



Identification et optimisation des facteurs de performance chez les sportifs Paralympiques : spécificités et capacités de progression

Julien Schipman

► To cite this version:

Julien Schipman. Identification et optimisation des facteurs de performance chez les sportifs Paralympiques : spécificités et capacités de progression. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Paris V Descartes, 2021. Français. NNT : . tel-04343141v1

HAL Id: tel-04343141

<https://insep.hal.science/tel-04343141v1>

Submitted on 16 Nov 2022 (v1), last revised 13 Dec 2023 (v2)

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.

Université de Paris

Ecole doctorale Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain (ED 566)

Institut de recherche bio-médicale et d'épidémiologie du sport IRMES – EA 7329

Identification et optimisation des facteurs de performance chez les sportifs Paralympiques : spécificités et capacités de progression

Par Julien Schipman

Thèse de doctorat en Sciences du sport

Dirigée par le Pr Jean-François Toussaint

Présentée et soutenue publiquement le 17 Décembre 2021

Devant un jury composé de :

Arnaud Faupin	Rapporteur	Maitre de conférences	<i>Université de Toulon</i>
Thierry Weissland	Rapporteur	Maitre de conférences	<i>Université de Bordeaux</i>
Martine Duclos	Examinatrice	PU-PH	<i>CHU Clermont Ferrand</i>
Pascale Duché	Examinatrice	Professeure des Universités	<i>Université de Toulon</i>
Hélène Joncheray	Examinatrice	Chercheure	<i>SEP INSEP</i>

« La connaissance est une navigation dans un océan d'incertitudes

à travers des archipels de certitudes »

Edgar Morin

Résumé

Identification et optimisation des facteurs de performance chez les sportifs Paralympiques : spécificités et capacités de progression

Au cours du temps, les Jeux Paralympiques sont passés d'une pratique sportive à visée thérapeutique au statut de compétition sportive de niveau international, réservée à l'élite. Fort d'un besoin de compréhension et de quantification, ce travail porte sur l'identification et l'optimisation des facteurs de performance en para athlétisme et en para natation avec pour objectif d'étudier les spécificités des para sportifs.

Dans un premier temps, l'évolution des 10 meilleurs performeurs mondiaux par année a été analysée depuis 1891 dans 66 épreuves Olympiques et depuis 2010 dans 255 épreuves Paralympiques, chez les femmes et chez les hommes. Les performances Paralympiques toutes épreuves confondues depuis 2010, ont progressé en athlétisme et natation. En 2020, le niveau des performances toutes épreuves confondues a baissé significativement par rapport aux années précédentes. Cette première étude a permis de définir le contexte global de l'évolution des performances et de quantifier les progressions, stagnations ou régressions, selon différentes échelles de temps. Les variations de performance constatées sont le résultat de l'évolution simultanée de nombreux facteurs. Les études suivantes se sont successivement intéressées à l'analyse de ces paramètres chez les sportifs Paralympiques.

Dans ce contexte de progression observé dans le Paralympisme, l'âge, facteur prépondérant de la performance, a été analysé. Des trajectoires de performances maximales en fonction de l'âge, modélisées avec une équation biphasique, ont été étudiées. Les performances augmentent jusqu'à atteindre un âge optimal au pic de performance pour ensuite décliner lentement. Des variations selon le sexe, le type de handicap et l'épreuve, ont été mises en évidence, ainsi qu'une augmentation progressive de l'âge au pic selon la distance parcourue.

Ces trajectoires de performance ont été ensuite observées selon l'origine, innée ou acquise, du handicap spécifiquement chez des athlètes et nageurs en situation de handicap visuel. Les para

nageuses et para nageurs dont le handicap, considéré comme sévère à modéré, est présent dès la naissance ont un pic de performance plus précoce alors que leur niveau de performance n'est pas différent. Le moment d'apparition du handicap semble donc être un facteur associé à la progression des performances chez les nageurs en situation de handicap visuel.

Enfin, la participation des para nageuses et nageurs dans des classifications de handicap peu sévères dans plusieurs styles de nage et distances a été mise en exergue. Plus le niveau de performance est élevé, plus le nombre d'épreuves, auxquelles les nageuses et nageurs participent, augmente. La plus faible densité de para nageuses et nageurs dans certains types d'épreuves ainsi que leur polyvalence ressortent comme des facteurs explicatifs.

Au regard de ces résultats, des éléments de compréhension des facteurs spécifiques à la performance Paralympique ont été identifiés. L'optimisation de ces facteurs pourraient permettre une meilleure individualisation des conditions d'entraînements des sportifs Paralympiques en fonction de l'âge, de l'origine du handicap et de la densité de concurrence dans différentes épreuves et disciplines.

Mots clés : Performance ; Epidémiologie ; Progression ; Age ; Origine du handicap ; Polyvalence ; Densité ; Concurrence.

Abstract

Identification and optimization of performance factors in Paralympic athletes: specificities and abilities to progress

Over the time, the Paralympic Games have evolved from a therapeutic sport practice to an international level sport competition reserved for the elite. This thesis focuses on the identification and optimization of performance factors in Para athletics and Para swimming with the objective of quantifying the specificities of para sports.

First, the evolution of the top 10 world performers per year has been analyzed since 1891 in 66 Olympic events and since 2010 in 255 Paralympic events, for both women and men. In the last ten years, the performances have increased in all events of Para Athletics and Para Swimming. In 2020, the level of performance has significantly dropped compared to previous years. This first study has made it possible to define the global context of the evolution of performances and to quantify it, according to different time scales. The variations in performance result from the simultaneous evolution of many factors, analyzed in the following studies.

Age, a major factor of performance, was analyzed in this context of Paralympic progression. Trajectories of maximal performance as a function of age were observed: performance increases until a peak is reached and then slowly declines. This time-course can be modeled through a bi-phasic equation. Variations according to sex, type of disability and event, were highlighted as well as a progressive increase in age at peak, depending on the distance.

These trajectories were then observed according to the origin of the disability, innate or acquired, in visually impaired athletes and swimmers. Para swimmers, whose severe to moderate disability is present at birth, reached their peak at an earlier age, but their level of performance was not different. The moment of onset of the disability therefore appears to be a factor associated with performance in visually impaired swimmers.

Finally, the participation of para swimmers in several swimming styles and distances was highlighted. As the level of performance increased, so did the number of events swimmers involved in.

In the light of these results, some factors of performance have been identified in situations favorable to the improvement of performances. Optimizing such factors could allow for a better individualization of the training conditions specific to Paralympic athletes according to age, origin of disability and density of competition in the various events and disciplines.

Key words: Performance; Growth; Age; Disability Origin; Multi-skilling; Density; Competition.

Remerciements

Les travaux de recherche qui constituent cette thèse ont été réalisés à l'Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport (IRMES), laboratoire de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP).

« Le savoir n'est rien sans l'art de vivre ».

Voltaire

Mes premiers remerciements s'adressent tout particulièrement au Professeur **Jean-François Toussaint**, directeur de l'Irmes. Cela fait plus de 10 ans que je vous connais, je vous remercie pour votre confiance et votre disponibilité. Merci pour les longues discussions et relectures autour de mes travaux (en particulier une à votre retour du Canada) qui représentent d'excellents souvenirs et qui m'ont énormément appris et façonné professionnellement et personnellement. Merci également pour tous les moments conviviaux que vous avez organisés. Le chemin sera encore long, j'en suis sûr !!!

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers tous les membres du jury. Messieurs, **Arnaud Faupin** et **Thierry Weissland**, merci d'avoir accepté de rapporter et juger ce travail.

Aux Professeures **Martine Duclos** et **Pascale Duché** ainsi qu'à Madame **Hélène Joncheray**, merci d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail.

Merci **Arnaud Litou** pour ton soutien sans faille dans nos projets de recherche. Enfin, merci à la Fédération Française Handisport et ses nombreux collaborateurs pour leur partage d'expérience, leur écoute et bienveillance autour des nombreux projets qui surpassent aujourd'hui le cadre de cette thèse.

« Individuellement, nous sommes une goutte d'eau. Ensemble, nous sommes un océan ».

Ryunosuke Satoro

Andy, Adrien, respectivement Responsable Grand Ouest et Directeur adjoint de l'Irmes. Avant tout, vous êtes des amis et des aventuriers de soirées et de congrès, il est difficile de vous dissocier de cette belle aventure (remplie de lignes de crête) car elle s'est construite avec vous et je me dis aujourd'hui : quel chemin parcouru ensemble ! Vous êtes toujours là et vous le serez pour un long moment. MERCI

Jean Guillaume, fidèle acolyte de mes articles et un vrai camarade à la petite tête bien remplie, un grand merci pour ton aide si précieuse. Je te souhaite de retrouver un physique et d'être bien plus réaliste devant le but.

Dr Issa Moussa, alias le directeur par intérim ! Merci pour tous tes conseils sur la thèse ainsi que ton calme et ton humilité. Prépare-toi à remettre les gants et tes baskets pour un combat suivi d'un sub 30 en 2022 !!!

Nicolas, tu es passé de stagiaire à coordinateur d'un super projet de recherche ! Tu me rends hyper fier car tu fais du super boulot tout en restant modeste, à part quand tu ne manges pas au self le midi. Merci d'être toujours là pour me supporter dans mes humeurs matinales...Ton soutien dans tes relectures et tes nombreux retours sur les outils développés et tes délicieux desserts me sont très précieux. Ce n'est que le début d'une longue amitié.

Juliana, ça commence à faire un bail que l'on se connaît !! Je comprends de moins en moins ton français surtout en soirée et en particulier depuis Prague mais ça, ça reste entre nous ! Merci pour ta bonne humeur quotidienne et tous ces bons moments partagés autour de tes excellentes Caipirinhas.

Laurie Anne, tu es toujours là alors que tu es à l'autre bout de la France et que ton agenda ne te laisse aucun répit ! Seul ce petit gloussement qui t'est si caractéristique ne peut être comblé. Bon vent dans ta nouvelle aventure !!

