

# La Fin du Citius: La Progression des Records du Monde durant l'Ere Olympique Annonce l'Épilogue d'une Brève Quête Ultra-Physiologique

## Auteurs & Affiliation

Geoffroy Berthelot<sup>1</sup>, Valérie Thibault<sup>1</sup>, Muriel Tafflet<sup>1,2</sup>, Sylvie Escolano<sup>1,2</sup>,  
Nour El Helou<sup>1</sup>, Xavier Jouven<sup>2,3</sup>, Olivier Hermine<sup>3,4</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup> IRMES, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France.

<sup>2</sup> INSERM, IFR69, U780, Villejuif, F-94807, France.

<sup>3</sup> Université Paris-Descartes, 12 rue de l'école de médecine, 75006 Paris, France.

<sup>4</sup> CNRS UMR 8147, Hôpital Necker, 149 rue de Sèvres, 75015 Paris, France.

<sup>5</sup> CIMS, Hôtel-Dieu, APHP, 1 Parvis Notre Dame, 75184 Paris Cedex 04, France.

## Abstract

Les records du monde (RM) illustrent l'ultime expression de la biologie musculaire humaine. Les prédictions des limites physiologiques de l'homme et l'impact des conditions extérieures (historiques ou environnementales) sur l'établissement d'un RM sont sujets à controverse. Après l'analyse de 3 263 RM établis dans toutes les disciplines officielles quantifiables depuis les premières olympiades, nous montrons ici que le rythme de progression des RM suit un modèle exponentiel décroissant en série précis (valeur moyenne du  $R^2$  ajusté =  $0,91 \pm 0,08$ ). En débutant en 1896 à 75% des valeurs asymptotiques estimées, les RM ont aujourd'hui atteint 99% de cette valeur et en 2027, la moitié des RM ne sera plus battue au-delà de 0,05% de leur valeur, toutes conditions égales par ailleurs. Notre modèle peut être utilisé pour comparer les futures performances sportives ou évaluer l'impact des règles internationales anti-dopage, et prévoit que les limites physiologiques de l'espèce humaine seront atteintes dans une génération. Cela pourrait influencer les conditions d'entraînement des futurs athlètes et l'organisation des compétitions. L'esprit et la devise olympique pourraient aussi s'en trouver modifiés.

## Introduction

Les Jeux Olympiques sont réintroduits en 1896 par Pierre de Coubertin. Cent onze ans plus tard, l'ensemble des records du monde montre une progression de la performance humaine, mais aussi le franchissement des frontières « ultra-physiologiques » par certains athlètes de haut niveau. Cette expérience non planifiée peut être décrite comme la maximisation phénotypique du génotype humain sous la contrainte réglementaire des compétitions [1]. Ce large champ d'étude peut maintenant être évalué, en se comparant aux quelques méthodes déjà publiées [2-5]. Certains modèles de régression linéaire ont été critiqués pour leur inexactitude et leur absence de pertinence physiologique. Un modèle sigmoïdien a été élaboré par Nevill and Whyte [4,5] sur 8 courses d'athlétisme et 6 de natation, mais qui ne tenait pas compte des influences historiques et techniques (Fig. 1). Dans cet article, nous identifions un modèle de progression commun pour l'ensemble des records du monde issus de toutes les épreuves Olympiques quantifiables et nous proposons un modèle prédictif de cette évolution.

## Matériel & Méthodes

Nous avons mené une analyse quantitative et qualitative de 3263 RM dans 147 épreuves olympiques mesurables issues de 5 disciplines [9-13] afin d'identifier leurs mode de progression. Les données ont été recueillies sur la période olympique moderne, de 1896 à 2007.

### Analyse descriptive : facteurs $\lambda$ , $\kappa$

Deux indicateurs ont été introduits. Etant donné que le nombre de RM établis chaque année dépend du nombre d'épreuves, nous avons défini le rapport annuel  $\lambda$  à l'année  $t$  du nombre de nouveaux RM sur le nombre total d'épreuves olympiques :

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

Les RM sont aussi analysés à travers le facteur de progression  $\kappa$ , qui mesure l'amélioration relative de la  $n^{\text{ème}}$  meilleure performance à la  $n-1^{\text{ème}}$  performance :

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

avec  $\overline{\kappa}_t$  la moyenne annuelle calculée pour toutes les épreuves officielles à l'année  $t$ .

