that seen in the post-war evolution of the UCI Hour Cycling record (Desgorces et al., 2008). All progression curves of road cycling and previously studied sports disciplines (Berthelot et al., 2008; Desgorces et al., 2008) follow the same piecewise exponential pattern.

In road cycling, however, a new progression phase started after 1993. It was observed in 10 of the 11 races studied and occurred after 30 years of stagnation, generating a new asymptote (period 4). Performance improved by 6.38% (Figure 1) as the asymptotic speed increased from $37.85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in

period 3 (1960–1992) to $40.26 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in period 4 (1993–2008).

Speed gaps between the top ten riders also diminished and performances became more similar. The coefficient of variation between the top ten cyclists' mean speed (Figure 3) rapidly decreased from 1909 until 1950 (0.021 to 0.003), and then varied in a small range (0.001). These values are much smaller in cycling than in swimming or track and field (Berthelot et al., 2010). In road cycling, the whole group sets the pace; when the winner's speed record is improved, the group record improves in parallel, and vice versa.

Cycling performance is determined by the inter-relationship of physiological, biomechanical, and

technological factors. Technological improvement contributed to equipment development, especially bicycles. Bicycles weighed approximately 40 kg in 1869 and then decreased to 18 kg in the 1930s (Industrie du vélo, undated). In 1934, Duralumin substituted steel and reduced the weight to 12 kg (Industrie du vélo, undated). Today's bikes are made of titanium, aluminium or carbon composites with higher rigidity (first used in 1986 in the Tour de France), with a weight of 7–8 kg – that is, less than 10% of the total “system” weight (bike + body weight) (Jeukendrup & Martin, 2001). Other technical features may have also influenced the observed speed progression. For example, aerodynamic handlebars, first used in the 1989 Tour de France (Faria et al., 2005); derailleurs, introduced in 1937 in the Tour de France; and the recent introduction of two-way radios, allowing communication with coaches and team-mates. Technology (bicycle weight reduction and aerodynamic optimization) largely influenced the IHPVA (International Human Powered Vehicle Association) Hour cycling record (90.597 km) from 1979, and almost doubled physiological performance (the UCI hour record is currently 49.70 km when using equipment similar to Eddy Merckx's bike) (Desgorces et al., 2008). While a highly optimized technical configuration is proven effective in increasing speed in track cycling races, held in standardized conditions, it remains

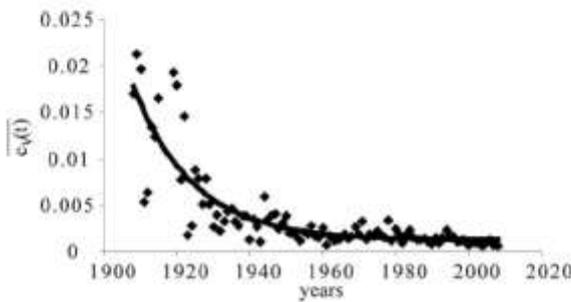


Figure 3. Mean coefficient of variation progression curve for the 10 best riders of each race ($R^2 = 0.73$).

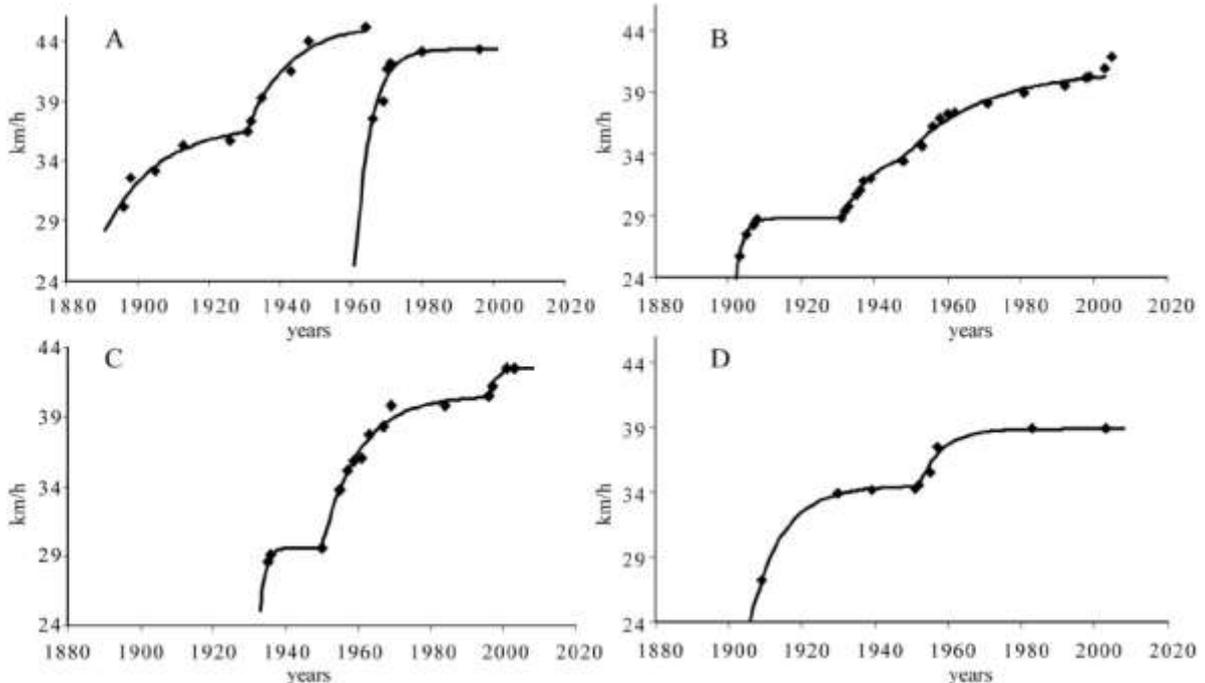


Figure 4. Model fitting on the speed records of four professional bicycle races. (A) Paris-Roubaix (mean $r^2 = 0.95$); (B) Tour de France (mean $r^2 = 0.98$); (C) Vuelta (mean $r^2 = 0.93$); (D) Giro (mean $r^2 = 0.86$). The curve for Paris-Roubaix curve has been reset in 1964 with a new course (relative increase in cobblestone segments due to a reduction in the normal road portion).

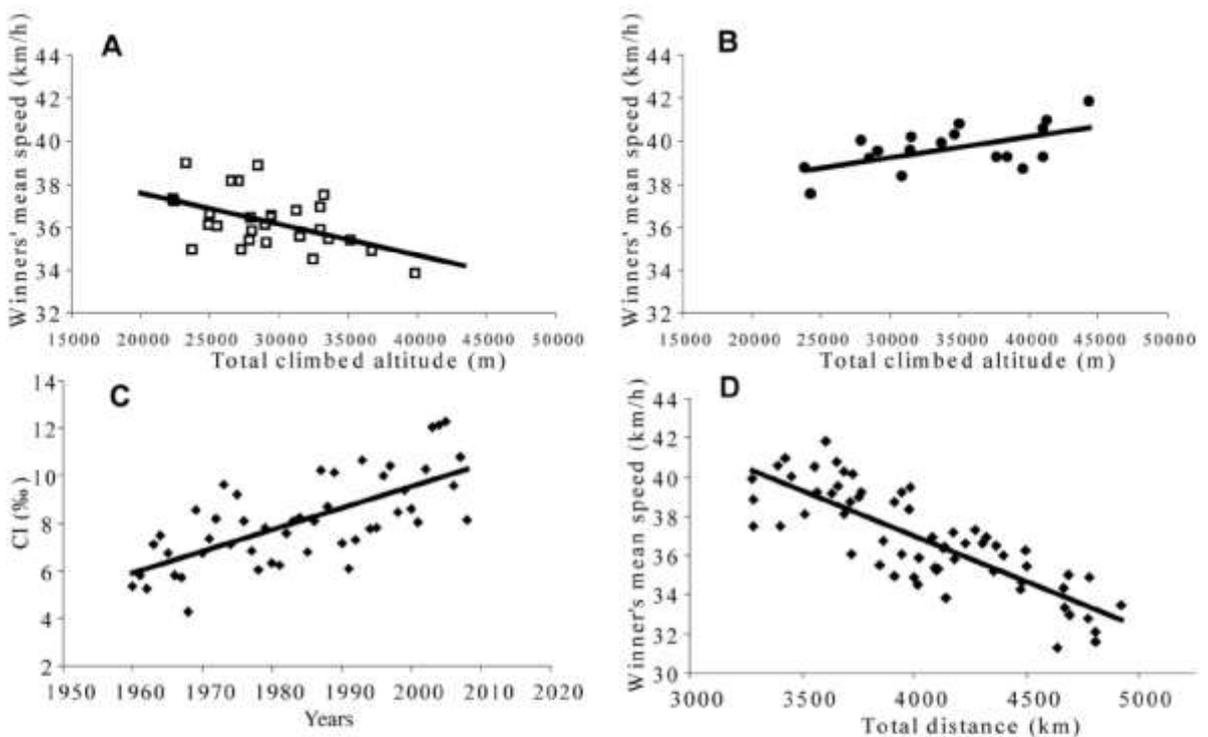


Figure 5. Relationship between total altitude climbed and winners' mean speeds for: (A) Tour de France (1960–1989; $y = -0.0001x + 40,484$), (B) Tour de France (1990–2008; $y = 1E-04x + 36,344$). (C) Climbing index (mean slope) for the Tour de France ($y = 0.098x - 185$; $r^2 = 0.54$). (D) Relationship between total distance and winners' mean speed in the Tour de France between 1947 and 2008 ($y = -0.0046x + 55.6$; $r^2 = 0.67$).

effective to a lesser extent in road cycling (Faria et al., 2005). The only circumstances under which a highly optimized bike configuration may be useful in road cycling are individual and team time-trials, which represent a very small proportion of the overall race (83 km only in the 2008 Tour de France, which was 3560 km long). While aerodynamic parameters such as body position or bicycle frame may influence performance, tactics adopted or the position of teammates may also be determining factors (Jeukendrup & Martin, 2001). The impact of technology on cycling performance can be compared with its impact on swimming (Berthelot et al., 2010). Indeed, recent progression phases began in 1999 when swimsuits were allowed by the International Swimming Federation (FINA), and in 2008 after further refinement (Neptune, McGowan, & Fiandt, 2009).

Many other factors are involved in road cycling performance, including adequate nutrition, which is essential in the preparation of high-level competitors. Media coverage may also play a role, although this has been prevalent since the earliest bicycle races (Musée National du Sport, 2007).

Although prohibited substances have probably been used since the end of the Second World War, some major pharmacological innovations appeared at the beginning of period 4 (Diamanti-Kandaris et al.,

2005; Gaudard, Varlet-Marie, Bressolle, & Audran, 2003; Juhn, 2003; Lucia, Earnest, & Arribas, 2003). However, no previous publications have included this factor when modelling road cycling performance. The erythropoietin (EPO) gene was identified and cloned in 1985, and recombinant human EPO (rHuEPO) was approved by the US Food and Drug Administration in 1989 (Gaudart et al., 2003). The International Olympic Committee (IOC) prohibited its use in sports in 1990 (Diamanti-Kandaris et al., 2005), but since then rHuEPO has been used by 3–7% of elite endurance-sport athletes to increase maximal oxygen consumption and endurance (Diamanti-Kandaris et al., 2005; Gaudart et al., 2003; Juhn, 2003). Major and recurrent judiciary procedures were to follow throughout period 4 (Berry, 2008; Lucia et al., 2003; Miquet & Blanchet, 2000; Noakes, 2004; Robinson et al., 2000).

Some studies quantified the effect of EPO on performance in volunteering athletes by measuring maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$). These studies showed a 6.3–6.9% increase in $\dot{V}O_{2max}$ (Ashenden et al., 2001; Birkeland et al., 2000; Parisotto et al., 2000), with a significant elevation that remained 4 weeks after the cessation of drug administration (Russell, Gore, Ashenden, Parisotto, & Hahn, 2002). These findings confirm that rHuEPO doping

provides a significant physiological advantage consistent with the increase in road cycling performance shown in the present study. Cycling speed and $\dot{V}O_{2\max}$ are correlated in road cycling (McCole, Clancy, Conte, Anderson, & Hagberg, 1990), as in all other aerobic sports (track and field, middle- and long-distance running, cross-country skiing, rowing; Seiler, 2006). In a previous study, McCole et al. (1990) showed that an increase in speed from 37.5 to 40 km · h⁻¹ may be related to a 7.5% increase in $\dot{V}O_{2\max}$. The expected effect on $\dot{V}O_{2\max}$ has been the major incentive to use EPO in aerobic sports since its discovery. Newly synthesized molecules, undetectable in urine-based doping controls, such as EPO CERA (detected in targeted controls only in 2008), may still be in use by some athletes (Schöffel, Börger, Quarcoo, Scutaru, & Groneberg, 2008). The sudden increase in performance observed during period 4 in this study and the availability of rHuEPO may be coincidental, and unless the direct effect of rHuEPO's on elite road cycling performance is measured, it is impossible to prove that its use alone is responsible for the 6.38% improvement in period 4.