Thibault, tu es le prochain sur la liste et donc traditionnel passage de relais d'un doctorant à un autre. Fait attention au « parapet » qui s'approche bien vite en 3ème année. Enfin, grâce à toi, je ne comprends plus la logique interne du triathlon.... Vive la pédale !

Bryan, de stagiaire à fidèle acolyte Paralympique. Ta gentillesse, ta qualité de travail, ta curiosité et tes compétences en mécanique vélo font que je te passe avec confiance le relais de la prochaine thèse Paralympique ! Tu seras à la hauteur, je n'en ai aucun doute.

Quentin, tu reconnaitras ces quelques lettres IZIZ dans tes lignes de codes. Merci de ta justesse et rigueur statistique, ta disponibilité et ton enthousiasme. Je suis certain que ta thèse se déroulera au mieux. Et doucement sur les protes...

Imad et Yann, alias les scrappeurs de données et développeurs d'applications. Merci pour votre excellent travail au quotidien. Imad, j'ai hâte que tu me fasses goûter au meilleur « Grec ou Kebab » du Val de Marne. Yann, j'attends ton invitation officielle pour une rando en montagne !!

Estelle, merci pour le travail que tu réalises, tu réponds toujours positivement à mes différentes demandes. Nous n'avons pas encore trinqué ensemble me semble-t-il ?

Chloé, Jeremy, Nathan, Marion, Audrey, vous êtes plein de dynamismes et toujours prêts à aider, gardez cette envie et cette énergie qui vous animent ! C'est aussi grâce à vous que le Para avance.

Adrien Marck, si si ! Paraperf n'existerait sans doute pas sans toi et ta vigilance sur tous les appels à projet. Je te souhaite la bienvenue dans le monde merveilleux de la paternité.

Merci à tous les autres membres de l'IRMES, en particulier à **Mélanie, Alexis, Nicolas**. Vous rajoutez quelques « pierres » fondamentales à nos travaux de recherche et à la vie de l'Irmes. Enfin, **Hélène**, je ne t'oublie pas !! Merci car tu as énormément apporté à l'Irmes. Il faudrait mettre une « petite » statue à ton effigie tellement tu nous as marqué ;).

*« Le bonheur familial est à la longue le plus solide et le plus doux »
Voltaire*

A mes **potes d'Avignon**, vous me manquez !! Vous n'avez en rien participé à cette thèse mais plutôt bien contribué à la personne que je suis...Difficile de rêver mieux comme jeunesse. Je suis fier de notre réussite.

A **ma famille**, Voltaire aurait-il raison ? Je crois bien. Merci de m'avoir transmis de belles valeurs d'éducation et d'avoir toujours cru en moi. A ma **mère**, merci pour ton soutien inconditionnel. A mon **père**, merci particulièrement pour ta présence dans les moments difficiles. Merci également **Corinne et Philippe** pour votre bienveillance.

A **Emilie**, merci pour le temps que tu m'as laissé dans la dernière ligne droite de ce travail. Avec **Lou**, vous êtes mon équilibre et mon plus grand bonheur. J'avance grâce à vous. Vivement notre prochain projet !!

Julien

Communications scientifiques

Publications dans des revues scientifiques internationales

à comité de lecture dans le cadre de la thèse

1. **Schipman J**, Gallo P, Marc A, Antero J, Toussaint J-F, Sedeaud A and Marck A (2019) Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances. *Frontiers in Physiology*. 10:256. doi: 10.3389/fphys.2019.00256
2. **Schipman J**, Saulière G, Le Toquin B, Marc A, Forstmann N, Toussaint J-F and Sedeaud A (2021) Involvement in Multiple Race Events Among International Para and Non-disabled Swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2:608777. doi: 10.3389/fspor.2020.608777
3. **Schipman J**, Saulière G, Marc A, Hamri I, Le Toquin B, Rivallant Y, Difernand A, Toussaint J-F and Sedeaud A (2021). The COVID-19 pandemic impact on the best performers in Athletics and Swimming among Paralympic and non-disabled athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. En cours de révision.
4. Le Toquin, **Schipman J**, De Larochelambert Q, Saulière G, Duncombe S and Toussaint J-F (2021). Is the visual impairment origin a performance factor? Analysis of international level Para swimmers and Para athletes. *Journal of Sports Sciences*. En cours de révision.

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

1. Sedeaud A, De Larochelambert Q, **Schipman J** and Toussaint J-F (2021). The COVID-19 pandemic impact on home advantage in soccer and rugby union. *Frontiers in Sports and Active Living*. En cours de révision.
2. Duncombe SL, Tanaka H, De Larochelambert Q, **Schipman J**, Toussaint J-F and Antero J (2020). High hopes: lower risk of death due to mental disorders and self-harm in a century-long US Olympian cohort compared with the general population. *British Journal of Sports Medicine*. 55(16) :900-905. doi: 10.1136/bjsports-2020-102624.
3. Aubert S, Aucouturier J, Vanhelst J, Fillon A, Genin P, Ganière C, Praznocy C, Larras B, **Schipman J**, Duclos M and Thivel D (2020). France's 2018 Report Card on Physical Activity for

Children and Youth: Results and International Comparisons. Journal of Physical Activity & Health. 17(3):270-277. doi: 10.1123/jpah.2019-0241.

4. Moussa I, Leroy A, Saulière G, **Schipman J**, Toussaint J-F and Sedeaud A (2019). Robust Exponential Decreasing Index (REDI): adaptive and robust method for computing cumulated workload. BMJ Open Sport & Exercise Medicine. ;5(1): e000573. doi: 10.1136/bmjsem-2019-000573
5. Saulière G, Dedecker J, Moussa I, **Schipman J**, Toussaint J-F and Sedeaud A (2019). Quantifying Collective Performance in Rugby Union. Frontiers in Sports and Active Living. 1:44. doi: 10.3389/fspor.2019.00044.

Publications pré-doctorat dans des revues scientifiques internationales

à comité de lecture

1. Marc A, Sedeaud A, **Schipman J**, Saulière G and Toussaint J-F (2018). Age and Performance from 10 Seconds to a 6-Days Race. Journal of Athletic Enhancement. 7:3. doi: 10.4172/2324-9080.1000302.
2. Aubert S, Aucoeur J, Ganière C, Fillon A, Genin P, **Schipman J**, Larras B, Praznocy C, Duclos M and Thivel D (2018). Results from France's 2018 Report Card on Physical Activity for Children and Youth. Journal of Physical Activity & Health. 15(S2):S360-S362. doi: 10.1123/jpah.2018-0511.
3. Marc A, Sedeaud A, **Schipman J**, Jacquemin JA, Saulière G, Kryger KO and Toussaint J-F (2017). Geographic enrolment of the top 100 in athletics running events from 1996 to 2012. Journal of Sports Medicine & Physical Fitness. 57(4):418-425. doi: 10.23736/S0022-4707.16.06019-9.
4. **Schipman J**, Saulière G, Sedeaud A, Deschamps T, Ovigneur H, Maillet H, Berthelot G and Toussaint J-F (2015). Indice de masse corporelle et condition physique chez 49600 collégiens et lycéens de six régions françaises, 2007-2014. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire. 30-31:552-61.
5. Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, Antero-Jacquemin J, **Schipman J**, Saulière G, Marc A, Desgorces FD and Toussaint J-F (2015). Has Athletic Performance Reached its Peak? Sports Medicine. 45(9):1263-71. doi: 10.1007/s40279-015-0347-2.
6. Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, **Schipman J**, Dorsey M, Haida A, Berthelot G and Toussaint J-F (2014). BMI, a performance parameter for speed improvement. PLoS One. 9(2): e90183. doi: 10.1371/journal.pone.0090183.

7. Sedeaud A, Marc A, **Schipman J**, Schaal K, Danial M, Guillaume M, Berthelot G and Toussaint J-F (2014). Secular trend: morphology and performance. Journal of Sports Sciences. 32(12):1146-54. doi: 10.1080/02640414.2014.889841.
8. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, Rizk M, Schipman J, Antero-Jacquemin J, Haida A, Berthelot G and Toussaint J-F. Marathon progress: demography, morphology and environment. Journal of Sports Sciences. 32(6):524-32. doi: 10.1080/02640414.2013.835436.
9. Nassif H, Sedeaud A, Abidh E, **Schipman J**, Tafflet M, Deschamps T, Maillet H, Ovigneur H, Desgorces FD and Toussaint J-F (2014). Monitoring fitness levels and detecting implications for health in a French population: an observational study. 2(5): e001022. doi: 10.1136/bmjopen-2012-001022.
10. Sedeaud A, Marc A, **Schipman J**, Tafflet M, Hager JP and Toussaint J-F (2012). How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. British Journal of Sport Medicine. 46(8):580-4. doi: 10.1136/bjsports-2011-090506.

Ouvrages

Schipman J, Forstmann N, Toussaint JF. Recommandations générales d'activités physiques ou sportives pour la santé. Médecine du sport pour le praticien. De Rivière D, Duclos M. Elsevier Masson Ed, Paris 2019.

Schipman J, Toussaint JF. Mexico 1968 : Plus haut, plus fort et un peu trop loin ? Revue EPS 2018, 380: 52

Johnson S, **Schipman J**, Toussaint JF. Nés pour bouger. Administration & Education 2018, 157:1

Schipman J, Paria A, Sedeaud A, Toussaint JF. L'activité physique, une activité bénéfique. "Activité physique : supplice ou délice ?". Coord par S. Vergès. Ed Le Muscadier / Inserm, Paris 2015. 127p.

Toussaint J-F, **Schipman J**, Nassif H. Politiques françaises & bénéfiques sanitaires de l'activité physique ou sportive. Sport et Santé en Europe. Sport et Citoyenneté. <http://fr.calameo.com/read/000761585be2e8e2a1d11>

Communications dans des congrès internationaux

Schipman J, Saulière G, Le Toquin B, Marc A, Forstmann N, Toussaint J-F and Sedeaud A. Involvement in Multiple Race Events Among International Para and Non-disabled Swimmers. 19ème Congrès International de l'ACAPS, 2021, Montpellier. Communication orale.