### Description de la fonction

Pour chaque épreuve, les séries de RM ont été modélisées avec la fonction :

$$y_j(t) = \Delta_{WR} \cdot \exp^{-a_j t'} + b_j \quad (3)$$

où  $\Delta_{WR} = WR_{i,j} - WR_{f,j}$  est un indicateur pour la période  $j$  étudiée ; il est positif pour les épreuves chronométriques (avec des valeurs de RM décroissantes) et négatif pour les épreuves non chronométriques (valeurs de RM croissantes) ;  $WR_{i,j}$  et  $WR_{f,j}$  sont respectivement les valeurs initiales et finales des RM ;  $a_j$  est le coefficient de courbure estimé par la régression non linéaire ;  $b_j$  est la limite asymptotique. La normalisation de  $t$  dans l'intervalle  $[0,1]$  garantit que la fonction (3) est bien définie pour toutes les valeurs de  $t$  :

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

où  $t'$  est l'année du RM après la transformation linéaire de  $t$  ;  $t_{i,j}$  et  $t_{f,j}$  sont respectivement les années des RM initiaux et finaux pour la période  $j$  étudiée. L'équation (3) suppose que les RM atteindront une valeur asymptotique dans un temps donné débutant au RM  $WR_{i,j}$ .

### Découpage des séries de RM en périodes

Une procédure basée sur le meilleur  $r^2$  ajusté est utilisée pour le découpage des séries de RM en périodes. Pour chaque série de RM, l'algorithme est initialisé par les trois premières valeurs des RM de la série étudiée ; l'équation (3) est ajustée itérativement aux RM en ajoutant successivement chaque RM. Pour chaque ajustement réalisé le  $r^2$  ajusté est récupéré ; les maximums locaux définissent les ruptures de pentes correspondant à l'apparition de chaque nouvelle période. La période minimale autorisée est de 6 ans et le nombre minimum de RM par période est de 3.

Pour chaque épreuve, l'algorithme basé sur la fonction exponentielle décroissante en série (3) fournit les périodes successives. Une période correspond à un groupe de plusieurs RM consécutifs après une rupture de pente. Dans chaque période  $j$ , les paramètres  $a_j$  et  $b_j$  sont estimés avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt [14-16] (LMA) dans une régression non linéaire par la méthode des moindres carrés afin d'ajuster le modèle aux records. Les valeurs élevées du coefficient  $a$  correspondent à des périodes fortement incurvées présentant une faible marge de progression terminale. Le coefficient  $b$  est la valeur asymptotique ; la comparaison des records initiaux ( $WR_i$ ) et finaux ( $WR_f$ ) avec  $b$  est respectivement décrite par  $b'$  et  $b''$ . La marge de progression est égale à  $b'' - b'$  et exprimée sous forme d'un pourcentage de la valeur asymptotique.

### Description des coefficients

L'écart de la progression initiale est donnée par  $b'$ . Afin de comparer les progressions prédites,  $b''$  est calculé pour les périodes terminales de chaque épreuve uniquement :

Pour les épreuves chronométriques ( $WR_i > WR_f$ ):  $b' = \frac{b_j}{WR_{i,j}}$  et  $b'' = \frac{b_j}{WR_{f,j}}$  ;

Pour les épreuves non chronométriques ( $WR_i < WR_f$ ):  $b' = \frac{WR_{i,j}}{b_j}$  et  $b'' = \frac{WR_{f,j}}{b_j}$ .

Cette représentation permet aussi la comparaison de chaque record comme un pourcentage de la valeur asymptotique estimée.