The relationship between total altitude climbed and the winner's mean speed in the Tour de France raises another physiological issue. Between 1960 and 1989, the relationship is coherent (Figure 5A). However, in the 1990s, when the climbing index increased, the winner's speed paradoxically increased too (Figure 5B). In the last 20 years, increased mountain biking during the Tour resulted in a faster *Yellow Jersey* ending the race. During period 4, total distance (*D*) in the Tour de France increased from 3285 km to 3944 km (1989–1997) and total altitude climbed (*A*) increased from 24,308 m to 41,057 m. In theory, both of these changes should make the race more difficult. The expected result would have been a decrease in mean speed [11.3% speed reduction due to the increased race distance (Figure 5D), and 6.5% speed reduction due to the increase in *A* (Figure 5A)]. In fact the change observed was a 4.5% improvement (from 37.48 km · h⁻¹ in 1989 to 39.24 km · h⁻¹ in 1997), contributing to the 6.38% improvement of global road cycling progression in period 4 (Figure 1).

Conclusion

We studied road cycling performance and demonstrated that like other indoor and outdoor sports, its evolution follows a piecewise exponential progression. However, after 30 years of stagnation, a blunt progression phase was observed after 1993, with a 6.38% increase in mean cycling performance. Although further research is required to validate the direct causes and consequences of our

findings, performance modelling has important implications for the role of extra-physiological parameters.

Acknowledgments

We thank the Centre National de Développement du Sport and the Ministry of Health, Youth, and Sport for financial assistance. We thank INSEP teams for their full support. We thank Mr. Dominique Magnier, President of "Association Mémoire du Cyclisme", for giving us full access to his database. We thank Mrs. Karine Schaal for carefully reviewing the manuscript.

References

- Ashenden, M. J., Hahn, A. G., Martin, D. T., Logan, P., Parisotto, R., & Gore, C. J. (2001). A comparison of the physiological response to simulated altitude exposure and r-HuEpo administration. *Journal of Sports Sciences*, *19*, 831–837.
- Association Mémoire du Cyclisme website. (undated). *Road cycling races results*. Retrieved from: <http://www.memoire-du-cyclisme.net/>.
- Basset, D. R., Kyle, C. R., Passfield, L., Broker, J. P., & Burke, E. R. (1999). Comparing cycling world hour records, 1967–1996: Modelling with empirical data. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *31*, 1665–1676.
- Berry, D. A. (2008). The science of doping. *Nature*, *454* (7), 693.
- Berthelot, G., Tafflet, M., El Helou, N., Len, S., Escolano, S., Guillaume, M. et al. (2010). Athlete atypicality on the edge of human achievement: Performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE*, *5* (1), e8800. DOI: 10.1371/journal.pone.0008800.
- Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Escolano, S., El Helou, N., Jouven, X. et al. (2008). The Citius End: World records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE*, *3* (2), e1552. DOI: 10.1371/journal.pone.0001552.
- Birkeland, K. I., Stay-Gundersen, J., Hemmersbach, P., Hallen, J., Haug, E., & Bahr, R. (2000). Effect of rhEPO administration on serum levels of sTfR and cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *32*, 1238–1242.
- Desgorges, F. D., Berthelot, G., El Helou, N., Thibault, V., Guillaume, M., Tafflet, M. et al. (2008). From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS ONE*, *3* (11), e3653. DOI: 10.1371/journal.pone.0003653.
- Diamanti-Kandaris, E., Konstantinopoulos, P. A., Papailiou, J., Kandaralis, S. A., Andreopoulos, A., & Sykiotis, G. P. (2005). Erythropoietin abuse and erythropoietin gene doping: Detection strategies in the genomic era. *Sports Medicine*, *35*, 831–840.
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The science of cycling: Factors affecting performance – Part 2. *Sports Medicine*, *35*, 313–337.
- Gaudard, A., Varlet-Marie, E., Bressolle, F., & Audran, M. (2003). Drugs for increasing oxygen transport and their potential use in doping: A review. *Sports Medicine*, *33*, 187–212.
- González-Haro, C., Galilea Ballarini, P. A., Soria, M., Drobnic, F., & Escanero, J. F. (2007). Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *British Journal of Sports Medicine*, *41*, 506–509.

- IGN-Institut Géographique National web site. *Mountain summits altitudes*. Retrieved from: <http://www.ign.fr>.
- Industrie du vélo web site (undated). *Homepage*. Retrieved from: <http://www.too-velo.com/content/view/5/11/#retour>.
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P., & Hawley, J. A. (2000). The bioenergetics of world class cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3, 414–433.
- Jeukendrup, A. E., & Martin, J. (2001). Improving cycling performances, how should we spend our time and money. *Sports Medicine*, 31, 559–569.
- Juhn, M. S. (2003). Popular sports supplements and ergogenic aids. *Sports Medicine*, 33, 921–939.
- La Gazzetta Dello Sport web site (undated). *Giro official results*. Retrieved from: <http://www.gazzetta.it/Speciali/Giroditalia/>.
- Lucia, A., Earnest, C., & Arribas, C. (2003). The Tour de France: A physiological review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13, 275–283.
- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports Medicine*, 31, 325–337.
- McCole, S., Clancy, K., Conte, J. C., Anderson, R., & Hagberg, J. M. (1990). Energy expenditure during bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 68, 748–753.
- Miquet, P., & Blanchet, B. (2000). Le roman de l'EPO. *L'Express* [updated 3 December 2003; published 29 June 2000]. Retrieved from: http://www.lexpress.fr/actualite/sciences/sante/le-roman-de-l-epo_494198.html.
- Musée National du Sport (2007). *Histoire du Sport en France Du Second Empire au Régime de Vichy* (pp. 330–338). Paris: Vuibert.
- Neptune, R. R., McGowan, C. P., & Fiandt, J. M. (2009). The influence of muscle physiology and advanced technology on sports performance. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 11, 81–107.
- Nevill, A. M., & Whyte, G. P. (2005). Are there limits to running world records? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37, 1785–1788.
- Nevill, A. M., Whyte, G. P., Holder, R. L., & Peyrebrune, M. (2007). Are there limits to swimming world records? *International Journal of Sports Medicine*, 28, 1–6.
- Noakes, T. (2004). Tainted glory – doping and athletic performance. *New England Journal of Medicine*, 351, 847–849.
- Olds, T. S., Norton, K. I., & Craig, N. P. (1993). Mathematical model of cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 75, 730–737.
- Olds, T. S., Norton, K. I., Lowe, E. L., Olive, S., Reay, F., & Ly, S. (1995). Modeling road-cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 78, 1596–1611.
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32, 850–856.
- Parisotto, R., Gore, C. J., Emslie, K. R., Ashenden, M. J., Brugnara, C., Howe, C. et al. (2000). A novel method utilizing markers of altered erythropoiesis for the detection of recombinant human erythropoietin abuse in athletes. *Haematologica*, 85, 564–572.
- Robinson, N., Schweizer, C., Cardis, C., Saugy, M., Kamber, M., Schattenberg, L. et al. (2000). Haematological and biochemical parameters from all professional cyclists during the Tour de Suisse 1999. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 48 (3), 104–110.
- Russell, G., Gore, C. J., Ashenden, M. J., Parisotto, R., & Hahn, A. G. (2002). Effects of prolonged low doses of recombinant human erythropoietin during submaximal and maximal exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 86, 442–449.
- Schöffel, N., Börger, J. A., Quarcio, D., Scutaru, C., & Groneberg, D. A. (2008). Erythropoietin – state of science. *Sportverletz Sportschaden*, 22, 201–206.
- Seiler, S. (2006). One hundred and fifty years of rowing faster. *Sportscience*, 10, 12–45.
- Tour de France official web site (undated). *Tour de France official data*. Retrieved from: <http://www.letour.fr>.
- Web Oficial de la Vuelta a España (undated). *Vuelta official results*. Retrieved from: <http://www.lavuelta.com>.
- Willink, R. (2006). On using the Monte Carlo method to calculate uncertainty intervals. *Metrologia*, 43, 39–42.

Annexe 6:

Matériels et Méthodes de l'étude : Rôle des mutations des gènes de l'hémochromatose sur la performance sportive d'endurance en altitude.

Rôle des mutations des gènes de l'hémochromatose sur la performance sportive d'endurance en altitude

Gérard DINE ; Olivier HERMINE ; Sylvie ESCOLANO ; Vincent GENTY ; Gabriella FUMAGALLI ; Muriel TAFFLET ; Nour EL HELOU ; Françoise VAN LIERDE ; Xavier JOUVEN ; Jean François TOUSSAINT.

Material and methods:

Blood sampling

Blood samples were collected by venipuncture from the vein of the arm and immediately analyzed for blood parameters or prepared for DNA extraction. Blood parameters were: full blood count, platelets, reticulocytes, serum EPO, ferritin, iron, serum transferrin, soluble transferrin receptor, transferrin saturation.

DNA extraction

Red blood cells are lysed in 1% triton buffer (0.3M sucrose, 10mM Tris HCl pH7.5, 10mM MgCl₂, 1% TritonX100) and centrifuged (5000g, 4°C) for 15 minutes. White blood cells are then lysed 30 minutes under agitation in SDS buffer (75mM NaCl, 24mM EDTA, 2 10⁻³% SDS, 1M NaClO₄)

Proteins are precipitated in NaCl 6M buffer and eliminated by centrifugation (5000g, 10 minutes, 20°C). Pellet is discarded and supernatant treated by cold isopropanol. DNA flocculation is taking out of the tube and rinsed 2 times in 70% cold ethanol.

After alcohol evaporation, DNA is diluted in 500µl of Tris-EDTA buffer (10 mM Tris HCl pH7.5, 1mM EDTA pH 8) at 4°C overnight, and stored frozen until assays.

Haemochromatosis assays

In vitro amplification (PCR) using biotinylated primers and hybridization of amplification products to a test strip containing allele-specific oligonucleotide probes immobilized as an array of parallel lines are realized according to haemochromatosis strip assay kit protocol (Haemochromatosis StripAssay Atm, Vienna Lab Diagnostics GmbH). Bound biotinylated sequences are detected using streptavidin-alkalin phosphatase and color substrates.

The assay covers 12 mutations in the HFE gene (V53M, V59M, H63D, H63H, S65C, Q127H, P160delC, E168Q, E168X, W169X, C282Y, Q238P), 4 mutations in the TFR2 gene (E60X, M172K, Y250X, AVAQ594-597del), and 2 mutations in the FPN1 gene (N144H, V162del).

Annexe 7:

Article original et intégral - From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments.

Référence: Desgorces FD, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. PLoS ONE 3(11): e3653. doi:10.1371/journal.pone.0003653.

From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments

François-Denis Desgorces^{1,2*}, Geoffroy Berthelot¹, Nour El Helou¹, Valérie Thibault¹, Marion Guillaume¹, Muriel Tafflet³, Olivier Hermine^{1,2,4}, Jean-François Toussaint^{1,2,5}

1 IRMES, Institut de Recherche Médicale et d'Epidémiologie du Sport, INSEP, Paris, France, **2** Université Paris Descartes, Paris, France, **3** INSERM U909, université Paris Descartes, IFR 69 Paris Sud Université, Villejuif, France, **4** Service d'hématologie Hôpital Necker and CNRS UMR 8147, Paris, France, **5** CIMS, Hôtel-Dieu, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Paris, France

Abstract

In order to understand the determinants and trends of human performance evolution, we analyzed ten outdoor events among the oldest and most popular in sports history. Best performances of the Oxford-Cambridge boat race (since 1836), the channel crossing in swimming (1875), the hour cycling record (1893), the Elfstedentocht speed skating race (1909), the cross country ski Vasaloppet (1922), the speed ski record (1930), the Streif down-hill in Kitzbühel (1947), the eastward and westward sailing transatlantic records (1960) and the triathlon Hawaii ironman (1978) all follow a similar evolutive pattern, best described through a piecewise exponential decaying model ($r^2=0.95\pm 0.07$). The oldest events present highest progression curvature during their early phase. Performance asymptotic limits predicted from the model may be achieved in forty years (2049 ± 32 y). Prolonged progression may be anticipated in disciplines which further rely on technology such as sailing and cycling. Human progression in outdoor sports tends to asymptotic limits depending on physiological and environmental parameters and may temporarily benefit from further technological progresses.