Schipman J, Gallo P, Marc A, Antero J, Toussaint J-F, Sedeaud A and Marck A. Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances. 24th congress of *European College of Sport Science (ECSS)*, 2019, Prague. Poster communication.

Schipman J, Gallo P, Marc A, Antero J, Toussaint J-F, Sedeaud A and Marck A. Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances. 66th Annual meeting of the American College of Sports Medicine, 2019, Orlando, Floride. Poster communication.

Schipman J, Gallo P, Marc A, Antero J, Toussaint J-F, Sedeaud A et Marck A. La relation âge-performance chez les athlètes Paralympiques. XIII Symposium de l'IRMES – 11ème Congrès SFMES-SFTS, 2018, Le Havre.

Abréviations

CIP : Comité International Paralympique

CIO : Comité International Olympique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

CIF : Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé

PSH : Personne en Situation de Handicap

APS : Activité Physique et Sportive

JP : Jeux Paralympiques

JO : Jeux Olympiques

Pic de VO_2 : Consommation maximale d'oxygène par l'organisme

FC : Fréquence Cardiaque

PMA : Puissance Maximale Aérobie

IMAP : Integrative Model of Age-Performance

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du nombre de para sportives et para sportifs (courbe orange) et du nombre de pays aux Jeux Paralympiques en fonction des années. (Extrait et adapté de Mauerberg - de Castro et coll, 2016)

Figure 2 : Evolution du nombre de médailles distribuées (courbe orange) et du nombre d'épreuves (courbe bleue) aux Jeux Paralympiques en fonction des années. (Extrait et adapté de l'étude de Mauerberg – de Castro et coll, 2016.)

Figure 3 : Répartition (%) des médailles remportées par sport, pour les 20 sportifs (à gauche) et sportives (à droite) les plus médaillé(e)s aux Jeux Paralympiques d'été. (Extrait des résultats historiques du Comité International Paralympique (1))

Figure 4 : Illustration des 10 meilleures performances mondiales annuelles (A) de 1921 à 2016 chez les femmes pour le 800 m (bleu), le saut en hauteur (vert) et le lancer du poids (orange). Illustration des 10 meilleures performances mondiales annuelles (B) de 1896 à 2016 chez les hommes pour le 800 m (bleu), le saut en hauteur (vert) et le lancer du poids (orange) (Extrait de l'étude de Marck et coll, 2017).

Figure 5 : Cyclicité Olympique (moyenne $\pm$ écart type) basée sur 36 épreuves en athlétisme sur la période 1891-2008 et 34 épreuves de natation sur la période 1963-2008. (Extrait de Berthelot et coll, 2010.)

Figure 6 : Performance moyenne ($\pm$ écart-type) du Top 3 chez les hommes (noir) et femmes (blanc) au marathon international d'Oita entre 1983 et 2011. (Extrait de Lepers et coll, 2012.)

Figure 7 : Performance moyenne ($\pm$ écart-type) des athlètes du Top 3 en fauteuil roulant (WC) et des cyclistes en handbike (HC) entre 1999 et 2010 chez les hommes (gauche) et les femmes (droite) au Marathon de New York City. (Extrait de Lepers et coll, 2014.)

Figure 8 : Performance moyenne (en % des performances Olympiques) des médaillés aux Jeux Paralympiques (classes, sexes et épreuves confondus) entre 1992 et 2012. Les pourcentages au-dessus des points représentent l'évolution du pourcentage de performance entre 1992 et 2012. (Extrait de Burkett et coll, 2018.)

Figure 9 : Meilleure performance des athlètes valides (points noirs) et para de la classe T44 (points blancs) en saut en longueur aux Jeux Olympiques et Paralympiques de 1992 à 2016. Les barres pleines indiquent la différence de performance (en %). (Extrait de Fletcher et coll, 2021.)

Figure 10 : Relation entre la longueur d'un mouvement de bras (en mètre) et la vitesse de nage (en m/s) chez des nageurs finalistes aux Jeux Paralympiques (classes S11 à S13) et Olympiques au 100 m nage libre. (Extrait de Daly et coll, 2009.)

Figure 11 : Densité de concurrence au 100 m et 200 m selon la classification aux Jeux Olympiques et Paralympiques entre 1992 et 2012. L'index de densité correspond au nombre de concurrents divisé par l'écart entre leurs performances = [nombre d'athlètes / (Temps du dernier – Temps du vainqueur)] (Extrait de Grobler et coll, 2015.)

Figure 12 : Evolution des performances exprimées en points, en fonction du classement mondial par classe pour le 100 m nage libre féminin. Le record de l'épreuve par classe équivaut à 1000 points, le temps de chaque nageur est donc rapporté au record de l'épreuve (Extrait de Daly et coll, 1999.)

Figure 13 : Les facteurs clés de la performance sportive pour les athlètes en fauteuil roulant. (Extrait de Paulson et Coll, 2017.)

Figure 14 : Performances maximales par âge chez les hommes au 100 m (en jaune), 800 m (en orange) et marathon (en rouge). (Extrait de Berthelot et coll, 2019.)

Figure 15 : Moyenne d'âge des 50 coureurs les plus rapides du monde selon la distance parcourue. Les épreuves vont de la plus courte (100 m) à la plus longue (épreuve des 6 jours). (Extrait de Marc et coll, 2018.)

Figure 16 : Performances maximales par âge, ajustées avec le modèle de Moore, dans 2 épreuves de natation (ordonnée à gauche en m/s) : 100 m hommes (en bleu) et 200 m femmes (rouge) et une épreuve d'athlétisme (ordonnée à droite en m/s) : le 400 m femmes (noir). (Extrait de Berthelot et coll, 2011.)

Figure 17 : Performances maximales par âge, ajustées avec le modèle IMAP dans les épreuves du 100 m (points bleus) au 3000 m (triangles bleus) à gauche et, à droite, dans les épreuves de fond, du 5000 m (points bleus) au marathon (triangles bleus). (Extrait de Berthelot et coll, 2019.)

Figure 18 : Meilleures performances selon l'âge chez les para nageurs, représentées en box-plots à travers la médiane et la dispersion (en % du meilleur temps personnel). Les courbes grises représentent les prédictions individuelles dérivées de la modélisation linéaire à effets mixtes. (Extrait de Hogarth et coll, 2020.)

Figure 19 : Relation entre la fréquence cardiaque (FC) et la consommation d'oxygène (VO_2) chez des athlètes amputés utilisant une prothèse spécifique pour la course par rapport à un groupe contrôle de sujets valides, pendant des courses sous-maximale et maximale sur tapis roulant. (Extrait de Brown et coll, 2009.)

Figure 20 : Schéma du cadre expérimental de la thèse.

Figure 21 : Performance maximale (en m/s^{-1}) selon l'âge, au 100 m féminin valide (courbe bleue) et au 100 m féminin T37 (paralysie cérébrale) (courbe jaune).

Figure 22 : Trajectoires individuelles de performance selon l'âge en para natation rapportées en pourcentage (%) de la meilleure performance par âge.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Vitesses moyennes de course dans les épreuves de sprint (100 m, 200 m et 400 m) chez des athlètes amputés d'un ou des deux membres inférieurs aux Jeux Paralympiques entre 1996 et 2016. (Extrait de Tuakli-Wosornu et coll, 2021)

Tableau 2 : Vitesse médiane de course (en km/h) $\pm$ écart interquartile des cinq meilleures performances annuelles en contre la montre sur piste sur 1 km pour les para cyclistes et les cyclistes valides aux championnats du monde et Jeux Paralympiques ou Olympiques. (Extrait de Liljedahl et coll, 2020.)

Sommaire

1. Introduction générale.....	22
2. Revue de la littérature.....	25
2.1 Le mouvement Paralympique.....	25
Les prémisses	25
Les sports aux Jeux Paralympiques.....	27
L'évolution du nombre d'épreuves et de médailles	28
Les para sportifs multi médaillés.....	29
Le système de classification	30
Qu'est-ce que le système de classification ?.....	30
Les systèmes de classification	31
La classification Paralympique	32
Un système de classification fondé sur des données probantes ?	32
Les types de handicaps éligibles aux Jeux Paralympiques.....	34
La classification en athlétisme et natation	34
Para athlétisme	34
Para natation	36
La classification chez les sportives et sportifs en situation de handicap visuel.....	37
2.2 Evolution des performances sportives	39
Les performances maximales de l'espèce humaine	39
2.3 Evolution des performances en compétition des para sportifs	42
Para athlétisme	42
Para natation	44
Para cyclisme.....	45
Les écarts de performance en compétition des para sportifs et sportifs valides	46
Variabilité et densité des performances	48
2.4 La performance sportive.....	52
La performance sportive spécifique aux para sportifs.....	53
L'âge, un facteur de la performance	54
La relation âge-performance.....	57
La relation âge-performance chez les para sportifs.....	59
Capacités physiques et physiologiques selon le type de handicap.....	63

Lésion médullaire	63
Amputation des membres.....	65
Paralysie cérébrale	66
Handicap visuel	67
Handicap intellectuel.....	68
2.5 Le handicap congénital et acquis	70
Adaptation et développement.....	71
Performances	73
Les sportifs avec un handicap visuel congénital et acquis	74
3. Questions de recherche	76
4. Objectifs et hypothèses.....	77
5. Contribution scientifique	78
Structure du cadre expérimental.....	78
5.1. Etude 1	79
Liens entre l'étude 1 et 2, 3, 4	114
5.2. Etude 2	115
Lien en l'étude 2 et 3	128
5.3. Etude 3	129
Lien entre les études précédentes et l'étude 4	158
5.4. Etude 4	159
6. Discussion générale.....	171
Apports et limites.....	173
Etude 1	173
Etude 2	175
Etude 3	178
Etude 4	181
7. Conclusion générale	184
8. Références.....	185

1. Introduction générale

Les Jeux Paralympiques (JP) ont connu un développement spectaculaire (2). En 1960 à Rome, date et lieu de la première compétition, 8 disciplines ont regroupé 209 para sportives et para sportifs où seuls les blessés médullaires pouvaient participer. Au fil du temps, de nouveaux sports et un plus large éventail de handicaps ont été intégrés afin de témoigner de l'ouverture et de l'accès au sport à l'ensemble des personnes en situation de handicap (3). L'évolution des JP est aussi caractérisée par le passage du sport en tant que compétition à visée thérapeutique à celui d'événement réservé à des para sportives et para sportifs de haut niveau, tenant compte d'une rivalité et d'un investissement croissants des nations (4). En 2021, les JP de Tokyo ont accueilli environ 4400 sportives et sportifs de 162 pays concourant dans 23 disciplines.