### Prédiction

Le jeu de données pour la prédiction a été réduit à 125 épreuves. Des 22 épreuves écartées, 2 résultent des changements de poids du javelot (hommes et femmes) et 20 sont issues de l'haltérophilie : 9 épreuves d'épaulé jeté ont été retirées des listes officielles en 1972 (Fig. S2) et 11 ont subi des changements de règlement majeurs (catégories de poids). Pour des raisons de prédiction, la fonction inverse de l'équation (3) est définie :

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

Les coefficients de l'équation (5) sont calculés pour la dernière période de chaque épreuve par le LMA. Le résultat est utilisé pour estimer une date  $t$  correspondant à 99,95% (1/2000) de la limite asymptotique. Cette limite est établie par  $y = b + \frac{b}{2000}$

pour les épreuves chronométriques, et  $y = b - \frac{b}{2000}$  pour les non chronométriques.

La valeur 1/2000 a été choisie en référence aux limites chronométriques utilisées sur la course la plus rapide : elle représente la moitié d'un 1/100<sup>ème</sup> de seconde sur le 100m (et environ 4 s. au marathon ou 100 g. en haltérophilie).

### Estimer les variations de la prédiction

Un intervalle de crédibilité est calculé en utilisant une méthode de Monte Carlo [17]. Les coefficients estimés dans l'équation (5) sont utilisés pour obtenir 10000 nouveaux coefficients dans une loi multinormale bidimensionnelle. La médiane est choisie comme une mesure plus robuste du centre de chaque distribution suivant une approche non paramétrique.

Nous avons utilisé le 2,5<sup>ème</sup> percentile, la médiane et le 97,5<sup>ème</sup> percentile pour produire un intervalle d'erreur à 99,95% pour l'année estimée et les valeurs asymptotiques des RM. L'intervalle de crédibilité [18] est donné par la moyenne des 2,5<sup>ème</sup> et 97,5<sup>èmes</sup> percentiles pour les 125 épreuves prédictibles (Table S1).

### Résultats

Les épreuves chronométrées représentent 58% des données (natation, course, cyclisme, patinage de vitesse), les valeurs de records du monde suivent une tendance décroissante; pour les 42% restants qui sont des épreuves non chronométrées (saut, lancer, haltérophilie) leurs valeurs de records du monde suivent une tendance croissante.

Le facteur d'évolution  $\lambda$  pendant l'ère Olympique (Fig.2) révèle trois phases majeures de déclin commençant respectivement en 1913, 1938, et 1971. Les Guerres Mondiales ont un impact sur les valeurs de  $\lambda$  avec deux décalages majeurs, qu'on estime par leur largeur et leur taille moyenne :  $\Delta_{wwI} = 6.4$  années pour la Première Guerre Mondiale et  $\Delta_{wwII} = 13,4$  années pour la Seconde Guerre Mondiale. Le décalage moyen calculé entre chaque nouveau record du monde est de  $2,62 \pm 3,05$  années.

$\bar{k}_t$  diminue significativement sur l'ensemble de l'ère étudiée (modèle linéaire:  $F(1,102) = 27,14$ ,  $p < 0,001$ ) (Fig.3) appuyant ainsi l'hypothèse d'une constante réduction des possibilités de progression des RM.

En utilisant l'algorithme itératif sur le meilleur  $r^2$  ajusté, 362 périodes sont obtenues avec en moyenne  $a = 3,00 \pm 2,87$ ,  $b' = 0,75 \pm 0,15$  (Fig. S4),  $b'' = 0,99 \pm 0,008$ , une progression moyenne entre le premier et le dernier record final de 0,24 %, et un  $r^2$  moyen ajusté =  $0,91 \pm 0,08$  (Fig. S3). Le profil évolutif des séries de records du

monde sur l'ère Olympique montre 2 à 3 périodes pour la majorité des épreuves ( $2,47 \pm 1,18$ ), avec une moyenne de 8,98 RM par période et une durée moyenne de  $25,8 \pm 14,8$  années par période.

Nous avons prédit la valeur asymptotique de chaque record en utilisant la fonction inverse de l'équation (3) sur la dernière période de 125 épreuves exploitables (Table S1). Une procédure de Monte-Carlo, nous a permis de définir l'intervalle de crédibilité de la prédiction. La moyenne de l'intervalle de crédibilité de la valeur asymptotique de WR est  $[- 2,28\% ; + 2,28\%]$ . Nous avons aussi prédit l'année où un record devrait atteindre 99,95% de la valeur de l'asymptote, en utilisant la même méthode que sur la dernière période de 125 épreuves exploitables. La distribution de 125 dates est exprimée par décennies (Fig. 4) : 12,8% de cette asymptote des RM ont déjà été atteints en 2007. En 2027, la moitié des records atteindront 99,95% de leur valeur asymptotique, avec un intervalle de crédibilité de [2002-2120] (Table S1 pour la prédiction de chaque épreuve).