Citation: Desgorces F-D, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. PLoS ONE 3(11): e3653. doi:10.1371/journal.pone.0003653

Editor: Alejandro Lucia, Universidad Europea de Madrid, Spain

Received: August 28, 2008; **Accepted:** October 14, 2008; **Published:** November 5, 2008

Copyright: © 2008 Desgorces et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: The authors have no support or funding to report.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: Francois.Desgorces@univ-paris5.fr

Introduction

World records (WR) highlight the progression of human performance. Our group recently analyzed WR from 5 measurable Olympic disciplines and demonstrated a major global fading in WR progression following a piecewise exponential decaying pattern [1]. Track and field, weight lifting or swimming competitions take place in a finite context with standardization of competitive fields, controlled environmental factors and major influence of physiological capacity on performance whereas outdoor sports are usually considered to be more influenced by environmental conditions, material or technical constraints. Therefore, outdoor events among the oldest and most popular have been ignored by previous studies that have analyzed human performance evolution [1,2].

Performance depends on trainable variables (related to physiology, psychology, biomechanics, tactics) and other factors beyond the athlete's control (genetics, environment, climatic conditions) [3]. Environmental factors may modify results according to the discipline rules, mobility milieu (snow, ice, water, air), motion type (running, cycling, skiing, swimming) or duration of the event. As a result, International Federation of Rowing Associations, as well as other federations do not provide world records, though events "best times" are available [4]. We hypothesized that performance evolution of outdoor sports events would also follow a piecewise exponential decaying pattern.

Materials and Methods

Ten outdoor events among the most popular in the world, performed in non motorized sports and presenting large variations in duration, longevity, competitive circumstances and frequency were analysed (Table 1). The Oxford-Cambridge rowing race is challenged since 1829, with an unchanged course against the streams of the Thames from "Putney to Mortlake" since 1845 [5,6]. The Vasaloppet is a Swedish long distance cross-country skiing race held on the first Sunday of March between the village of Sälen and town of Mora for 90 km [6,7]. Since 1909 the speed skating race "Elfstedentocht" takes place in the canals of the Dutch Friesland when ice freezes over the 200 km route around Leeuwarden [6,8]. The record of transatlantic crew sailing eastward from New-York "Ambrose Light" tower to English "Lizard Point" (5417 km) was first set by Charlie Barr's crew in 1905 but the record has only been challenged for a few decades starting with Eric Tabarly [6,9]. The oldest solo ocean race is challenged sailing transatlantic westward every four years from Plymouth to New England (Newport or Boston, orthodromic track: 5185 km) starting with Sir Francis Chichester in 1960 [6,9]. The speed ski record is challenged since 1930 in varied places (Portillo, Chile; Silverton, USA; Les Arcs, France) and determined in a timing zone 100 meters long [6,10]. The hour cycling record is accounted as firstly challenged outdoor in Paris since 1876 and registered by the International Cyclist Union (ICU) and the

International Human Powered Vehicle Association (IHPVA) with different acceptance in the bicycle type used for the record [6,11,12]. The Streif (Kitzbühel, Austria) down-hill ski is 3312 m long with an 27% average gradient, held since 1930 and part of the ski world cup since 1967 [6,13]. The Hawaiian Ironman is the first modern long-distance triathlon (3.86 km swimming, 180.2 km cycling and 42.2 km running). Starting in 1978, each year it is considered to be the World championship in long-distance triathlon [6,14]. The channel crossing swim is usually challenged between Shakespeare beach (Dover, England) to “Cap gris nez” (France) over 33.8 km; firstly held in 1875 it has been regulated since 1927 [6,15]. For all events, best performances (BP) only (equivalent to the race record) are accounted for into the analysis [5–15].

Function description and prediction

We performed BP modelisation as previously reported [1]: performance series for each event are fitted by the following function: $y_j(t) = ABP \exp(-aj^t) + b$; where $ABP = BP_{i,j} - BP_{f,j}$ is an event indicator for the studied j period; $BP_{i,j}$ and $BP_{f,j}$ are the initial and final BP values respectively; a_j is the positive curvature factor given by non linear regression; b is the asymptotic limit. Coefficients a , b and estimated predictions (years, asymptotic values) are obtained through an iterative algorithm.

The ratios β (progression range since the beginning of the event) and β' (present progression range) were calculated to describe the improvement over the final time frame in each event by using the following equation: $\beta = (BP_i/b) \times 100$ and $\beta' = (BP_f/b) \times 100$.

For each event, this piecewise exponential decaying model provides successive periods. A period refers to a time slot defined by a group of consecutive BP, following a rupture of incline. A procedure based on the best adjusted r^2 was used to split BP series into periods. The algorithm was initiated by the first three BP values. The series was iteratively fitted by adding the next BP point using the presented above equation. For each fit, we obtained the adjusted r^2 ; local maxima provide the changes of incline corresponding to the beginning of a new period. The minimum period duration is 6 years and the minimal BP number is three per period.

During the period j , parameters a_j and b_j were estimated using the Levenberg-Marquardt algorithm (LMA) [16] in a non linear least-squares regression to fit the model to BP. Coefficients of the prediction equation were calculated for the last period of each event through LMA with credibility interval [17]. The result was used to estimate the year t when the 99.95% (1/2000) limit is reached.

Data are expressed as mean \pm standard deviation.

Results

The collected data provided a mean of 17.6 ± 7.1 BP per event. Events had large differences in their initial progression range ($\beta = 46.27 \pm 13.5\%$). Present mean achievement of the asymptotic performance, β' , was $94.6 \pm 7.7\%$ with seven events over 97%. Events with the lowest β and β' coefficients were: sailing transatlantic records, Streif and speed ski record and IHPVA hour cycling record (gathered in group 1: $\beta_1 = 37.5 \pm 9.5\%$; $\beta'_1 = 90.4 \pm 8.8\%$) whereas group 2 sport events: Oxford-Cambridge, Vasaloppet, Elfstedentocht, Ironman, Channel crossing and ICU Hour cycling record had higher values ($\beta_2 = 53.5 \pm 12.1\%$; $\beta'_2 = 98.0 \pm 3.2\%$).

The model fits progression periods, depending on the events' longevity, with high accuracy ($r^2 = 0.95 \pm 0.07$). A first progression period (XIXth and beginning of XXth century) was modeled for the older events (Oxford-Cambridge, Vasaloppet, speed ski record, ICU cycling: $r^2 = 0.97 \pm 0.03$, $a = 1.93 \pm 0.96$ and $\beta' = 57.6 \pm 8.9\%$; **Figure 1**). A second progression period starts in the early XXth century for seven events (the four previous ones plus Channel crossing, Elfstedentocht (**Figure 2**) and IHPVA cycling: $r^2 = 0.95 \pm 0.03$, $a = 0.97 \pm 0.45$, $\beta' = 73.15 \pm 16.8\%$). Modeled curves for the last period of all 10 events start in the middle of the XXth century ($r^2 = 0.95 \pm 0.04$, $a = 1.28 \pm 0.51$, $\beta' = 94.5 \pm 7.2\%$). The progression of the transatlantic records, the Hawaii Ironman and Streif down-hill are modeled by a mono-exponential curve (**Figure 3**). The curves for the hour cycling record progression according to the specific associations' rules (ICU and IHPVA) are compared in Figure 4.

The year when mean BP will be established at 99.95% of their asymptotic value is predicted to be 2049 ± 32.1 years (**Table 2**).

Table 1. Event parameters: longevity, occurrence and available performance number.

Event	Sport	Dates	Frequency	Performance number	
				total	best performance
Oxford-Cambridge	Rowing	1829	Annually	153	19
Transatlantic record	Crew sailing	1980	Free	11*	11
Transatlantic record	Solo sailing	1960	Every four years	13	9
Channel crossing	Swimming	1875	Free	772	16
Ironman Hawaii	Triathlon	1978	Annually	30	12
Hour cycling record UCI	Cycling	1876	Free	29*	29
Hour cycling record IHPVA	Cycling	1933	Free	20*	20
Elfstedentocht	Speed ice skating	1909	Annually	16	9
Vasaloppet	Cross-country ski	1922	Annually	86	17
Speed ski record	Down-hill ski	1930	Free	32*	32
Streif down-hill	Down-hill ski	1930	Annually	74	20

* performance is only registered when the best performance is improved.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.t001

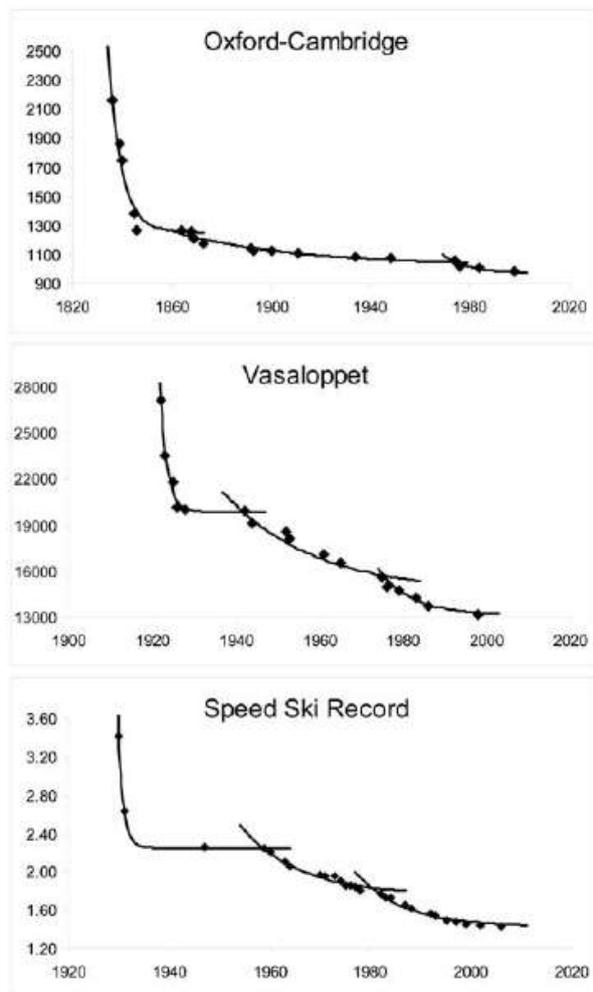


Figure 1. Model fitting for events with three progression periods. Performances of the Oxford-Cambridge boat race, Vasaloppet cross-country ski and speed ski record (for covering a 100-m distance) in seconds.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.g001

Discussion

Our study is the first to model the performance evolution of outdoor sport events influenced by physiological, technological and environmental factors. Although the studied events largely differ in longevity, duration and physical environment (ice, snow, water, ground, air), the piecewise decaying exponential model describes a common evolutive pattern. Older events BPs follow a progression with high curvature coefficients suggesting the same rapid improvement in the early phase and a profile made up of two or three periods over the XIXth and XXth centuries. In addition, the initial β state that we estimated here is lower than the value previously calculated for Olympic sports (46% vs 60%), which may be due to the fact that here we took into account all records starting at day 0, whereas national Track & Field or Speed Skating competitions had already started long before the first Olympic games [1]. This emphasizes the particular status of these sport monuments in their own discipline.