Après plus de 80 ans, les compétitions et les disciplines se sont progressivement professionnalisées (5). L'ère du para sport de haut niveau est étroitement associée à la professionnalisation du sport Paralympique. Cette évolution permet désormais à travers l'enregistrement, la publication des meilleures performances et des records des para sportives et para sportifs, de consulter des bases de données conséquentes.

L'expression de ces performances résulte de l'optimisation de très nombreux facteurs. Le contexte économique, social, politique, sanitaire et environnemental (6) a un rôle déterminant dans l'évolution des capacités individuelles et des performances sportives, que ce soit dans l'accès à une pratique d'activité physique et sportive chez les personnes en situation de handicap jusqu'aux conditions d'entraînement et de compétition des para sportives et para sportifs de haut niveau.

Ces déterminants se reflètent dans l'évolution des capacités physiologiques et dans l'amélioration des performances avec le temps. Miroir de ces investissements, les performances annuelles des dix meilleurs sportives et sportifs valides (7) et le nombre de records du monde cumulé (8,9) ont progressé depuis 1890 jusqu'à atteindre un maximum dans les années 1970 (8), suivi d'une stagnation, plus ou moins importante selon la discipline, depuis les années 1990 (10).

Dans les disciplines et épreuves Paralympiques, peu d'études se sont intéressées à ces évolutions. L'attractivité récente, le faible nombre de données disponibles, de compétition ou de para sportives et para sportifs selon les classifications de handicap pourraient être l'une des

explications. Pour autant, dans les quelques épreuves observées, les performances ont légèrement ou peu augmenté ces dernières années en athlétisme (11,12) et en natation Paralympique (13).

Les facteurs de la performance sportive sont multiples. Parmi eux, l'âge ressort comme un déterminant majeur (14–18). Son effet sur les performances maximales est une thématique de recherche très étudiée dans le sport de haut niveau valide qui révèle des patterns (trajectoires/développement) similaires et identifie des âges où le potentiel de performance physique et sportif est maximal. La nature de la relation âge-performance a été modélisée avec différents types de régressions (19–22), ne tenant pas toujours compte de la physiologie humaine. Très peu d'études se sont intéressées à ce facteur chez les para sportives et para sportifs qui peuvent présenter des spécificités, tant physiques que physiologiques, selon le type de handicap.

Une grande majorité des recherches actuelles portent sur l'impact du handicap afin d'optimiser le système de classification. Pour autant, fort des dynamiques de performances observées selon l'âge, le moment d'apparition du handicap, inné ou acquis au cours de la vie pourrait avoir une influence importante sur l'âge au pic et le niveau de performance maximal atteint (23,24). Intégrer l'origine du handicap dans l'analyse des performances liées à l'âge pourrait permettre de fournir des informations sur la manière dont un handicap, inné ou acquis au cours de la vie, peut influencer les parcours individuels.

Le système de classification a pour objectif d'assurer l'équité du sport Paralympique (25). Pour l'atteindre, de nombreuses classes sont définies au sein de chaque discipline sportive. En para natation, 14 classes différencient les handicaps, dont 10 pour les sportives et sportifs avec atteinte motrice. Aux JP de Tokyo, la natation avec 146 épreuves, était la deuxième discipline, derrière l'athlétisme à proposer autant d'épreuves. Conséquence éventuelle, parmi les 20 para sportives et para sportifs les plus médaillé(e)s de l'histoire des JP tous sports confondus, plus de la moitié sont des para nageuses et nageurs (1) dans différents styles et distances de nage. Les explications possibles tiendraient à la capacité à performer sur plusieurs épreuves au sein d'une même classe, associée à un plus faible nombre de nageuses et nageurs par type et classe de handicap, c'est-à-dire à une faible densité de concurrence, entre autres. Mais ces hypothèses ont été peu étudiées dans la littérature (26). Leur validation éventuelle, et leur prise en compte, pourraient permettre de nouveaux succès Paralympiques.

Identifier ces facteurs spécifiques au domaine Paralympique, grâce à l'épidémiologie de la performance, représentent une approche novatrice qui pourrait fournir de nouveaux outils permettant aux sportifs de mieux se situer, de comprendre et d'anticiper leurs progressions, selon les variabilités singulières de cette population dans chacune des disciplines.

2. Revue de la littérature

2.1 Le mouvement Paralympique

Cette partie propose une vue d'ensemble de la construction du mouvement Paralympique depuis ses débuts, décrivant les principaux événements et idées qui ont façonné le mouvement jusqu'à ce jour afin d'en comprendre sa construction au regard de ce que représentent les JP d'été et les performances réalisées par les para sportives et para sportifs ces dernières années.

Historiquement, le développement du mouvement Paralympique a été alimenté par trois facteurs. (2). Le premier était la volonté d'optimiser la réadaptation des personnes en situation de handicap (PSH), qui en grande majorité, étaient des blessés médullaires. Le deuxième était la revendication d'un droit à participer à un sport similaire à celui des personnes dites « valides ». Le dernier, plus récent, est la reconnaissance du sport Paralympique comme sport d'élite, passionnant et inspirant.

Ces évolutions ont été marquées à travers cinq grandes périodes : le sport comme moyen de réhabilitation (1944-1952) ; le sport en dehors de la réhabilitation à l'hôpital (1952-1959) ; les Jeux Paralympiques de Rome et Tokyo faisant suites aux Jeux Olympiques (JO) (1960-1964) ; l'unification du mouvement (1964-1987) et le sport Paralympique à maturité (1988 à aujourd'hui).

Les prémisses

C'est en Angleterre, dans l'unité de soins nationale des blessés médullaires de l'hôpital de Stoke Mandeville, que le Dr Ludwig Guttmann, a utilisé l'activité physique ou sportive (APS) comme thérapie pour ses patients paraplégiques afin de les rendre "aussi indépendants que possible et ainsi permettre de retrouver la place qui leur revient dans la vie sociale" (2). Il fût organisé dans cet hôpital, une des premières compétitions sportives qui coïncidait avec la cérémonie d'ouverture des JO de Londres de 1948. Dans un premier temps réservée exclusivement aux blessés médullaires évoluant en fauteuil, la compétition a été ouverte à l'internationale 4 ans après. Elle fût appelée les « International Stoke Mandeville Games ».

En 1960, le CIP a reconnu les Jeux de Rome comme les 1^{er} JP (connus sous le nom de 9^{èmes} Jeux Internationaux de Stoke Mandeville). L'étymologie du terme « Paralympique » reste aujourd'hui encore incertaine et pourrait représenter les mots « paraplégie » et « Olympique ». Cependant, afin de ne pas réserver les JP exclusivement aux PSH évoluant en fauteuil, l'étymologie a été redéfinie. Le terme « Paralympique » proviendrait des mots grecs « para » (du préfixe « à côté de » / « parallèle ») et « olympique » et pourrait être interpréter comme : parallèle aux JO (2).

A la suite des 1^{er} JP, des tentatives ont été faites pour organiser les JP tous les quatre ans dans la ville hôte des JO. Malgré le succès initial des JP de Rome et de Tokyo, les villes hôtes organisant les JO suivants ont refusé d'accueillir les compétitions Paralympiques (4). En 1988, les JP ont été de nouveau organisés en parallèle des JO. Le programme des JP s'est élargi tant du point de vue du nombre de sports proposés qu'en termes de diversification de types de handicaps éligibles afin de promouvoir l'idée d'un sport accessible à tous. Les formules successives des JP illustrent le passage du sport comme compétition à visée thérapeutique à ses débuts à celui de compétition sportive de niveau internationale réservée à des sportifs d'élites, comprenant un investissement et une rivalité croissante des nations. En effet, le sport Paralympique pratiqué en compétition peut être un moyen de réduire certaines inégalités auxquelles les PSH sont confrontées dans leur vie quotidienne, tout en leur donnant la possibilité de se confronter à leurs pairs. Le sport de compétition peut ainsi jouer un rôle clé et se traduire par une meilleure qualité de vie. Les JP représentent l'événement sportif le plus important pour les sportives et sportifs en situation de handicap et offrent une structure organisée dans plusieurs disciplines sportives.

Depuis 1960, les JP ont été régis institutionnellement par plusieurs organisations, chacune représentant un type de handicap (2). En 1982, face à la nécessité de coordonner les JP, le Comité international de coordination du sport pour les déficients a été créé (4) afin de collaborer avec le comité directeur des JO (27). C'est en 1989 que le CIP voit le jour et peut-être considéré comme l'équivalent du Comité International Olympique (CIO) pour les sportifs valides. Le CIP organise les JP et fait office de fédération internationale pour neuf sports. L'IPC a été créé afin d'étendre et de stabiliser le sport d'élite pour les PSH (2). Elle répond à la devise « L'esprit, le corps, l'âme ».

Les sports aux Jeux Paralympiques

En 1960, huit sports étaient représentés : l'athlétisme, le basket en fauteuil, le dartschery (*combinaison du jeu de fléchettes et du tir à l'arc*), l'escrime fauteuil, la natation, le snooker (billard), le tennis de table et le tir à l'arc. Au cours du temps, d'autres sports ont été ajoutés tels que les sports collectifs (rugby fauteuil, football), sport de combat (judo) ou bien encore plus récemment le triathlon en 2016. Aux derniers JP de Rio, 22 sports étaient représentés. L'athlétisme et la natation, sports analysés dans le cadre de cette thèse, font partie des sports historiques et majeurs des JP.