## Discussion

Le modèle proposé, exponentiel décroissant en série, qui décrit une expansion, dans un contexte fini, suggère un déclin important de la progression des RM. Pendant une phase initiale d'amélioration rapide, interrompue par deux événements majeurs (Fig. S1), la progression des RM pouvait être décrite par un modèle linéaire. Mais avec un recul de 40 ans (Fig. 2), le débat sur les limites émerge clairement. Comme on s'y attend d'un point de vue biologique, les courbes ajustées (fortes valeurs de  $r^2$ ) réfutent maintenant le modèle linéaire. Dans les épreuves olympiques mesurables issues de 5 disciplines, impliquant aussi bien les métabolismes aérobie (le 10000 m en patinage) ou anaérobie (l'haltérophilie), les muscles des jambes (le cyclisme) ou tous les muscles (le décathlon), les efforts de quelques secondes (les lancers) ou de plusieurs heures (50km marche), les femmes ou les hommes, les petits (poids mouches) ou grands gabarits (100m nage libre), les épreuves individuelles ou collectives (relais), toutes les courbes de progressions suivent le même modèle, en suggérant l'universalité.

Les épreuves récemment introduites, comme l'haltérophilie féminine depuis 1998 (Fig. S2), nécessiteraient un suivi de près. De plus, certaines données, qui couvrent des périodes plus courtes, pourraient avoir une marge de progression plus large que prévue. D'autre part, utiliser des technologies plus perfectionnées pourrait améliorer la précision de mesure des records (le temps enregistré à la milliseconde, les sauts au millimètre). Cependant, de telles décisions n'auraient pas d'effet sur le rythme de progression  $\lambda$  des RM, puisqu'elles ne modifieraient ni le modèle exponentiel ni les valeurs asymptotiques mais seulement l'échantillonnage des données.

Les circonstances historiques et l'évolution des records du monde sont étroitement liées : l'impact des deux guerres mondiales a pour résultat deux ralentissements (Fig. 2) avec le  $\Delta_{\text{wwII}}$  deux fois plus important que le  $\Delta_{\text{wwI}}$ . A partir de 1971, une diminution  $\lambda$  plus nette est observée (de 0,72 à 0,17) en l'absence de conflit majeur [19] et malgré la guerre froide qui a relancé la compétition sportive entre les pays d'Europe de l'est et les nations de l'ouest. De plus, le développement économique entre 1950 et 1980, accompagné d'importants progrès technologiques, nutritionnels et médicaux, a permis une élévation du niveau de vie dans les quelques pays qui ont établi 95% des RM (Etats-Unis, Russie, Australie, Canada, Japon et Europe). La

dernière phase de diminution des RM a eu lieu malgré l'augmentation majeure du nombre de pays (et d'athlètes) participants : de 14 nations en 1896 à Athènes (240 participants) à 69 nations à Helsinki en 1962 (4950 participants) et enfin 202 nations aux derniers jeux d'Athènes en 2004 (11100 athlètes).

La modification des règlements et le renforcement des contrôles anti-dopage peuvent avoir généré des évolutions particulières des RM, comme en Epaulé-Jeté chez les super lourds (Fig 1.D), d'autant plus que les catégories de poids ont changé en 1948, 1968 et 1992. Enfin, la diminution de  $\lambda$  apparaît encore malgré l'amélioration des procédés de sélection et d'entraînement (temps alloué à l'entraînement, nouvelle technique de saut ou de départ de course, critères physiques de sélection des athlètes [20]). Tout ceci peut avoir déclenché de nouvelles périodes mais n'a pas affecté le modèle général, qui est commun à tous les sports aussi différents soient-ils, comme le marathon, le 4x100m ou le saut à la perche.