Robert Fogel [18] previously used the term “techno-physiological evolution” to describe human health and anthropometric

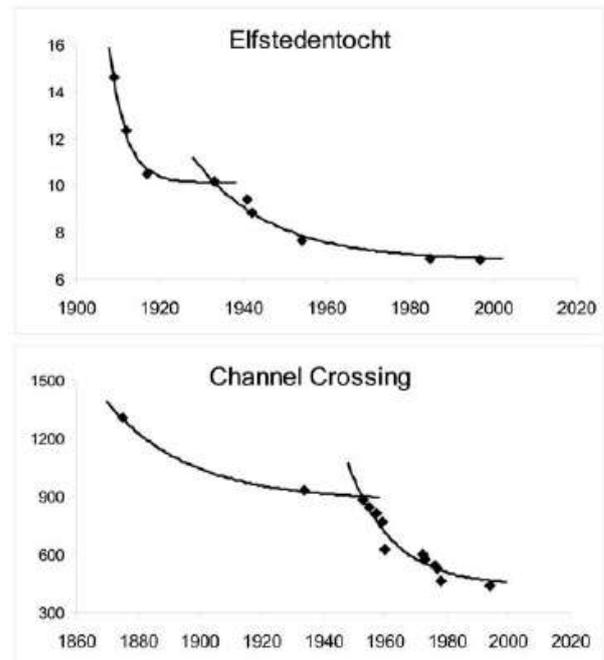


Figure 2. Model fitting for events with two progression periods. Performances of the Elfstedentocht speed skating race (normalized distance of 200 km) in hours and of the Channel crossing swimming in minutes.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.g002

gains over the last three centuries. Similar improvements occurred over the XXth century (enhanced physical training, higher number of participants, nutritional practice, biological knowledge and medical advances) in sports like rowing [19], cross-country skiing [20,21], speed skating [22] or cycling [23], which are sports with high aerobic requirements. Indeed, these events present similar progression patterns (α and β coefficients) than those obtained in Olympic disciplines performed in a controlled environment and quantified by world records [1].

Predictions of the BP asymptotic limits from the piecewise exponential model suggest that the achievement of human limits may occur during the XXIth century. Furthermore, our model suggests that the limits will be rapidly reached in events highly dependent on physiological capabilities, e.g. expected performance improvements over the next century in Oxford-Cambridge, Vasaloppet and Elfstedentocht are lower than 2%. The most recent of these events, the Hawaii Ironman, may have already achieved its asymptotic value (β' value: 99.64%) although it has been challenged since three decades only. The performance evolution for this event may be based on its rapidly growing popularity and benefits from the advances previously made in the three sports involved in triathlon (swimming, cycling, running). These results compared to those published for world records [1] suggest that environmental and climatic conditions, though influencing a year to year performance progression, do not modify the secular trend toward ultimate performance achievement.

Maximal boat speed in transatlantic records largely depends on environmental conditions (north Atlantic depression speed and numbers) rather than on individuals' physical power. Tools have been developed to control, at least partly, environmental factors for the athlete's benefits: e.g. navigation equipments allow for information to be transmitted to, or from, the boat in order to

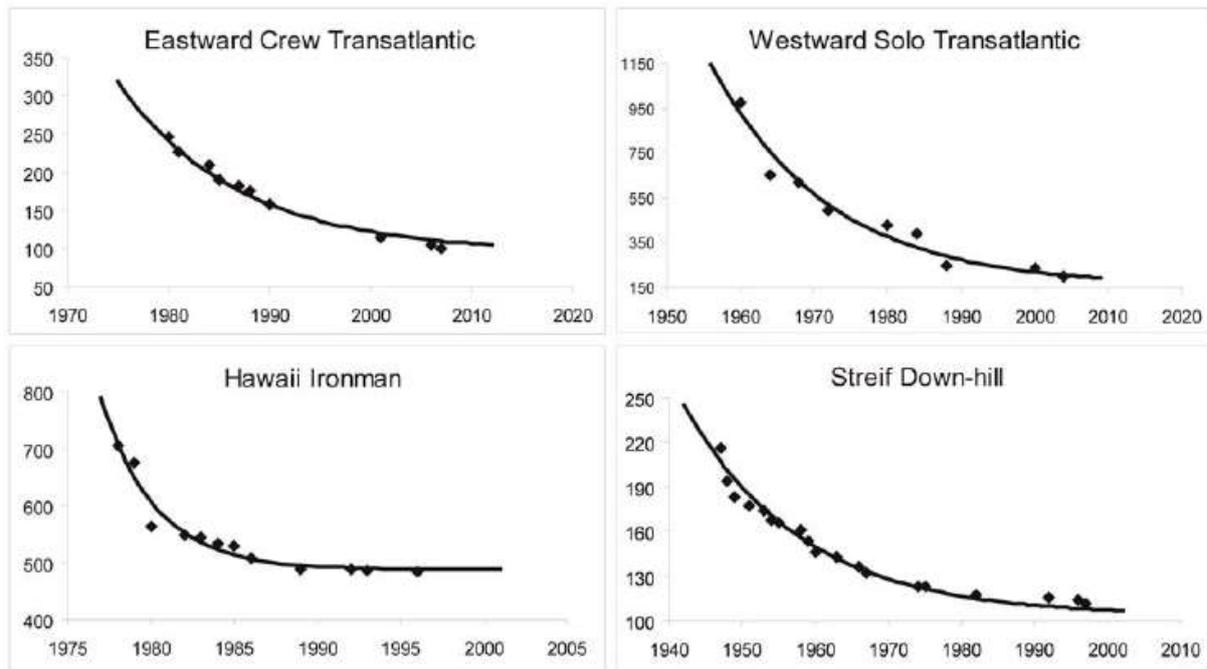


Figure 3. Model fitting for three events with a single progression period. Performances of the Eastward Crew and Westward Solo transatlantic records in hours, of the Hawaii Ironman in minutes and of the Streif down-hill in seconds.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.g003

better take advantage of a major depression as well as of the lightest wind. Also, an increased knowledge and online computation now allows for a better use of sea streams. In addition, some events (speed ski, eastward transatlantic sailing, hour cycling) can be organized when optimal spatial and meteorological conditions are met in order to enhance probabilities to break a record. Choice for an event frequency and location may possibly influence BP occurrence and allow for a tight control of physical and climatic parameters. On the other side, the inability to organize the Elfstedentocht race due to the lack of thick ice between 1986 and 1997 and until now also demonstrates the major dependence

of these competitions on climatic conditions [8]. Therefore, the progression of the Elfstedentocht performances could not benefit from the new skate technology that improved world skating records since 1998 [1,24]. In a pre-determined place and date, Oxford defeated Cambridge in 2008 with the slowest time since 1947 and because of blustery and rough conditions the Cambridge boat sank in 1978 [5]. In 1987, the finishing time of the coldest Vasaloppet (-30°C) was 16 minutes longer than the record stated the year before. On another hand, due to extremely mild weather, the race was cancelled in 1990. However, as calculations integrate performances under-constraints, the particular environmental and climatic influences do not change the common pattern of performance evolution.

Our results demonstrate that higher progression rates remain plausible when rules allow for greater impact from technology. Sailing records present the lowest β and β' coefficients compared with rowing, cross-country skiing, triathlon or ICU cycling (group 2). The influence of technology is best demonstrated in the hour cycling record: the ICU "physiological" record limit is almost achieved at about 50 km/h, when using a vehicle similar to the Eddy Merckx bicycle but the predicted limit is much higher for the "technological" IHPVA value (91.94 ± 3.58 km/h). In addition, the delay for achieving limits may be larger than for events highly influenced by physiological capabilities (2030 for group 2 vs. 2075 for group 1), as technology keeps modifying boats in transatlantic records (e.g. gauge, size and class, hull and keel types, sail surface), equipment for ski records (e.g. ski length and composition, aerodynamic helmets, latex or polyurethane suits) or aerodynamic surface in torpedo-like bikes [9,10]. Although techno-physiological improvements allow for the enhancement of propulsive efficiency they remain under sport rules control: conception of rowing boats introduced carbon fiber use in 1972 and larger blades increased propulsive efficiency after 1991, but FISA banned sliding-rigger

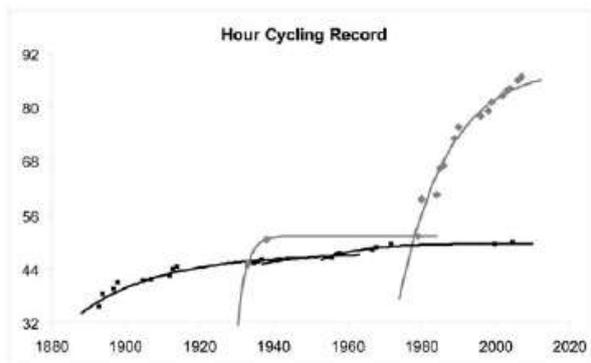


Figure 4. Model fitting for the hour cycling record. Hour cycling records in kilometres. Black lines and squares for record stated by the International Cyclist Union. Grey lines and diamonds for the record stated by the International Human Powered Vehicle Association.
doi:10.1371/journal.pone.0003653.g004

Table 2. Coefficients and function fit for the asymptotic limit prediction.

Event	Date for asymptote achievement	b		β	β'	
		CI	CI			
Eastward Crew transatlantic	2084	2050–2134	84.7	70.2–98.7	34.53	84.77
Westward Solo transatlantic	2107	2050–2206	155.8	66–246	23.89	77.71
Streif down-hill	2058	2045–2072	108.7	106–110	49.89	97.56
Speed ski record	2043	2021–2077	1.39	1.36–1.43	41.07	97.73
Hour cycling record IHPVA	2086	2057–2126	91.94	88.3–95.5	38.45	94.35
Oxford–Cambridge	2020	1990–2107	973.1	957–989	45.05	99.40
Vasaloppet	2022	1994–2096	12998	12650–13357	47.84	98.95
Elfstedentocht	2045	2027–2065	6.45	6.40–6.50	46.33	99.03
Ironmann Hawaiï	2003	2000–2006	482.2	480–483	68.31	99.64
Channel crossing	2051	2017–2109	399.4	325–460	42.76	91.41
Hour cycling record ICU	2026	1984–2134	49.80	49.4–51.2	70.89	99.79

Year calculated for achieving 99.95% of the asymptote with confidence interval (CI); b is the asymptotic limit; β is the progression range from the beginning of the event expressed as a percentage of the predicted asymptotic limit; β' is the level of the actual BP expressed as a percentage of the asymptotic limit. Asymptotic limits b expressed in seconds for Oxford–Cambridge, Vasaloppet, Streif and speed ski record (for 100 meters); in minutes for the Hawaii Ironman and channel crossing; in hours for the Eastward, Westward transatlantic records and Elfstedentocht; in kilometres for the hour cycling records.

doi:10.1371/journal.pone.0003653.t002

boats, which largely increased boat speed in order to limit technology influence and too expensive materials [4].

Anti-doping policies are elaborated to restrain pharmacological impacts within health perspectives [25] but technological advances are accepted within sport rules and identity (e.g. minimum weights for each class boat in rowing; Vasaloppet performed in classic style; Channel crossing with swim suits and hat without thermal protection or buoyancy capabilities) [4,7,15]. Conversely, the speed ski record, one of the fastest non motorized sport on land, seems to have reached its limits after 70 years of technological improvements under major environmental constraints (e.g. air penetration coefficient, snow quality, slope). Thus, if international federations, pushed by public demand and media coverage, want to develop sport on a pure performance basis with the fascination of newly established records, their need for technology will constantly increase. Swimming is the recent demonstration of such evolution with the introduction of swimming suits in 1998 and of second generation models in 2008 that allow for a 1 to 2% increase in speed [26]. However, close future and popularity of these sport monuments depend more on their history, identity and scenery than on continuous performance increase.

The present study suggests: *i*) the universality of the piecewise exponential model to describe the evolution of very short (1,4s) to very long sport performances (400 hours), six orders of magnitude

apart; *ii*) a common law of progression in most sports toward ecophysiological limits; *iii*) major physiological constraints in the progression pattern of rowing, cross-country skiing, swimming, triathlon and ICU cycling record; *iv*) technology as a unique way to push back human physiological limits under environmental constraints, but with a major drawback: a constantly growing dependence on it.

In an accelerated process occurring over the XIXth and XXth centuries, sport performances took advantage of a common techno-physiological progression pathway [18] but soon reach their limits. Environmental constraints now add to these development barriers. Human performance progression during the XXIth century may essentially rely on technological improvements with its own reliance on energy and economy.

Acknowledgments

We thank Dr Robin Choudhury for careful review and thank the INSEP teams for full support.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: FDD OH JFT. Performed the experiments: FDD GB NEH MG. Analyzed the data: GB VT MT. Wrote the paper: FDD JFT.