A Rome et jusqu'en 1972, les JP étaient réservés exclusivement aux blessés médullaires (4). A partir de 1976, les sportives et sportifs avec d'autres types de handicap ont pu participer aux JP. Cette ouverture a contribué à l'augmentation du nombre de participants (Figure 1) (28)

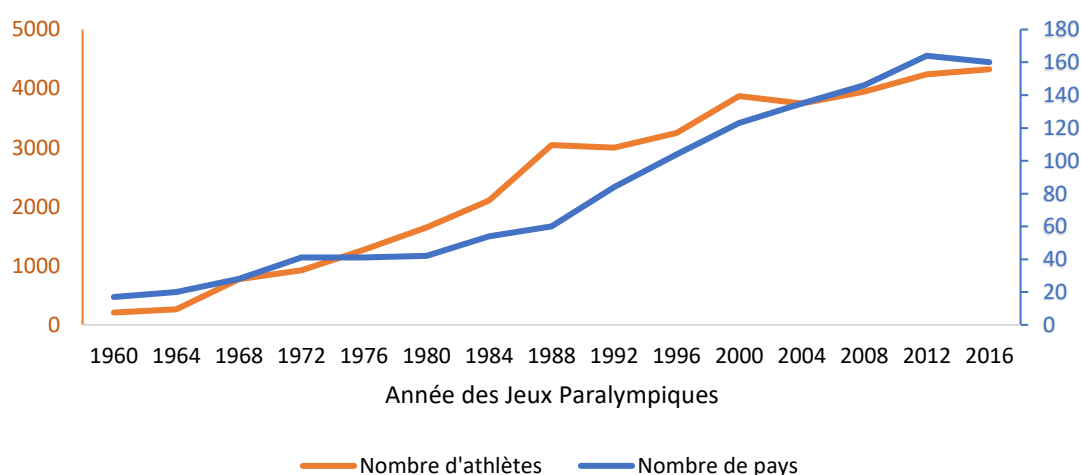


Figure 1 : Evolution du nombre de para sportives et para sportifs (courbe orange) et du nombre de pays aux Jeux Paralympiques en fonction des années. (Extrait et adapté de Mauerberg-deCastro et coll, 2016)

Les JP sont le deuxième plus grand événement sportif au monde (28). En 1960, 12 % de la totalité des pays du monde étaient représentés aux JP. En 2012, 82 % des pays du monde étaient représentés, soit l'édition ayant eu le taux de participation le plus important depuis la création des JP.

L'évolution du nombre d'épreuves et de médailles

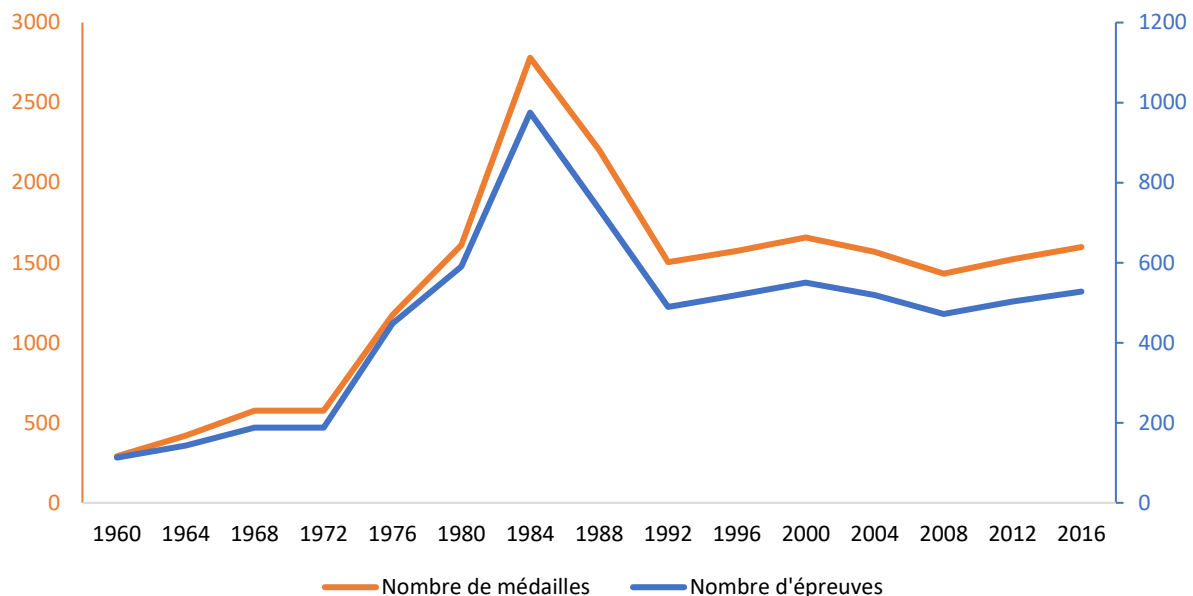


Figure 2 : Evolution du nombre de médailles distribuées (courbe orange) et du nombre d'épreuves (courbe bleue) aux Jeux Paralympiques en fonction des années. (Extrait et adapté de l'étude de Mauerberg-deCastro et coll, 2016)

Entre 1972 et 1984, un nombre important de médailles a été distribué (Figure 2) alors que le nombre de pays y prenant part a peu évolué. En 1992, suite à des restrictions imposées par le CIP (29), le nombre d'épreuves proposées et de médailles distribuées a diminué. L'évolution du système de classification, passant d'une classification médicale à fonctionnelle des para sportifs, utilisée pour la première fois en 1992, a permis de stabiliser le nombre d'épreuves présentes aux JP et ainsi le nombre de médailles distribuées.

Depuis cette période, l'inclusion de nouveaux sports est évaluée par le CIP sur plusieurs critères : la participation mondiale (c'est-à-dire des pays et des continents), le calendrier quadriennal des compétitions, la conformité du système de classification des sportifs, un programme antidopage, des règles et règlements, et des preuves de l'attrait du sport pour le public (30).

L'athlétisme et la natation représentent les sports pour lesquels le plus de médailles sont distribuées aux JP et ce, grâce principalement à un nombre d'épreuves proposées conséquent selon la classification des sportifs (31,32). Ces 2 sports représentaient 40% de la totalité des

sportifs qui ont participé aux JP de Rio et 20% des médailles. Cela représente 1140 athlètes de 146 pays différents pour un total de 177 médailles distribuées (32) et 593 nageurs et nageuses de 79 pays différents pour un total de 152 médailles distribuées (31). A titre informatif, les JO de Rio en 2016 ont réuni 11 180 sportifs, participant à 306 épreuves pour un total de 973 médailles attribuées.

Les para sportifs multi médaillés

Fort d'un nombre d'épreuves conséquent aux JP, le nombre de médailles obtenues par les mêmes para sportifs au cours de leur carrière dans différentes épreuves et disciplines (1,31,32) apparaît comme une spécificité.

Parmi les 20 para sportives et para sportifs les plus médaillé(e)s aux JP tous sports confondus (1), 82% et 69% l'ont été en athlétisme et natation, respectivement par les hommes et les femmes (Figure 3).

Trischa Zorn, la para sportive la plus médaillée de l'histoire des JP, a remporté 46 médailles en natation dont 32 en Or. Cette singularité met en lumière le fait que les para sportives ont un pourcentage de médailles obtenues au cours de leur carrière sportive plus élevé comparativement aux hommes (33), tendance observée au sein d'un échantillon de 345 para sportifs brésiliens de niveau national à élite.

Chez les hommes, avec 27 médailles en Tir Sportif dont 17 en Or, Jonas Jacobsson est le para sportif ayant remporté le plus de titres.

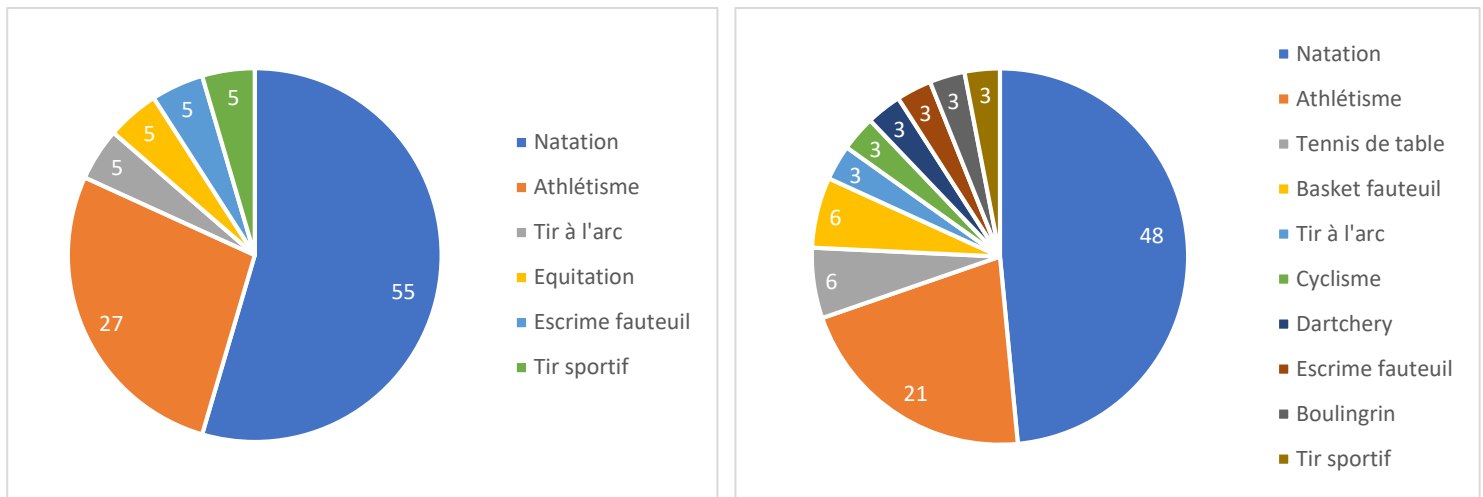


Figure 3 : Répartition (%) des médailles remportées par sports, pour les 20 sportifs (à gauche) et sportives (à droite) les plus médaillé(e)s aux Jeux Paralympiques d'été. (Extrait des résultats historiques du Comité Internationale Paralympique (1))

A titre informatif, parmi les 20 sportives et sportifs Olympiques les plus médaillé(e)s, 35% des médailles chez les femmes et 40% des médailles chez les hommes ont été obtenus en natation et athlétisme.