Tout au long de l'ère olympique, il a été fait usage de stratégies de dopage, qu'elles soient individuelles ou d'équipe, et des protocoles contrôlés de dopage d'état ont été développés depuis 1970 [21, 22] : ces deux derniers faits peuvent avoir contribué au ralentissement de la courbe  $\lambda$ . Néanmoins, de telles pratiques n'ont pas empêché le déclin observé après les JO de Mexico.

Si le dopage était légalisé ou mal contrôlé [23-26], la progression des records pourrait être partiellement altérée dans le futur. Le fait que certains athlètes soupçonnés ou ayant ultérieurement avoué s'être dopés détiennent certains des derniers records pourrait avoir exagéré notre modèle de prédiction. De ce fait, l'année où la moitié des records aura atteint 99,95% de leur limite serait encore plus proche. En effet, des données récentes montre un arrêt de la progression des dix meilleurs performeurs depuis 20 ans, pour le 100m féminin en athlétisme et le saut en hauteur masculin [27]. Ceci suggère que ces records ne pourront plus être égalés, d'autant plus si les instances de contrôle anti-dopage accroissent leurs actions et sanctions. Ceci est aussi observé sur les courses de vitesse, la natation et le cyclisme sur piste, sur la seconde partie du XX<sup>ème</sup> siècle [28].

Les changements majeurs des règlements internationaux, les nouvelles technologies ou le profil génétique ont aussi été expérimentés dans le sport [29-30]. Cependant, 50% des valeurs asymptotiques des RM seront obtenues dans une génération : les organisations sportives essayeront alors de créer de nouvelles épreuves, de favoriser les sports moins directement associés à la performance pure ou de promouvoir les bienfaits de l'activité physique sur la santé [31]. La devise « citius, altius, fortius » pourrait être reformulée dans le courant du siècle. Vers un « sanius ? » demeure une question ouverte.

En résumé, une analyse épidémiologique des performances sportives démontre que la progression des RM suit un modèle exponentiel décroissant en série, influencé par les événements historiques. Les résultats pointent qu'en 2007, les RM ont atteint 99% de leur valeur asymptotique. Les conditions actuelles demeurant inchangées pour les 20 prochaines années, la moitié des records du monde ne sera plus améliorée de plus de 0,05%. Comparée au positivisme triomphant de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle où Coubertin inspire la renaissance Olympique, la présente analyse met en évidence l'inévitable raréfaction des preuves quantifiables de la progression physiologique humaine.

## Remerciements

Cet article est dédié à Loic Leferme. Nous remercions le Dr Robin Choudhury pour sa relecture attentive. Nous remercions l'INSEP pour son appui, le Centre National de Développement du Sport et le ministère de la santé, de la jeunesse et des sports pour leur contribution financière.

## Contribution des auteurs

G.B., V.T. et N.E.H. ont recueillis les données. L'analyse statistique, le modèle et les algorithmes ont été établis par G.B., M.T. et S.E. Le manuscrit a été écrit par G.B. et J.F.T. ; X.J., O.H. et J.F.T. ont dirigés l'étude. Tous les auteurs ont discuté des résultats et commenté le manuscrit.

## Références

1. 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. *Nature Genet* 39: 1261-1265.
2. Whipp BJ, Ward S (1992) Will women soon outrun men? *Nature* 355: 25.
3. Reinboud W (2004) Linear models can't keep up with sport gender gap. *Nature* 432: 147.
4. Nevill AM, Whyte GP, Holder RL, Peyrebrune M (2007) Are there limits to swimming World Records? *Int J Sports Med* 28: 1-6.
5. Nevill AM, Whyte GP (2005) Are there limits to running World Records? *Med Sci Sports Exerc* 37: 1785-1788.
6. Lovett RA (2007) Olympic talent. *Nature* 448: 104-107.
7. Miller PS (2006) The computifull game. *Nature* 441: 784.
8. Tatem AJ, Guerra CA, Atkinson PM, Hay SI (2004) Momentous sprint at the 2156 Olympics ? *Nature* 431: 525.
9. IOC. Official website of the Olympic movement. <http://www.olympic.org>.
10. Swimming U home. <http://www.usaswimming.org>.
11. FINA. Official FINA website. <http://www.fina.org>.
12. Chidlovski AR Lift Up, History of Olympic Weightlifting. <http://www.chidlovski.net/liftup>.
13. Sport Links. <http://www.geocities.com/Colosseum/Arena/3170/sport.html>
14. Levenberg K (1944) A Method for the solution of certain problems in least squares. *Q Appl Math* 2: 164-168.
15. Marquardt D (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J Appl Math* 11: 431-441.
16. 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.
17. Mosegaard K, Malcolm S (2002) Monte Carlo analysis of inverse problems. *Inverse Probl* 18: 29-54.
18. Willink R (2006) On using the Monte Carlo method to calculate uncertainty intervals.