References

- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escalano S, El Helou N, et al. (2008) The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS One* 3: e1552.
- Nevill AM, Whyte GP (2005) Are there limits to running World Records? *Med Sci Sports Exerc* 37: 1785–1788.
- Smith DJ (2003) A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Med* 33: 1103–1126.
- The international rowing federation website. Available: <http://www.worldrowing.com>.
- The Oxford Cambridge Boat Race website. Available: <http://www.theboatrace.org>.
- Wikipedia free encyclopedia website. Available: <http://en.wikipedia.org>.
- The Vasaloppet website. Available: <http://www.vasaloppet.se>.
- Elfstedentocht website. Available: <http://www.dr.nl/sport/1lstedentocht>.
- World Sailing Speed Record Council website. Available: <http://www.sailspeedrecords.com>.
- France ski de vitesse website. Available: <http://www.ki-france.com>.
- Union cycliste internationale website. Available: <http://www.uci.ch>.
- International Human Powered Vehicle Association website. Available: <http://www.ihpva.org>.
- Kitzbüel Hahnenkamm website. Available: <http://www.hahnenkamm.com>.
- Ironman Hawaii website. Available: <http://www.honuhalironman.com>.
- Channel Swimming Association website. Available: <http://www.channelswimmingassociation.com>.
- More JJ (1977) The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory, in *Numerical Analysis. Proceedings of the 1977 Dundee conference on numerical analysis*. In: Watson GA, ed. pp 105–116.
- Mosegaard K, Malcolm S (2002) Monte Carlo analysis of inverse problems. *Invers Probl* 18: 29–54.
- Fogel R (2003) "The escape from premature death and hunger". Cambridge: Cambridge university press.

19. Fiskestrand A, Seiler KS (2004) Training and performance characteristics among Norwegian international rowers 1970–2001. *Scand J Med Sci Sports* 14: 303–10.
20. Eisenman PA, Johnson SC, Bainbridge CN, Zupan MF (1989) Applied physiology of cross-country skiing. *Sports Med* 8: 67–79.
21. Rusko HK (1992) Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 24: 1040–7.
22. Van Ingen Schenau GJ, de Koning JJ, de Groot G (1994) Optimisation of sprinting performance in running, cycling and speed skating. *Sports Med* 17: 259–75.
23. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001) Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 31: 325–37.
24. De Koning JJ, Houdjik H, De Groot G, Bobbert MF (2000) From biomechanical theory to application in top sports: the klap skate story. *Biomech* 33: 1225–1229.
25. Kayser B, Mauron A, Miah A (2007) Current anti-doping policy: a critical appraisal. *BMC Med Ethics* 8: 2.
26. Len S, Berthelot G, Toussaint JF (2008) La performance sportive Française à Pékin: Quels constats ? Quels enseignements ? Quelles perspectives ? In: INSEP, ed. *The Beijing Human Performance Report. Bilan des performances à Pékin*. Paris. In press.

Annexe 8:

Article original et intégral - Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism.

Référence: Guillaume M, El Helou N, Nassif H, Berthelot G, Len S, et al. (2009) Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism. PLoS ONE 4(10): e7573. doi:10.1371/journal.pone.0007573.

Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism

Marion Guillaume^{1*}, Nour El Helou^{1,2}, Hala Nassif^{1,2}, Geoffroy Berthelot¹, Stéphane Len¹, Valérie Thibault¹, Muriel Tafflet^{1,3}, Laurent Quinquis¹, François Desgorces², Olivier Hermine^{2,4}, Jean-François Toussaint^{1,2,5}

1 IRMES, INSEP, Paris, France, **2** Université Paris-Descartes, Paris, France, **3** INSERM unit 970, Paris, France, **4** Service d'hématologie Hôpital Necker and CNRS UMR 8147, Paris, France, **5** CIMS, Hôtel-Dieu, Assistance Publique Hôpitaux de Paris, Paris, France

Abstract

A previous analysis of World Records (WR) has revealed the potential limits of human physiology through athletes' personal commitment. The impact of political factors on sports has only been studied through Olympic medals and results. Here we studied 2876 WR from 63 nations in four summer disciplines. We propose three new indicators and show the impact of historical, geographical and economical factors on the regional WR evolution. The south-eastward path of weighted annual barycenter (*i.e.* the average of country coordinates weighting by the WR number) shows the emergence of East Africa and China in WR archives. Home WR ratio decreased from 79.9% before the second World War to 23.3% in 2008, underlining sports globalization. Annual Cumulative Proportions (ACP, *i.e.* the cumulative sum of the WR annual rate) highlight the regional rates of progression. For all regions, the mean slope of ACP during the Olympic era is 0.0101, with a maximum between 1950 and 1989 (0.0156). For European countries, this indicator reflects major historical events (slowdown for western countries after 1945, slowdown for eastern countries after 1990). Mean North-American ACP slope is 0.0029 over the century with an acceleration between 1950 and 1989 at 0.0046. Russia takes off in 1935 and slows down in 1988 (0.0038). For Eastern Europe, maximal progression is seen between 1970 and 1989 (0.0045). China starts in 1979 with a maximum between 1990 and 2008 (0.0021), while other regions have largely declined (mean ACP slope for all other countries = 0.0011). A similar trend is observed for the evolution of the 10 best performers. The national analysis of WR reveals a precise and quantifiable link between the sport performances of a country, its historical or geopolitical context, and its steps of development.

Citation: Guillaume M, Helou NE, Nassif H, Berthelot G, Len S, et al. (2009) Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism. PLoS ONE 4(10): e7573. doi:10.1371/journal.pone.0007573

Editor: Alejandro Lucia, Universidad Europea de Madrid, Spain

Received: July 15, 2009; **Accepted:** September 22, 2009; **Published:** October 28, 2009

Copyright: © 2009 Guillaume et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: We thank the Centre National de Développement du Sport for financial contribution. This funder had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: irmes@insep.fr

Introduction

Olympic Games (OG) were reintroduced in 1896 in order to promote pacific relations between nations, but many sports competitions in the 20th century favored direct confrontation in a "gourmand" quest of world records (WR). Previous studies have underlined the link between individual physiology and maximal human species performances [1,2]. Others studies [3,4] analyzed the Olympic performances of nations through their medals number and showed the effect of historical and geographical factors. However the number of medals obtained over a 4 year period gives less information than a study of quantifiable events obtained on a yearly basis. These allow for a more precise understanding of national strategies and of states involvement in high-level sport competitions. WR are the extreme values of human physiological capabilities. We tested the hypothesis that world records may also reflect the impact of historical or political events (World Wars, Great Depression, Cold War, Cultural Revolution, USSR end) on human phenotype as assessed by sport performances.

Materials and Methods

Data

Data consist of 2876 WR and 4672 Olympic medals from 4 quantifiable disciplines of summer OG: Track and Field, Swimming, Weightlifting and Cycling. Data were gathered from 1896 to 2008 (modern Olympic era) [5–10]. For each WR and Olympic medal, citizenship of the athlete and location of the event are collected. Forty-two host nations generated "Home WR" and 16 generated Home Olympic Medals (*i.e.* 16 OG organizers). The highest performance of the 10 best performers have also been gathered every year in Track and Field resulting in 36861 data points. It will be referred to as "10 best" (*i.e.* regrouping the personal best value established by each of the 10 best performers every year).

Variables

Sixty three nations possess WR. In our analysis:

- Russia represents Russia before and after soviet era, USSR, EUN (at the OG 1992, some countries of the ex-USSR

competed in the EUN team (Equipe Unifiée) for the Commonwealth of Independent States),

- Czechoslovakia represents Czechoslovakia, Czech Republic and Slovakia,
- Germany represents Federal Republic German and unified Germany,
- GDR represents German Democratic Republic.

Nations are distributed in geographical world regions (North America: USA with 528 WR and Canada with 29; Western Europe with 676; Eastern Europe with 361) based on the International Olympic Committee classification. The distribution of European countries is adjusted to history. After 1945, Bulgaria, Romania, Hungary, Poland, Czechoslovakia, Yugoslavia and East-Germany are considered in Eastern Europe. After 1990, these countries join Western Europe, whereas Belarus and Kazakhstan remain in Eastern Europe. We then identify 11 regions: North America, Western Europe, Russia, Eastern Europe, Oceania, China, North Pacific, Africa, Asia, Caribbean and South America (Table S1), according to Andreff et al. [4].

WR and Olympic Medals

WR numbers are measured for each region, and compared to Olympic Medal numbers.

Geographical Analysis

Usually, the barycenter is defined as the average of several points, weighted by specific coefficient. Here, the points are the geographical coordinates of the country capital; and the weighting coefficients are the WR number of this country.

The barycenter \bar{R}_t of the WR geographical coordinates (latitude, longitude) is calculated yearly, and defined as:

$$\bar{R}_t = \bar{R}_{La}(t) + \bar{R}_{Lo}(t)$$

For the year t , $\bar{R}_{La}(t)$ the latitudes barycenter and $\bar{R}_{Lo}(t)$ the longitudes barycenter are defined as:

$$\bar{R}_{La}(t) = \frac{\sum_c La_c WR_{c,t}}{WR_t} \text{ and } \bar{R}_{Lo}(t) = \frac{\sum_c Lo_c WR_{c,t}}{WR_t}$$

c is the country, La_c the latitude of the capital city of the country c , and Lo_c the longitude of the capital city of the country c . \bar{R}_t defines the path of the WR barycenter throughout the Olympic era.

Home WR

If a performer establishes a new WR in his own country - i.e. WR performer citizenship and WR location coincide - the WR is defined as a ‘‘Home WR’’.

Two indicators are introduced in order to further describe Home WR.

- Factor H_t , the annual ratio of Home WR over the total WR number per year t

$$H_t = \frac{HomeWR_t}{WR_t}$$

with $HomeWR_t$ the total of WR established ‘‘at home’’ for the year t , and WR_t the total of WR for the year t .

- Factor H_c , the ratio over the whole Olympic era of Home WR number of the country c ($HomeWR_c$) over the total of WR established in the host country c ($HostWR_c$):

$$H_c = \frac{HomeWR_c}{HostWR_c}$$

Thereafter, H_c will be defined as ‘‘the rate of return’’ of a country organizing competitions.

Historical Analysis

The cumulative proportions are used to describe WR secular evolution.

- Factor a_t is the annual ratio of the number of WR over the total number of WR:

$$a_t = \frac{WR_t}{WR}$$

- G is the annual cumulative proportion over the Olympic era:

$$G_{t_0,t} = \sum_{t_0}^t a_t$$

for the first year t_0 , until year t . Factor G defines the global (all regions) annual cumulative rate of progression of WR.

- Factor $a_{r,t}$ is the annual ratio of the number of WR for the region r over the total number of WR:

$$a_{r,t} = \frac{WR_{r,t}}{WR}$$

- P is the annual cumulative proportion over the Olympic era:

$$P_{r,t_0,t} = \sum_{t_0}^t a_{r,t}$$

for the first year t_0 , until year t and the region r . Factor P defines the annual cumulative WR progression rate for each region.

For the evolution analysis of factors P and G , the mean slope of annual cumulative proportions (S) is calculated by linear regressions over 3 periods: 1918–1949, 1950–1989, and 1990–2008. S is defined as:

$$S(G) = \frac{\Delta G_{t_0,t}}{\Delta t} \text{ and } S(P) = \frac{\Delta P_{r,t_0,t}}{\Delta t}$$

We will notify $S_1 = S_{1918-1939}$, $S_2 = S_{1950-1989}$ ($S_{2a} = S_{1950-1969}$, $S_{2b} = S_{1970-1989}$), and $S_3 = S_{1990-2008}$.

The cumulative proportions for the 10 best have been similarly calculated (Figure S1).

Statistical analysis is performed with the R software [11]. One way linear regressions were used to calculate for the slope of factor G and P . Statistical significance was considered at $p < 0.05$.

Results

WR and Olympic Medals

By region, WR number is linearly related to Olympic Medals number (Figure 1).

Geographical Analysis

The latitude of the WR barycenter (Figure 2A) has low variations until 1986 (mean: 43°47'±8°7'). It decreases until 1999, and remains quasi-constant (mean: 28°34'±5°33') since then. The longitude grows and reaches two East peak, one in 1957 and another in 1999. The coordinates of the barycenter for the first four periods are located in Western Europe, and then moves toward South-East (13°50' toward South, 33°46' toward East) between 1990 and 2008 (Figure 2B).