Le système de classification

Le système de classification utilisé dans le sport Paralympique est une notion fondamentale qui a un impact significatif sur la carrière et le succès des para sportives et para sportifs. D'une part, il va permettre de déterminer l'éligibilité d'un para sportif à participer à une discipline Paralympique selon son handicap. D'autre part, la classification est le seul moyen d'assurer une forme d'équité, ce qui représente la principale distinction avec le sport Olympique au niveau structurel (13,34,35).

Qu'est-ce que le système de classification ?

La classification est un processus dans lequel un groupe d'entités est ordonné en plusieurs groupes (ou classes) plus petits en fonction des propriétés observables qu'ils ont en commun (36).

Cette application est fondée sur la taxonomie qui est la science sur la manière de classifier. La classification Paralympique est issue des systèmes de classification utilisés dans deux domaines (37) :

- 1- Le domaine de la santé fonctionnelle. La classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) est la classification la plus utilisée dans le domaine de la santé fonctionnelle.
- 2- Le domaine du sport. Deux types de classification sont utilisés : la classification des performances sportives et la classification sélective. Les sports Paralympiques requièrent des systèmes de classification sélectifs afin que les para sportives et para sportifs qui améliorent leurs performances en compétition ne soient pas déplacés vers une classe supérieure, comme ils le feraient dans un système de classification des performances.

Les systèmes de classification

Deux formes principales de classification sont utilisées dans le sport (37). La première est la classification par performance : la taxonomie de cette unité de classification est représentée par le niveau de performance dans la discipline sportive. A titre d'exemple, le handicap au golf, les ceintures dans les sports de combats ou bien le niveau des championnats dans les sports collectifs sont représentatifs d'une classification par niveau de performance. De fait, les sportives et sportifs qui améliorent leurs performances par une meilleure condition physique, l'acquisition de compétences ou d'autres moyens sont reclassés dans une classe plus performante. La seconde est la classification par sélection soit par exemple l'ensemble des facteurs prédictifs corrélés à la performance : la classification par niveau d'âge, par poids de corps et taille, par sexe. Les systèmes de classification des performances et les systèmes de classification sélective favorisent la participation en fournissant un cadre pour une concurrence juste et équitable.

La classification Paralympique

Durant les premières années du mouvement, la classification Paralympique était basée sur des critères médicaux. Les sportifs se voyaient attribuer une seule classe, qui était éligible pour plusieurs disciplines (37).

Le terme "système de classification fonctionnelle" est actuellement le terme le plus largement utilisé pour décrire les systèmes de classification utilisés dans les sports Paralympiques. Cependant, le terme de classification fonctionnelle est problématique : il implique que les para sportives et para sportifs soient placés dans des classes selon leur fonction. Or, le terme fonction, tel qu'il est défini dans la CIF, est un terme générique très général qui doit être utilisé pour désigner tout ou partie des composantes de la CIF, y compris les structures corporelles, l'activité ou la participation à la société.

En raison de son caractère général, ce terme n'est pas utile pour décrire la classification dans le sport Paralympique ; et au sein du mouvement Paralympique, la signification du terme "système de classification fonctionnelle" varie d'un sport à l'autre.

Dans les systèmes fonctionnels, les principaux facteurs qui déterminent la classe ne sont pas le diagnostic et l'évaluation médicale, mais la mesure dans laquelle le handicap d'une personne influe sur les performances sportives. Cette classification doit être spécifique à chaque discipline

Historiquement, la transition d'un système de classification médicale à fonctionnelle a commencé à la fin des années 70. En 1989, les comités d'organisation des JP de Barcelone et le CIP ont signé un accord qui stipulait que tous les sports Paralympiques représentés lors de ces JP devaient reposer sur des systèmes de classification fonctionnelle spécifiques.

Un système de classification fondé sur des données probantes ?

Un système de classification fondé sur des données probantes est un système dans lequel le système a un objectif clairement défini fondé sur des preuves empiriques pour l'attribution de la classe. La classification attribuée à une para sportive ou un para sportif a un impact significatif sur sa carrière et sa capacité à performer. Certains systèmes de classification Paralympique actuels sont encore basés sur le jugement d'un petit nombre de classificateurs expérimentés plutôt que

sur des preuves empiriques (36). Par conséquent, la validité des méthodes utilisées dans les systèmes de classification fonctionnelle est encore souvent mise à caution. C'est pourquoi, de plus en plus d'études sur l'impact de la classification sur la performance ont été soutenues par le CIP avec pour objectif de réduire les inégalités.

Les types de handicaps éligibles aux Jeux Paralympiques

Pour participer aux JP, une para sportive ou un para sportif doit présenter au moins 1 handicap sur les 10 éligibles (38). Trois groupes distincts regroupent ces différents types de handicaps. Les handicaps visuels, les intellectuels et physiques, comprenant les limitations d'activité de nature biomécanique, la réduction de la puissance musculaire et de l'amplitude des mouvements, la déficience d'un membre, une différence de longueur des jambes, une hypertonie, une ataxie, une athétose et une réduction totale de la taille des membres.

La classification en athlétisme et natation

L'ensemble des analyses dans cette thèse ont porté sur l'athlétisme et la natation. Ces deux sports, les plus pourvoyeurs de médailles aux JP, concernent des para sportives et para sportifs présentant différents types de handicaps.

Para athlétisme

Ce sport est ouvert à tous les athlètes en situation de handicap intellectuel, visuel ou physique. Aux JP de Tokyo 2021, l'athlétisme était représenté par 157 épreuves catégorisées par une lettre ("T" pour « Track » = « piste » qui correspond aux courses ou aux sauts, "F" « Field » = « champ » qui correspond aux lancers), suivie d'un nombre qui indique le type et la sévérité du handicap. Un chiffre plus bas indique une limitation fonctionnelle plus élevée (39).

Le premier chiffre est la dizaine qui correspond à la famille de handicap : 10 = handicaps visuels ; 20 = handicaps intellectuels ; 30 = handicaps d'origine cérébrale ; 40 = amputations ou assimilés ; 50 = handicaps moteurs suite à atteinte de la moëlle épinière ou assimilées.

Les athlètes avec un handicap visuel concourent dans trois classes sportives de T/F 11 à T/F 13. Afin de garantir une compétition équitable, les athlètes de la classe sportive 11 portent des lunettes opaques.

Les athlètes qui présentent un handicap intellectuel sont représentés par la classe T/F 20 qui se traduit généralement par des difficultés en matière de reconnaissance des formes, de mémoire et de reproduction du geste. Leur quotient intellectuel évalué avant 18 ans est inférieur à 75.

Les athlètes évoluant dans les classes F31 et T32/F32 à T38/F38 présentent des mouvements involontaires, non coordonnés et/ou une tension musculaire souvent associés à une paralysie cérébrale ou à une lésion cérébrale. La capacité à contrôler les jambes, le tronc, les bras et/ou la fonction des mains est généralement affectée. Les athlètes des classes sportives 31 à 34 concourent en position assise. Les athlètes des classes 35 à 38 concourent debout dû à une meilleure fonction des jambes et un meilleur contrôle du tronc.

Les athlètes de petite taille concourent dans les classes sportives T/F40 et T/F41. Il existe deux classes en fonction de la taille de l'athlète et de la proportionnalité des bras. Les athlètes de la classe sportive 41 sont plus grands que les athlètes de la classe sportive 40.

Les athlètes qui concourent dans les classes T42/F42, T46/F46, T47 et T61/F61 à T64/F64 pratiquent debout et présentent des amputations ou des membres manquants ou raccourcis. Dans les classes 42 à 44, les jambes sont affectées et dans les classes 45 à 47, les bras sont affectés. Les athlètes avec une prothèse aux membres inférieurs sont classés dans les classes T61/F61 à T64/F64.

Les athlètes en classes T51 à T54 et F51 à F57 concourent en position assise en raison d'une puissance musculaire réduite, d'une limitation de l'amplitude des mouvements, d'une déficience d'un membre ou d'une différence de longueur de jambe. Les athlètes des classes T51 et T52 ont des limitations dans les jambes et les bras. Les athlètes de la classe T53 ont une fonction complète dans les bras, mais une fonction du tronc sévèrement limitée. Les athlètes de la classe T54 ont une fonction partielle ou complète du tronc et peuvent démontrer une certaine fonction des jambes.

Chez les lanceurs, les athlètes des classes sportives F51 à F53 ont une fonction limitée de l'épaule, du bras et de la main à différents degrés et généralement aucune fonction du tronc ou des jambes. Les athlètes de la classe F54 n'ont aucune fonction du tronc ou des jambes. Les athlètes de la classe F55 ont une activité partielle à complète des muscles abdominaux, mais aucune fonction des jambes. Les athlètes de la classe F56 peuvent plier partiellement leurs hanches et leurs jambes en plus de la fonction du tronc, tandis que les athlètes de la classe F57 démontrent une capacité

supplémentaire d'extension et d'abduction des hanches. Les athlètes de la classe F57 sont capables de se tenir debout et de marcher avec ou sans dispositif d'assistance.

Para natation

Comme pour l'athlétisme, ce sport est ouvert à toutes les nageuses et nageurs en situation de handicap physique, visuel ou mental. Aux JP de Tokyo 2021, la natation était représentée par 146 épreuves. Tous les styles de nage et la plupart des épreuves, à l'exception du 800m et du 1500m, figuraient au programme. La lettre "S" désigne la nage libre, le dos et le papillon, "SB" la brasse et "SM" les distances parcourues dans les 4 nages (*medley*). Les chiffres désignent le type et la sévérité du handicap (40).