Metrologia 43: 39-42.

19. Harbom L (2005) Armed conflict and its international dimensions, 1946-2004. *J Peace Res* 42: 623-635.

20. Norton K, Olds T (2001) Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med* 31: 763-783.

21. Kalinski MI (2003) State-sponsored research on creatine supplements and blood doping in elite Soviet sport. *Perspect Biol Med* 46: 445-451.

22. Geipel I (2001) *Verlorene Spiele. Journal eines Dopingprozesses.* Transit Verlag ed. Berlin.

23. Eichner ER (2007) Blood doping : infusions, erythropoietin and artificial blood. *Sports Med* 37: 389-391.

24. Kayser B, Mauron A, Miah A (2007) Current anti-doping policy: a critical appraisal. *BMC Med Ethics* 8: 2.

25. Editorial (2007) A sporting chance. *Nature* 448: 512.

26. 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>

27. Reinboud W. Progression in athletic. <http://www.at-a-lanta.nl/weia/Progressie.html>.

28. 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.

29. Buckley JG (2000) Biomechanical adaptations of transtibial amputee sprinting in athletes using dedicated prostheses. *Clin Biomech* 15: 352-358.

30. Dennis C (2005) Rugby team converts to give gene tests a try. *Nature* 434: 260.

31. Warburton DE, Nicol CW, Bredin SS (2006) Health benefits of physical activity: the evidence. *Can Med Assoc J* 174: 801-809.

### Légende des figures

**Figure 1.** Ajustement du modèle sur 4 épreuves. A. 400m nage libre femmes (natation), avec une courbe biexponentielle décroissante,  $r_i^2=0.976$  et  $r_{ii}^2=0.966$ ; B. 4x100m relais nage libre hommes (natation),  $r_i^2=0.985$ ,  $r_{ii}^2=0.988$ ; C. 50km marche hommes (athlétisme),  $r_i^2=0.972$ ,  $r_{ii}^2=0.977$ ; D. Epaulé-jeté catégorie des Super lourds (haltérophilie),  $r_i^2=0.939$ ,  $r_{ii}^2=0.937$ ,  $r_{iii}^2=0.975$  et  $r_{iv}^2=0.946$ . Les catégories de poids ont été modifiés en 1948, 1968, 1992 et la lutte antidopage renforcée en 1988-1992 en haltérophilie.

**Figure 2.** Evolution du facteur  $\lambda$  : Nombre de nouveaux RM sur le nombre d'épreuves Olympiques officielles. Données exactes (points noirs) sont filtrées par un filtre passe-bas Butterworth 60Hz de second ordre (courbe noire). L'impact des deux guerres mondiales est visible:  $\Delta_{wwI} = 6,4$  années ;  $\Delta_{wwII} = 13,4$  années.

### Figure 3.

Evolution annuelle des améliorations relatives des RM :  $\bar{k}_t$  décroît de 0.024 dans les 30 premières années à 0,010 ans dans les 10 dernières

(Modèle linéaire :  $y = 1,46 \cdot 10^{-4} x + 0,301$ ,  $F(1,102) = 27,14$ ,  $P < 0,001$ ).

Cette décroissance est représentative des difficultés croissantes à améliorer les valeurs des RM précédemment établis.

**Figure 4.**

Distribution des limites estimées à 99,95 % des valeurs asymptotiques. Les résultats sont rangés par décennies. La moitié des records asymptotiques seront établis en 2027, et 90% en 2068.