Regional and National Analysis

As for Olympic medals, the major two regions that hold WR are North America (26.1%, 27.8%, respectively for WR and Olympic Medals) and Western Europe (23.5%, 30.6%) (Figure 3). Nations rank in the WR list and medal list are: USA (26.1%, 25.8% respectively), Russia (18.4%, 9.6%), GDR (6.1%, 5.4%) and Germany (5.7%, 5.8%).

Analysis of Home WR

The percentage of WR established “at home” is 54.9%. Evolution of national factor H_t reveals two phases (Figure 4). The first one from 1897 to 1946 shows increasing values (slope = 0.0132, mean = 79.88%), the second from 1947 (H_{1947} = 84.6%) to 2008 (H_{2008} = 23.3%) shows decreasing values (slope = -0.0094, mean = 47.63%). Between 1990 and 2008, factor H_t has stabilized at 23.14%.

The rate of return for countries organizing competitions (H_C) is 88.3% (361/409) for Russia, 85.6% (458/535) for USA, and 71.1% (54/76) for Eastern Germany (Table 1).

Historical Analysis

Factor G progresses in 5 successive periods. The progression is slow for the 1897–1918 and 1939–1950 periods. Progression is similar in 1918–1939 and 1990–2008 eras, (S_1 = 0.0087, S_3 = 0.0094) and steeper during the 1950–1990 period, (S_2 = 0.0155) (Figure 5, Table 2).

Regional Historical Analysis

The progression of Western Europe during the second period (1950–1989) is lower (S_2 = 0.0018) than that of the first period (1918–1949: S_1 = 0.0040). During the second period, the progressions of USA (S_2 = 0.0046), Russia (S_2 = 0.0038) and Eastern Europe (S_2 = 0.0045) are almost parallel. During the last period (1990–2008), the rate of Russian and Eastern Europe progression decreases (S_3 = 0.0008 and S_3 = 0.0003 respectively); whereas China’s progression accelerates (S_3 = 0.0020) (Figure 6).

The global and periodic slopes for every region are described in table 2.

A similar analysis of the 10 best performers each year shows parallel progressions for Western and Eastern Europe, North America and Russia from 1950 to 2008 (Figure S1).

Discussion

Through a regional analysis of WR evolution during the Olympic era, this study underlines the positive or negative impact of historical (World Wars I and II, Cold War), political (Cultural Revolution), economical (Great Depression, Emergence of China) and sports factors (OG organisation, swimsuits introduced in 1999) on human performance. The WR analysis through a national prism proposes a new measurement tool of the history of human physiology during the 20th and 21st century. Bernard and Busse [3] have shown the link between economy and sports performances, reflecting a reading of political and economical rivalries: phases of

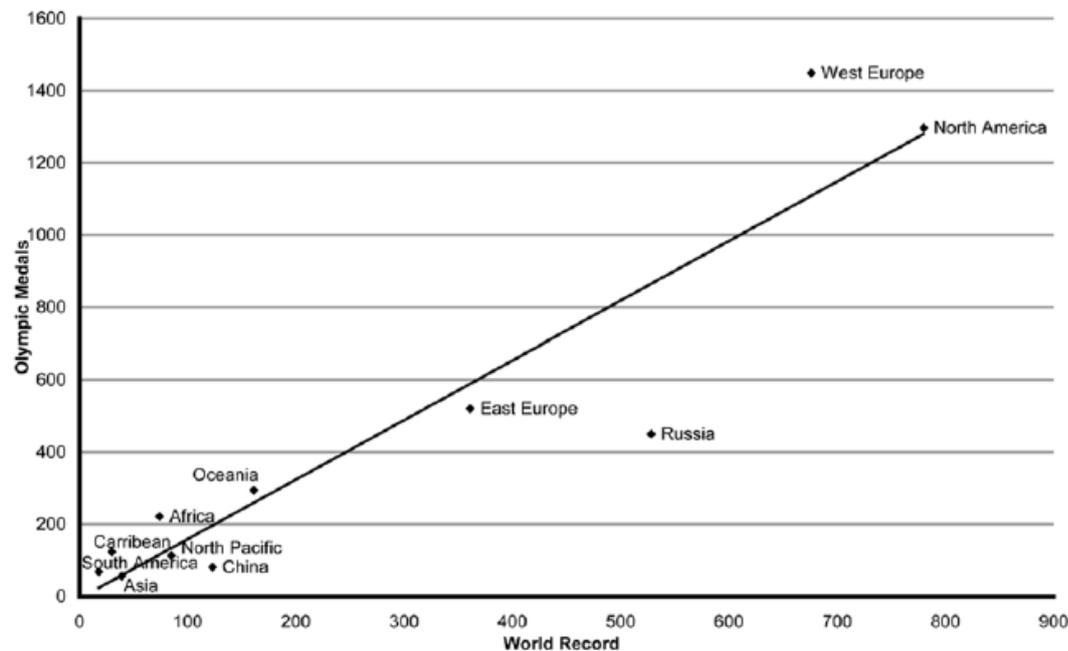


Figure 1. Relation between WR and Olympic medals: the correlation is established by world regions between the total number of WR and medals (Linear model: $y = 1.65 + 6.35x$, $F(1, 9) = 58.33$, $p < 0.001$). The correlation coefficient is 0.93. doi:10.1371/journal.pone.0007573.g001

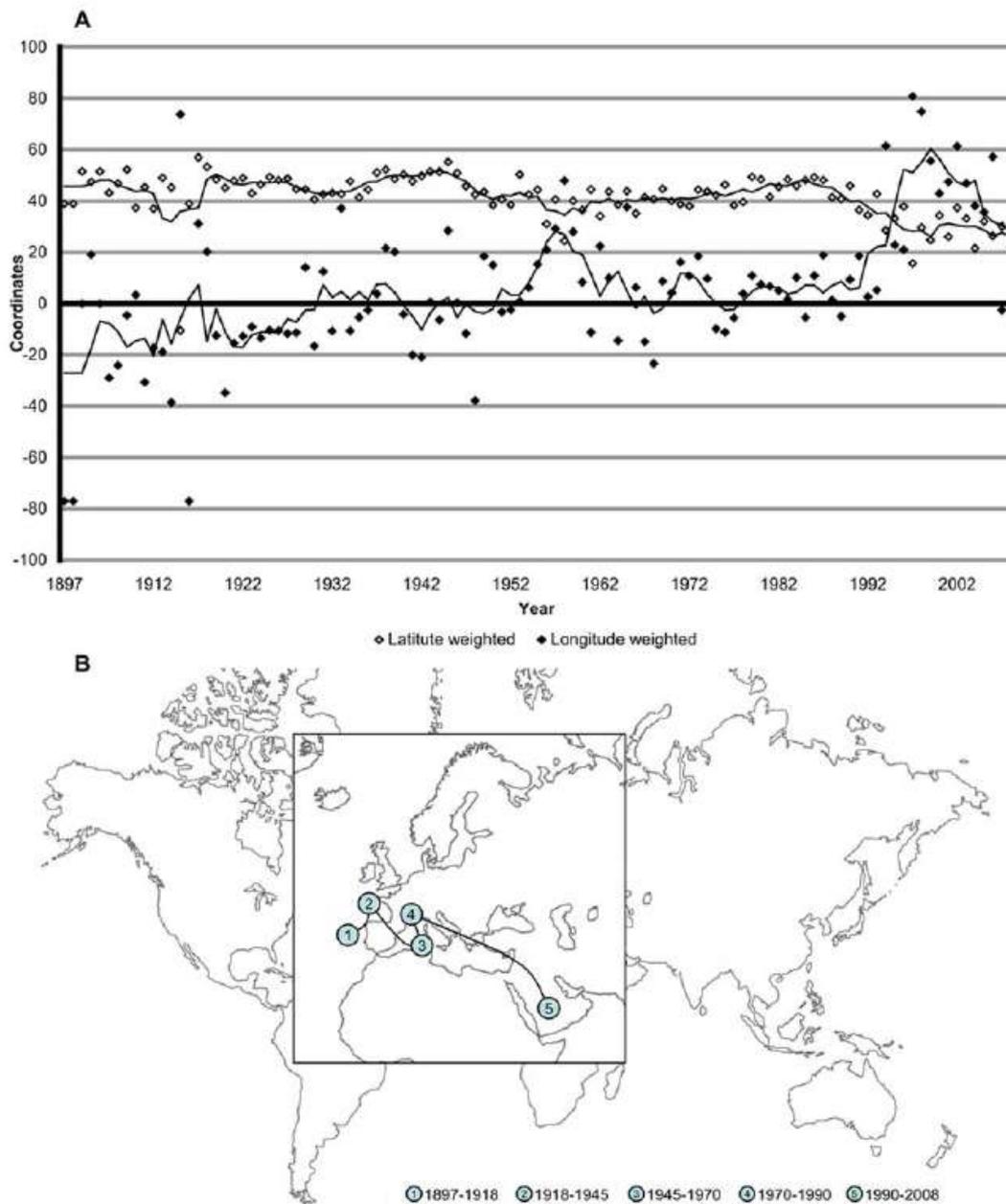


Figure 2. Geographical analysis of WR. **A.** Yearly longitude and latitude of the WR from 1897 to 2008. Coordinates are angular measurement in degree. **B.** The path of the barycenter of WR from 1897 to 2008. For 5 historical periods, the average barycenter is calculated: $\bar{R}_{1897-1918}(42^{\circ}31', 14^{\circ}31')$, $\bar{R}_{1918-1945}(47^{\circ}26', 2^{\circ}53')$, $\bar{R}_{1945-1970}(41^{\circ}13', 7^{\circ}15')$, $\bar{R}_{1970-1990}(44^{\circ}01', 5^{\circ}09')$, $\bar{R}_{1990-2008}(31^{\circ}10', 37^{\circ}17')$, respectively (latitude, longitude). doi:10.1371/journal.pone.0007573.g002

development in the different world regions also match the historical period described here.

Our calculation of weighted annual barycenters is both a geographical and historical indicator. The average barycenters (Figure 2B) are located in Europe until 1990, then shifts towards south-east. The highest percentage of WR is European (23.5% West Europe, 12.6% East Europe, 18.4% Russia) (Figure 3) and most of OG are organised in this region (15 of 26 summer OG) [12]. Moreover, the path of WR barycenter follows the context of economical development for Western Europe, USA and

China. Europe is the first world sport pole during the Olympic era. On the other hand, five out of the 63 nations holding at least one WR established more than 100 of them: USA (751), Russia (528), GDR (339), Germany (174), Australia (155) and China (123).

Others studies have established the link between Olympic medal number of a country and its political, cultural or economical development [3,4]. The novelty is to evaluate here the link between national strategies and the evolution of WR. Moreover, the study of WR allows for precisely measuring the

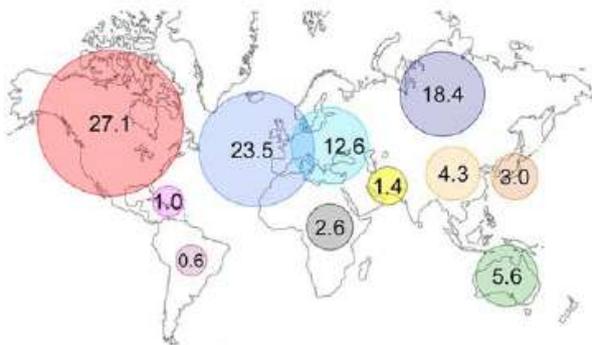


Figure 3. Proportion of WR by world region. North America: 27.1%, Western Europe: 23.5%, Russia: 18.4%, Eastern Europe: 12.6%, Oceania: 5.6%, China: 4.3%, North Pacific: 3.0%, Africa: 2.6%, Asia: 1.4%, Caribbean: 1.0%, South America: 0.6%. doi:10.1371/journal.pone.0007573.g003

performance gaps between countries, and the Home WR variable (42 host nations for WR versus 16 only for OG).

Home WR

Until 1946, the majority of WR were established “at home” (Figure 4). The geographical distance or the 1929 crisis made travels difficult and expensive for non-European countries [12]. After World War II, the Home WR rate decreased from 79.9% to 23.3% in 2008, with the expansion of travels and the participation of a growing number of athletes and nations. Since 1990, this rate stagnates: the new regions involved in sport may not have the infrastructures to host major international competitions [12]. The change of the barycenter for the last period shows the actual globalization with Africa and China appearing in the WR archives.