Les nageuses et nageurs en situation de handicap visuel concourent dans trois classes sportives de S/SB11 à S/SB13. Afin d'assurer une compétition équitable, les nageuses et nageurs de la classe 11 doivent porter des lunettes opaques. Pour assurer la sécurité dans les virages et annoncer la fin de la course, les nageuses et nageurs de la classe 11 sont associés à un « tapeur » (personne équipée d'une perche au bord du bassin qui, en leur touchant la tête ou le corps, les prévient de l'approche du mur).

Les nageuses et nageurs de la classe 14 présentent un handicap intellectuel, ce qui entraîne généralement des difficultés au niveau de la reconnaissance des formes, des séquences et de la mémoire. Leur quotient intellectuel évalué avant 18 ans est inférieur à 75.

Les nageuses et nageurs de la classe S1 ont une perte significative de la puissance ou du contrôle musculaire de leurs jambes, bras et mains. Certains ont également un contrôle limité du tronc. Les nageuses et nageurs des classes S2 et SB1 se servent principalement de leurs bras pour nager. Les fonctions des mains, du tronc et des jambes sont limitées en raison d'une tétraplégie ou de problèmes de coordination. Les classes S3 et SB2 comprennent des nageurs amputés des bras et des jambes. Les nageuses et nageurs des classes S4 et SB3 peuvent utiliser leurs bras et ont une fonction passable dans leurs mains, mais ne peuvent pas utiliser leur tronc ou leurs jambes. Les nageuses et nageurs amputés de trois membres peuvent également être inclus dans cette classe.

Les nageuses et nageurs de petite taille en classes S5 et SB4 présentent une déficience supplémentaire : une perte de contrôle d'un côté du corps (hémiplégie) ou une paraplégie. Les

classes S6 et SB5 comprennent les nageuses et nageurs de petite taille ou amputés des deux bras, ou présentant des limitations modérées de coordination d'un côté du corps.

Les classes S7 et SB6 sont représentées par des nageuses et nageurs ayant une amputation d'une jambe et d'un bras sur des côtés opposés, ou une paralysie d'un bras et d'une jambe du même côté. Celles et ceux ayant un contrôle total des bras et du tronc et une certaine fonction des jambes peuvent concourir dans cette classe. Les nageuses et nageurs des classes S8 et SB7 ont une amputation d'un bras et peuvent présenter des limitations importantes au niveau des articulations de la hanche, du genou et de la cheville. Les nageuses et nageurs des classes S9 et SB8 nagent avec des contraintes articulaires dans une jambe ou peuvent présenter une double amputation tibiale. Enfin, les nageurs des classes S10 et SB9 présentent des handicaps physiques minimales allant de la perte d'une main ou une limitation articulaire au niveau de la hanche.

La classification chez les sportives et sportifs en situation de handicap visuel

Le système de classification du handicap visuel est le même pour la natation et l'athlétisme. Il est uniquement basé sur un diagnostic médical, contrairement aux autres types de handicap dont la classification dépend de l'impact du handicap sur les performances. Ce système utilise la définition de la cécité et de la déficience visuelle de l'Organisation Mondiale de la Santé (41). Le système de classification regroupe les sportives et sportifs en 3 catégories après un diagnostic ophtalmologique (39,40) qui est basé sur l'acuité et le champ visuels.

Actuellement, l'unité qui permet de quantifier l'acuité visuelle est le LogMAR. Cette échelle est basée sur des mesures statistiques de l'acuité visuelle en population générale. Le MAR (angle minimum de résolution) est l'unité qui définit le pouvoir séparateur de l'œil (résolution spatiale). Il correspond à l'angle minimum que peuvent occuper deux sources lumineuses ponctuelles vis à vis de l'œil.

En classe 11, l'acuité visuelle est inférieure à 2,60 sur l'échelle LogMAR sans aucune perception de la lumière. En classe 12, l'acuité visuelle est comprise entre 1,50 et 2,60 (inclus) et/ou le champ visuel est inférieur à 10 degrés. En classe 13, l'acuité visuelle est comprise entre 1,40 et 1 et/ou le champ visuel est inférieur à 40 degrés.

À retenir

Le mouvement Paralympique s'est construit progressivement depuis 1960. En 1989, le Comité International Paralympique a été créé afin d'étendre et de stabiliser le sport d'élite en faveur des personnes en situation de handicap. La professionnalisation de ce mouvement est récente.

La concurrence internationale se densifie de plus en plus avec pour conséquence un nombre de para sportives et para sportifs en constante progression aux Jeux Paralympiques.

Une part importante de sportives et sportifs multimédaillés est à recenser dans le sport Paralympique, en particulier en natation et athlétisme.

Le système de classification utilisé actuellement date de 1992. Il est basé sur l'impact du handicap sur les performances sportives. Cette classification est spécifique à chaque discipline. L'âge du para sportif n'est pas pris en compte dans ce système.

2.2 Evolution des performances sportives

Dans la partie ci-dessous sont évoqués l'évolution, la variabilité et les écarts de performances réalisées par des sportifs valides et para sportifs de haut niveau afin de situer le contexte sur les capacités de progression. Par la suite, l'identification des facteurs de performance et des modèles de haute performance seront décrits, avec une focale sur l'âge. Enfin, l'analyse des capacités physiques selon le handicap permettra d'appréhender les adaptations physiologiques et leur impact potentiel sur les performances.

Les performances maximales de l'espèce humaine

Depuis un siècle (42), les performances sportives fournissent des données précieuses pour appréhender la physiologie humaine. Ces données représentent les mesures les plus précises des capacités maximales humaines (6,7,42–44). Leurs tendances historiques permettent de mesurer le progrès humain, ses étapes consécutives et ses déterminants. Les sportifs détenteurs de records du monde expriment les limites de la physiologie humaine (7,42,45). Les performances maximales annuelles représentent un marqueur unique pour la compréhension des changements liés à l'âge tout au long de la vie, tant au niveau individuel que populationnel, fournissant un indicateur phénotypique simple de la croissance et du vieillissement (14,16). Ces données de performance maximale apparaissent également fortement liées à l'interaction entre la physiologie et les changements environnementaux (43,46,47).

L'analyse historique des performances offre une lecture précise et originale des progressions et accélérations de notre société (9). Les meilleures performances en athlétisme (7,8,48), en natation (49,8,7,50), en haltérophilie (8), en cyclisme (51,52), en ski (51) ou encore en patinage de vitesse (8,53) ont considérablement progressé, jusqu'à la fin du vingtième siècle, excepté durant les deux guerres mondiales. Par exemple, au marathon, la meilleure performance mondiale masculine validée par l'IAAF (Association internationale des fédérations d'athlétisme) est passée de 2 h 55 min 18s en 1908 à 2 h 01 min 39s en 2018 (54). De même, au 100 m nage libre, le record mondial était de 65s en 1905 pour s'établir à 49,91 s en 2009 (55), tandis que le record de l'heure en cyclisme est passé de 26,508 km en 1876 à 55,089 km en 2019.

Malgré ces progressions, les données analysées entre 1896 à 2016 ont montré un schéma similaire de ralentissement dans l'amélioration des performances en athlétisme, natation, cyclisme, patinage et haltérophilie, suggérant une tendance à la stagnation depuis trois décennies (7,8,50,56,57). En tenant compte du décalage moyen de 30 ans entre hommes et femmes, les performances féminines ont également commencé à plafonner depuis le milieu des années 1980 (7,58).

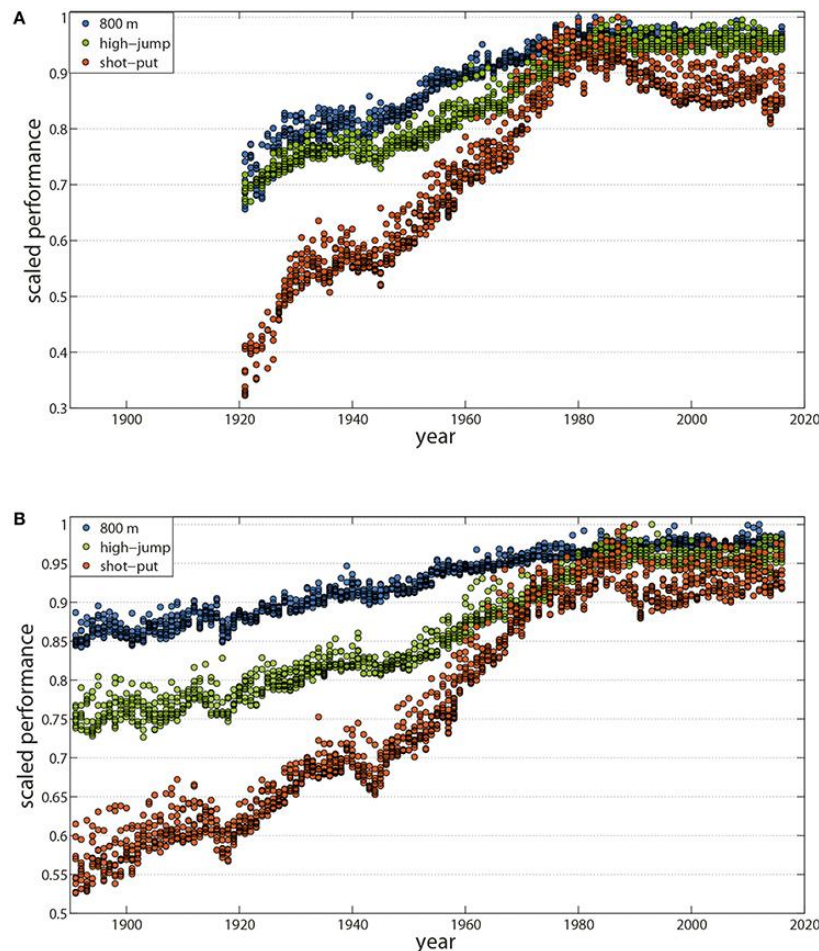


Figure 4 : Illustration des 10 meilleures performances mondiales annuelles (A) de 1921 à 2016 chez les femmes pour le 800 m (bleu), le saut en hauteur (vert) et le lancer du poids (orange).