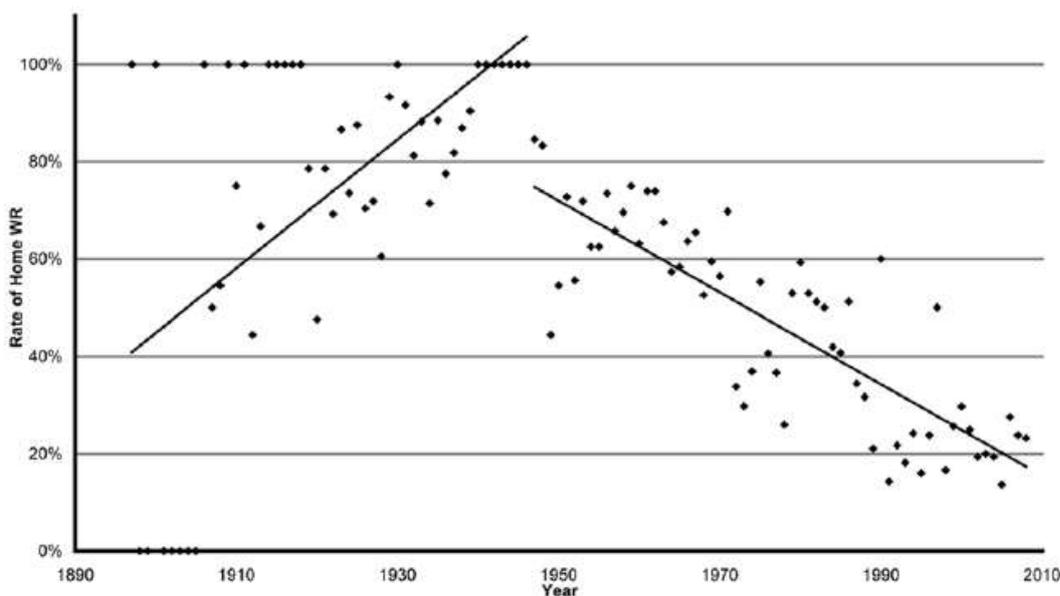


Figure 4. Evolution of factor H_t , from 1897 to 2008: yearly, Home WR over the WR total. H_t increases from 1897 to 1946 (Linear Model: $y = 0.013x - 24.71$, $F(1, 48) = 23.53$, $p = 0.01$), and decreases since 1947 (Linear Model $y = -0.0095x + 19.18$, $F(1, 60) = 143$ $p < 0.001$). doi:10.1371/journal.pone.0007573.g004

USA, Russia and GDR organised a large part of international competitions and had a particularly high rate of return for Home WR. Several hypotheses can be raised: the motivation of the athlete hoping for greater recognition, public support, the lack of jet lag or cultural lag [13], the establishment of a policy of return (government pressure on the athletes [14,15]) or more conciliatory checks of the validity of performances and lighter anti-doping procedures.

Global Curve

The slope of the global annual cumulative proportions stagnates between 1912 and 1918, then increases until 1949 ($S_1(G) = 0.0075$) (Figure 5). While it almost doubles between 1950 and 1989 ($S_2(G) = 0.0156$), the Cold War period starts with the Truman’s doctrine formulation in 1947 [16] and the Marshall plan for West-European and North American countries, followed by the creation of the Cominform and the formulation of Zhdanov’s doctrine for Russia and East-Europe [17,18]. The slope of progression for the 1990–2008 era decelerates ($S_3(G) = 0.0094$) as WR rarefy [1]. A last and small increase appears in 1999 with the first women record in weightlifting [11], and the new records in swimming partially due to the first generation swimsuits [19–21]. The deceleration of WR progression after 1988 follows the new geopolitics of the 1990 (Fall of Berlin Wall and USSR end). It is also the end of an exacerbated period of competition motivated by Cold War.

Western Europe

Western Europe is the first sport region until 1939. After the Second World War, Western Europe has to rebuild its territory and economy [16,17]: its annual cumulative proportion slows. Analysis of the 10 best performers (Figure S1) shows a paradox: although constantly present after 1940 among the top 10, it does not receive the dividends of this investment as WR. Western Europe does not seem to be as involved as USA and Soviet Union

Table 1. Rate of return of Home WR (H_C) of a country organizing a competition.

	WR beaten in the country 1897–2008 (number)	Home WR number (%)
Russia	409	361 (88.3)
USA	535	458 (85.6)
GDR	76	54 (71.1)
Nederland	64	39 (60.9)
Hungary	51	30 (58.8)
China	72	41 (56.9)
Bulgaria	41	23 (56.1)
Poland	42	23 (54.8)
Australia	142	77 (54.2)
Denmark	29	15 (51.7)
Great Britain	66	34 (51.5)
Czechoslovakia	43	22 (51.2)
France	88	45 (51.1)
Austria	44	22 (50.0)
Germany	261	120 (46.0)
Japan	123	50 (40.7)
Finland	62	25 (40.3)
Sweden	78	26 (33.3)
Italia	76	16 (21.1)
Canada	75	11 (14.7)

H_C of countries with a WR total above 20. Data are classified by decreasing order of percentages of Home WR beaten.
doi:10.1371/journal.pone.0007573.t001

in confrontations for the first places, a high field opposition between the two blocs. With the new geopolitical distribution after 1990, its slope of progress slightly reincreases, and yields new record rates due to swimming performances after 1999 [19–21].

USA

First competitions until World War II were essentially hard-fought between Europe and North America. After the Great Depression, the Second World War and the Cold War have stimulated American economy [16]. In 1947, the growth of WR accelerates. USA obtains the highest slope during the Cold War, $S_2(P_{North\ America}) = 0.0046$. After 1989 and despite swimsuits, the slope of curve falls: $S_2(P_{North\ America}) = 0.0015$. USA performances may have reached their maximum in the early 70s.

Russia

Russia effectively begins its WR series in 1935 (Figure 6). This period corresponds to the beginning of a massive industrial investment wanted by Stalin in the five-year plans, and to the Great Purges of the Communist Party and first Moscow Trials [17]. In 1947, Russia formulates the Zhdanov’s doctrine [18]. The Russian curve increases again in 1950. In 1952, for the first time since the 1917 revolution, the Soviet Union participates to the Helsinki OG. Between 1950 and 1989, Russian growth is the highest ($S_2(P_{Russia}) = 0.0038$) though weaker than the US one. In 1983, the Russian curve shows a slowdown at the time of Perestroika [17] and Gorbachev’s Glasnost. After 1990, the progression rate of Russian WR declines to $S_2(P_{Russia}) = 0.0008$ (4.7 times lower). The Warsaw Pact dissolved; Russia enters a transition phase. The growth of Russians performances reached its maximum early in the 80s and stagnates in the 90s. This reminds the evolution of Russian life expectancy that no longer progressed after 1975 [22].

Eastern Europe

USSR pace is followed by popular democracies in Eastern Europe [12]. The first record of the region dates back to 1946. Until 1970, its

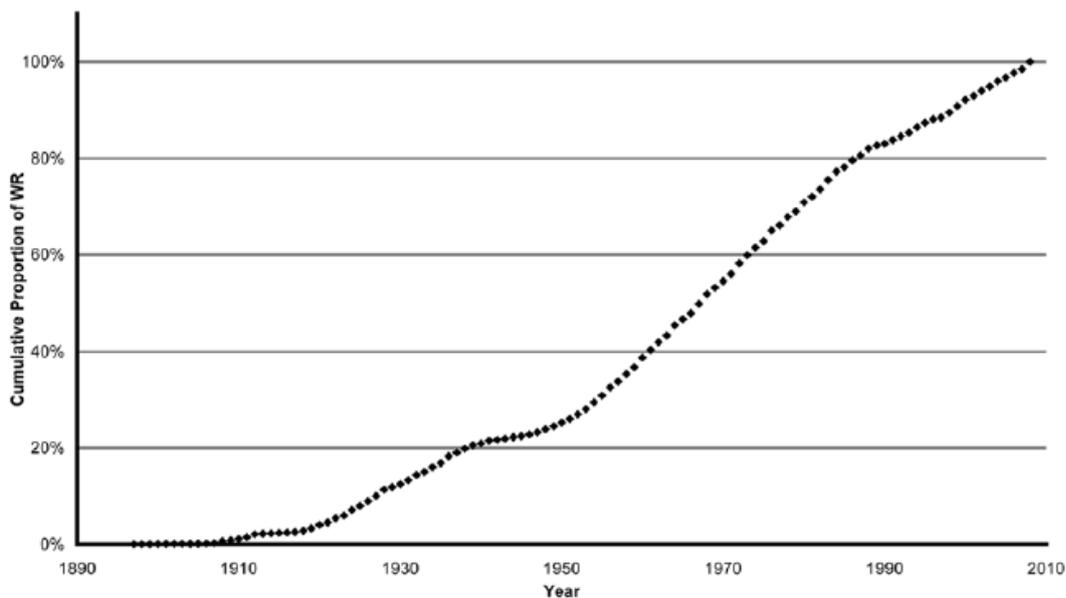


Figure 5. Evolution of factor G: Global (all regions) Annual Cumulative Proportions of WR (Linear Model: $y = 0.0101x - 19.32$, $F(1, 110) = 2530$, $p < 0.001$).
doi:10.1371/journal.pone.0007573.g005

Table 2. Global slopes ($S(G)$ for all regions) and periodic slopes ($S(P_r)$ for every region).

Region	Year of First WR	Slope Global	Slopes by periods			
			1897–2008	1918–1949	1950–1989	1990–2008
Global	1897	0.0101	0.0075	0.0156		0.0094
North America	1897	0.0029	0.0021	0.0046		0.0015
Western Europe	1901	0.0023	0.0040	0.0018		0.0022
Russia	1917	0.0025	0.0006	0.0038		0.0008
				1950–1969	1970–1989	
Eastern Europe	1946	0.0026	0.0003	0.0016	0.0045	0.0003
China	1956	0.0007		0.0002		0.0020
Oceania	1910	0.0006	0.0001	0.0008		0.0011
Africa	1928	0.0002	0.0002	0.0002		0.0007

$p < 0.001$ for all results except Eastern Europe 1918–1949 ($p = 0.087$).
doi:10.1371/journal.pone.0007573.t002

progression is low, $S_{2a}(P_{Eastern\ Europe}) = 0.0016$. Between 1970 and 1989, the curve increases sharply, $S_{2b}(P_{Eastern\ Europe}) = 0.0045$. East Germany holds 48% of Eastern European records and presents the greatest slope of this region as GDR Communist Party looks for worldwide recognition [12,14]. Until Germany’s reunification, GDR athletes dominate sports competitions. Thereafter, the Stasi archives showed a sport organization with early and methodical detecting systems and institutionalized State doping [12,14–15,23]. After German reunification, the former countries of Eastern Europe

reorganise their system and greatly reduced the budget share devoted to sports [24].

China

The first Chinese record dates back from 1956. At that time, Mao Zedong declares “Sport upholds the dignity and independence of the Chinese nation” [25]. The Chinese government introduces the “Ten-year Guidelines Sports development” [25]. Then the progression of Chinese WR is brutally stopped in 1966,

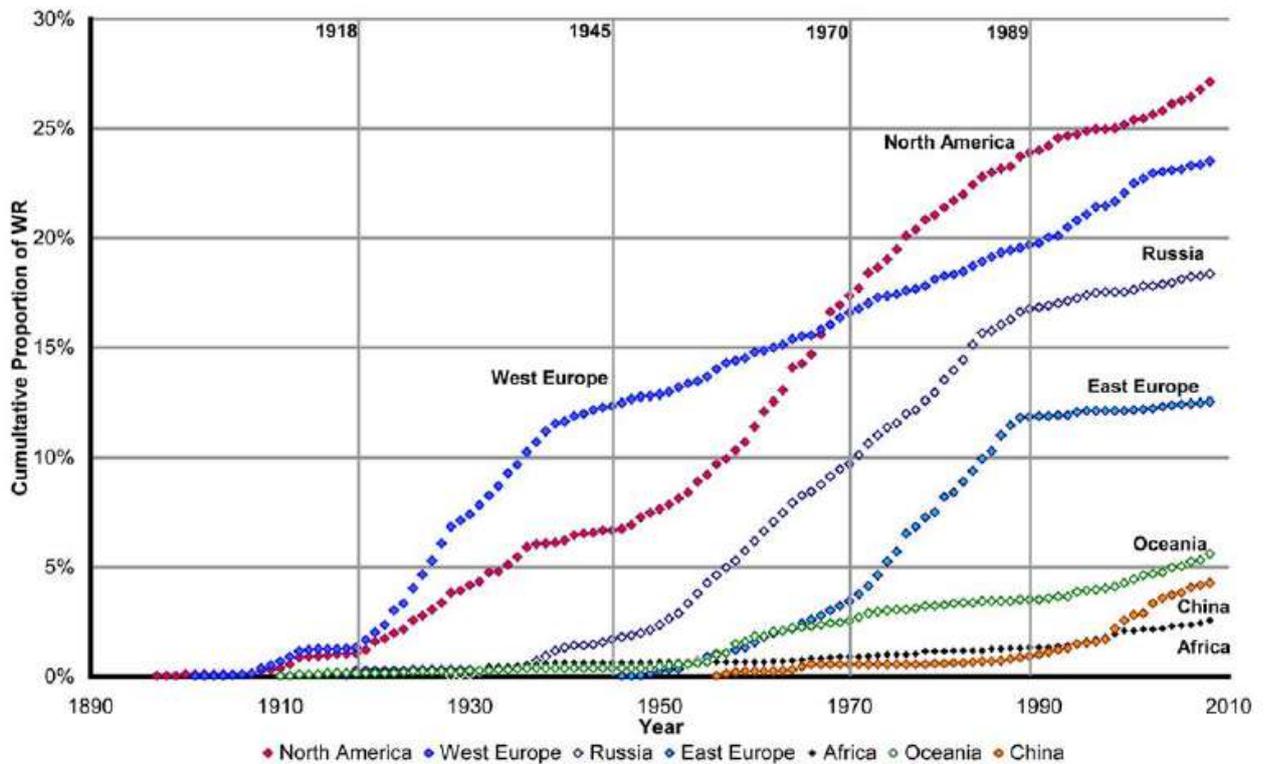


Figure 6. Evolution of factor P: Annual Cumulative Proportions of WR by region. P is calculated for 7 regions: North America, Western Europe, Russia, Eastern Europe, Oceania, China and Africa.
doi:10.1371/journal.pone.0007573.g006

when China begins its Cultural Revolution. For 10 years the development of high-performance level is interrupted. Three years after the death of Mao Zedong, China breaks a new WR, while his government changes policy [25]. After its participation to the 1984 OG, decision is taken to accelerate the reforms of the sport system and to invest in high-level sports and organization of international competitions [12,25]. In 1986, the Chinese curve increases its slope of progression. During the period of maximal economic development (1990–2008), the slope of growth of Chinese WR accelerates (at a 10 times higher pace, $S_g(P_{China}) = 0.0020$), while Beijing becomes candidate to host the OG [12]. Many German and Russian coaches are recruited [26]. Chinese WR include a major representation of women performances (weightlifting female champions hold 50.4% of all Chinese WR). The Chinese WR curve increases during the 5th period, when other regions slow down, starting to reach physiological limits [1,2].

Oceania and Africa

Oceania curve (Australia: 155 WR, New Zealand: 6 WR) really starts in 1956, with the first Oceania's OG in Melbourne, and increases again with the Sydney OG (2000) and the numerous swimming records [19–21].

Early African WR were due to Egyptian weightlifters but 50% of them come from present East African runners (Kenya: 19, Ethiopia: 14, Tanzania: 1, Uganda: 1). Africa is mainly represented in the last period with a 3.8 fold slope increase.

Cold War

During Cold War, sports competitions like other areas (Space and Moon race, Nuclear arms race) become places of ideological confrontation [16,26]. US candidatures to organize OG have multiplied [12]. From 1970 to 1989, the ACP slopes of Russia, East-Europe and North America are almost parallel. The doping state of GDR athletes is now known and published [14–15,23]. That of Soviet athletes is recognized by athletes and coaches from the former USSR [15,27]. All of them compete against American athletes with the following progression slope: $S_2(P_{Eastern\ Europe}) = 0.0031$; $S_2(P_{Russia}) = 0.0038$; $S_2(P_{USA}) = 0.0046$. In 1988, Soviet and American athletes met one last time at the Seoul OG, after a 12 year break. Seoul OG resulted in 2 Soviet records, 5 East-European and 9 American records for a total of 19 versus 12 in Los Angeles (1984) and 13 in Barcelona (1992); this shows the particular intensity of this last Cold War competition that reached an unprecedented peak of atypical performances including the everlasting sprint world records by Florence Griffith-Joyner [28].

References

- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. (2008) The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. *PLoS ONE* 3(2): e1552. doi:10.1371/journal.pone.0001552.
- Desgorges FD, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii: Ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS ONE* 3(11): e3653. doi:10.1371/journal.pone.0003653.
- Bernard AB, Busse MR (2004) Who Wins the Olympic Games: Economic Resources and Medal Totals. *Rev Econ Stat* 86(1): 413–417.
- Andreff W, Andreff M, Poupaux S (2008) Les déterminants économiques de la performance Olympique : prévision du nombre de médailles gagnées aux Jeux de Pékin. *Revue d'Economie Politique* 118(2): 135–169. doi: REDP.182.01.35.
- International Olympic Committee (IOC) official website. <http://www.olympic.org>.
- Swimming U home. <http://www.usaswimming.org>.
- FINA. Official HNA website. <http://www.fina.org>.
- Chidlovski AR Lift Up, History of Olympic Weightlifting. <http://www.chidlovski.net/liftup>.
- Sport Links. <http://www.geocities.com/Colosseum/Arena/3170/sport.html>.
- databaseSports.com. www.databaseolympics.com.
- R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Augustin JP, Gillon P (2004) L'Olympisme: Bilan et enjeux géopolitiques. Paris: Armand Colin.
- Nevill AM, Holder RL (1999) Home Advantage in Sport. An Overview of Studies on the Advantage of Playing at Home. *Sports Med* 28(4): 221–236.
- Hurtelize C (1999) L'invention du sport de haut niveau : Sport politique et politique du sport de la RDA. *Géopolitique* n° 66, pp 35–44.
- Bordry P (2008) Le dopage aux Jeux Olympiques: De l'impunité à la tolérance zéro. In: Beijing 2008. Insights in Olympic and Paralympic Sport Performance (Pékin 2008 Regards croisés sur la Performance Sportive Olympique et Paralympique). Paris: Éditions de l'INSEP. pp 179–185.

Limitations

In order to have international comparison, we only took the four quantifiable summer disciplines, as two countries only in southern hemisphere (Australia and New-Zealand) have WR in speed skating [29]. We also adjusted the country distribution according to the geopolitics of 1945 and that of 1990. This deprives of a strict secular follow-up of East-European countries, but the choice is relevant for a focus on the Cold War geopolitical interactions.

Conclusion

This analysis proposes new indicators of human performances throughout the Olympic era. Annual cumulative proportions of WR highlight economical, geopolitical and developmental challenges around sport during the 20th and 21st centuries. Detaining a record allows the athlete, his nation and sponsors to win world recognition. Regions of the world that hold a significant number of them have been political leaders or strong emerging economic forces [12]. The measure of WR progresses provides quantifiable indicators to follow-up historical and geostrategic decisions. Sport may therefore be an interesting tool for measuring development. Such a vision might benefit from upcoming models integrating broader parameters such as gross domestic product, life expectancy or demography.

Supporting Information

Figure S1 Annual Cumulative Proportions of 10 best by region for Track and Field. P is calculated for 8 regions: North America, Western Europe, Russia, Eastern Europe, Oceania, China, Africa and Caribbean.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0007573.s001 (0.33 MB TIF)

Table S1 Distribution of countries according to regions and periods. NAm: North America, SA: South America, Car: Caribbean, Afr: Africa, WEu: Western Europe, EEu: Eastern Europe, Rus: Russia, Asi: Asia, Chi: China, NP: North Pacific, Oce: Oceania.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0007573.s002 (0.03 MB XLS)

Acknowledgments

We thank INSEP teams for their full support.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: MG NEH JFT. Performed the experiments: MG NEH GB MT JFT. Analyzed the data: MG NEH HN SL VT LQ FDD OH. Wrote the paper: MG NEH JFT.

16. Zinn H (2005) *A people's History of the United States. 1942-Present*. New-York: HarperCollins Publisher.
17. Riasanovsky NV (1993) *A History of Russia*. Oxford: Oxford University Press.
18. Roberts G (2006) *Stalin's Wars from World War to Cold War, 1939-1953*. New Haven and London: Yale University Press, 318 p.
19. Toussaint HM, Truijens M, Elzinga MJ, Van de Ven A, de Best H, et al. (2002) Effect of a fast-skin™ 'body' suit on drag during front crawl swimming. *Sports Biomech* 1(1): 1–10.
20. Len S, Berthelot G, Thibault V, Toussaint JF (2009) Bilan des performances à Pékin. In: "Beijing 2008. Insights in Olympic and Paralympic Sport Performance" (Pékin 2008 Regards croisés sur la performance sportive olympique et paralympique). Paris: Éditions de FINSEP, pp 259–263.
21. Goodgame C (2008) High-Tech Swimsuits: Winning Medals Too. *Time*. Available: <http://www.time.com/time/world/article/0,8599,1832434,00.html>. Accessed 2008 Aug 13.
22. de Rooy C (2008) Life Expectancy as a Government Performance Measure in Russia. UNICEF, Available: http://www.unicef.org/russia/Article_Life_Expectancy_12_March_Eng-final.pdf.
23. Franke WW, Berendonk B (1997) Hormonal doping and androgenization of athletes: a secret of program of the German Democratic Republic government. *Clin Chem* 43(7): 1262–1279.
24. Andreff W, Nys JF (2001) *Economie du Sport*. Paris: Presses universitaires de France, pp 118–121.
25. Hwang DJ, Chang LK (2008) Sport, Maoism and the Beijing Olympics: One Century One Ideology. *China perspectives*, n°2008/1: 4–17.
26. Riordan J, Jones RE (1999) *Sport and Physical Education in China*. ISCPES Book Series. London: E & FN Spon.
27. Riordan J (1993) *Rewriting Soviet Sports History*. *Journal of Sports History* 20(3): 247–258.
28. Berthelot G, Tafflet M, Thibault V, El Helou N, Len S, et al. (2009) Top performers atypicality on the edge of achievement: the last major effort to push back human limits culminated in 1990. *Fundamental & Clinical Pharmacology*. 23(1): 88. doi:10.1111/j.1472-8206.2009.00689.x.
29. The results at the Olympic Games: from confiscation to specialisation (2002) CIO. Available: http://multimedia.olympic.org/pdf/en_report_667.pdf.

Annexe 9:

Liste de Publications :

- El Helou N, Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Nassif H, et al. Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years. *Journal of Sports Sciences*. 2010;28(7):789–796.
- El Helou N, Berthelot G, Tolaini J, Marc A, Tafflet M, et al. (2010) Impact of Environmental parameters on Marathon Running Performance. UNDER REVIEW
- Guillaume M, Helou NE, Nassif H, Berthelot G, Len S, et al. (2009) Success in Developing Regions: World Records Evolution through a Geopolitical Prism. *PLoS ONE* 4(10): e7573. doi:10.1371/journal.pone.0007573
- Desgorces F-D, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. *PLoS ONE* 3(11): e3653. doi:10.1371/journal.pone.0003653
- Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, et al. (2010) Athlete Atypicality on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE* 5(1): e8800. doi:10.1371/journal.pone.0008800.
- Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, et al. Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2010; 9: 214-223.
- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. (2008) The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. *PLoS ONE* 3(2): e1552. doi:10.1371/journal.pone.0001552
- Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, El Helou N, et al. Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Materials Today*. 2010;13(11): 46-51.
- Nassif H, El Helou N, Toussaint JF. Influence du sport sur la longévité. *Nutrition & Endocrinologie*. 2009;7(43):291-293.
- Nassif H, El Helou N, Toussaint JF. Régression de la condition physique et progression de l'obésité. *Adsp* 2009;63:18-19.
- El Helou N, Guillaume G, Pérès G. (2006). Dietary Intake Analysis of a Professional Cycling Team during the Tour de France. Unpublished.