Illustration des 10 meilleures performances mondiales annuelles (B) de 1896 à 2016 chez les hommes pour le 800 m (bleu), le saut en hauteur (vert) et le lancer du poids (orange) (Extrait de l'étude de Marck et coll, 2017).

Cette stagnation, illustrée dans le Figure 4, est la résultante de l'optimisation de l'ensemble des facteurs de performance. La locomotion repose sur des propriétés biologiques et biomécaniques structurelles et fonctionnelles qui semblent aux limites de leur capacités (59), telles que la

limitation de l'absorption d'oxygène, la fréquence cardiaque maximale, la masse et la contraction musculaires, le temps de réaction, ou encore la longueur et la fréquence des foulées (7,57,59–63).

Durant la guerre froide, les pratiques dopantes (7,64) et les innovations pharmacologiques ont exacerbé la prise de médicaments (érythropoïétine, hormones de croissance, hormones stéroïdiennes et amphétamines (7,9,64,65)). L'effet est difficile à mesurer avec précision, mais la dernière progression majeure des performances au cours des années 80 et 90 pourrait être liée à ces conduites (7,52,64,66).

En l'absence de modifications des règlements et d'améliorations technologiques, les stagnations obtenues suite aux différentes progressions asymptotiques pourraient refléter ainsi les maxima de l'espèce humaine observées depuis trois décennies.

La technologie représente un facteur important de la progression des performances. En natation, les trois générations successives de combinaisons entre 1990-2009 ont amélioré les performances des meilleurs nageurs mondiaux de 3% en moyenne avant leur interdiction en 2010 (7,50). En athlétisme, les premières chaussures utilisées depuis 2017, intégrant des composites en carbone, ont permis de nombreux records sur les épreuves de longue distance (demi-fond et fond) et désormais aussi sur les épreuves courtes (66,67).

Les meilleures performances sont également soumises à une cyclicité (régularité temporelle) de 4 ans, dont les JO sont le principal attracteur. Durant les mois précédant les Jeux, une augmentation de 1% des performances est observée, suivie l'année d'après par une régression d'environ 0,4% (10,50,68,69).

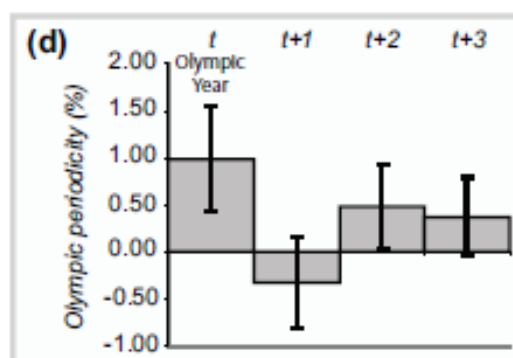


Figure 5 : Cyclicité Olympique (moyenne $\pm$ écart type) basée sur 36 épreuves en athlétisme depuis le sur la période 1891-2008 et 34 épreuves de natation sur la période 1963-2008. (Extrait de Berthelot et coll, 2010.)

En athlétisme et natation, une augmentation moyenne des performances de 0,99% est observée l'année des JO (Figure 5), suivi par une baisse l'année suivante de -0,32% (10). L'optimisation de la planification et la périodisation de l'entraînement seraient les principaux facteurs explicatifs (69) afin d'atteindre son pic de forme lors des compétitions majeures.

2.3 Evolution des performances en compétition des para sportifs

Dans ce contexte de stagnation des performances chez les athlètes valides, la littérature sur les performances des para sportives et para sportifs en compétition fournit des analyses centrées sur des épreuves spécifiques. De plus, le nombre d'études et le recul des données restent limités. Le para athlétisme et la para natation représentent les 2 sports les plus étudiés dans la littérature.

Para athlétisme

Les premières analyses sur les performances en compétition des para sportifs ont été réalisées chez des athlètes en fauteuil lors du « World Wheelchair Games » de 1984 (70).

L'une des plus anciennes et célèbres courses en fauteuil de l'histoire est le marathon d'Oita au Japon. Entre 1983 et la fin des années 1990 (Figure 6), les temps réalisés par les meilleurs athlètes ont diminué progressivement (71) jusqu'à atteindre un plancher à partir des années 2000. Au marathon de New York (Figure 7), les performances des athlètes en fauteuil et cyclistes évoluant en handbike se sont également améliorées entre 1999 et 2003 et tendent aujourd'hui à se stabiliser (11).

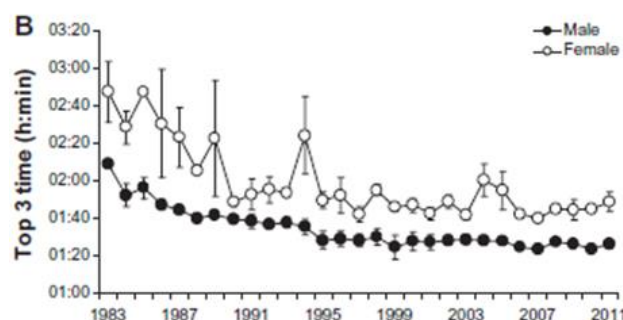


Figure 6 : Performance moyenne ($\pm$ écart-type) du Top 3 chez les hommes (noir) et femmes (blanc) au marathon international d'Oita entre 1983 et 2011. (Extrait de Lepers et coll, 2012.)

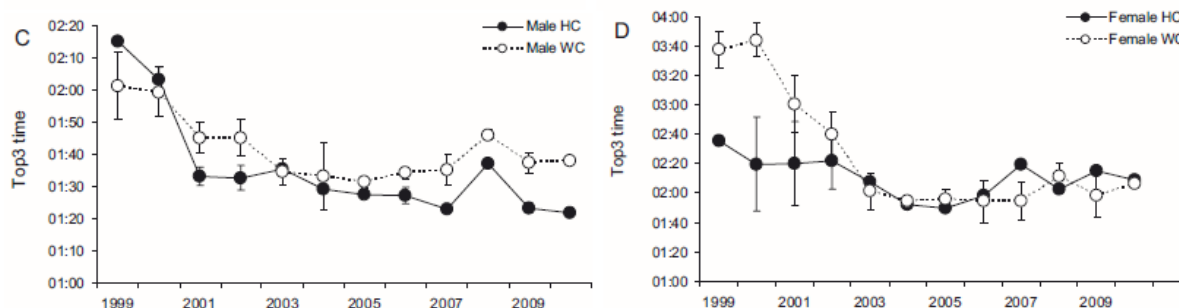


Figure 7 : Performance moyenne ($\pm$ écart-type) des athlètes du Top 3 en fauteuil roulant (WC) et des cyclistes en handbike (HC) entre 1999 et 2010 chez les hommes (gauche) et les femmes (droite) au Marathon de New York City. (Extrait de Lepers et coll, 2014.)

Ces progressions, en partie dues à l'amélioration de la technologie utilisée dans la conception des fauteuils, de la technique de propulsion et de l'amélioration des méthodes d'entraînement dans les années 1980 et 1990 ont contribué à la diminution des temps depuis 1983 (11,71). Par exemple, des techniques d'entraînement physique à haute intensité sur fauteuil ont permis d'améliorer les capacités cardiovasculaires du haut du corps des athlètes paraplégiques (11).

En sprint, demi-fond et endurance, cette tendance à la stagnation a également été observée chez des athlètes en fauteuil de la classe T54 participant à des compétitions entre 2009 et 2018 (12) dans des épreuves de sprint, demi-fond et fond. Pour les para athlètes pratiquant debout, les performances réalisées en sprint (72,73) et en saut en longueur (74) aux JP entre 1976 et 2016 se sont significativement améliorées. Les athlètes amputés d'un membre, équipés de lame en carbone (classes T42 et T44), ont connu les augmentations de performance les plus importantes, respectivement 15% et 12%. Les athlètes avec une déficience visuelle (classes T12 et T13) et les athlètes avec une paralysie cérébrale (classe T37) ont progressé respectivement de 6%, 8% et 9%. Chez les athlètes amputés, les apports majeurs de la technologie sur les lames en carbone auraient accentué ces progressions. Au début des années 90, la forme et la composition des prothèses ont été améliorées, permettant d'importantes évolutions biomécaniques qui ont impacté sur le style et l'économie de course de course. De plus, ces améliorations ont permis l'amélioration de l'entraînement tant en qualité et quantité (72,73).

	2016 (Rio)	2012 (London)	2008 (Beijing)	2004 (Athens)	2000 (Sydney)	1996 (Atlanta)
Mean speed, bilateral (m/s)	7.71	7.68	8.16	7.94	7.68	8.33
Number of athletes	22	10	3	2	2	1
Mean speed, unilateral (m/s)	7.41	7.33	7.24	7.24	7.26	6.35
Number of athletes	51	48	35	24	28	18

Tableau 1 : Vitesses moyennes de course dans les épreuves de sprint (100 m, 200 m et 400 m) chez des athlètes amputés d'un ou des deux membres inférieurs aux Jeux Paralympiques entre 1996 et 2016. (Extrait de Tuakli-Wosornu et coll, 2021)

Enfin, les performances sur l'ensemble des courses de sprint aux JP entre 1996 et 2016 selon le type de handicap (amputation uni- ou bilatérale) ont été investiguées (75) chez des athlètes en classes T42, T43 et T44. La vitesse moyenne sur 100m, 200m et 400m (Tableau 1) a fortement progressé chez des athlètes ayant une amputation unilatérale. Pour les athlètes avec une amputation bilatérale, le faible nombre d'athlètes présents dans l'échantillon ne permet pas de tirer de conclusions.

Para natation

Les performances en para natation ont progressé depuis les 2 dernière décennies. Les vitesses de nage des médaillé(e)s aux JP toutes classes, sexes et épreuves confondues ont connu une augmentation moyenne de 7,3 % entre 1992 à 2012 (Figure 8) (13). Cette progression moyenne des performances a été similaire chez les nageuses et nageurs des classes S2 à S4 (déficience motrice lourde) et S5 à S10 (déficience motrice légère).

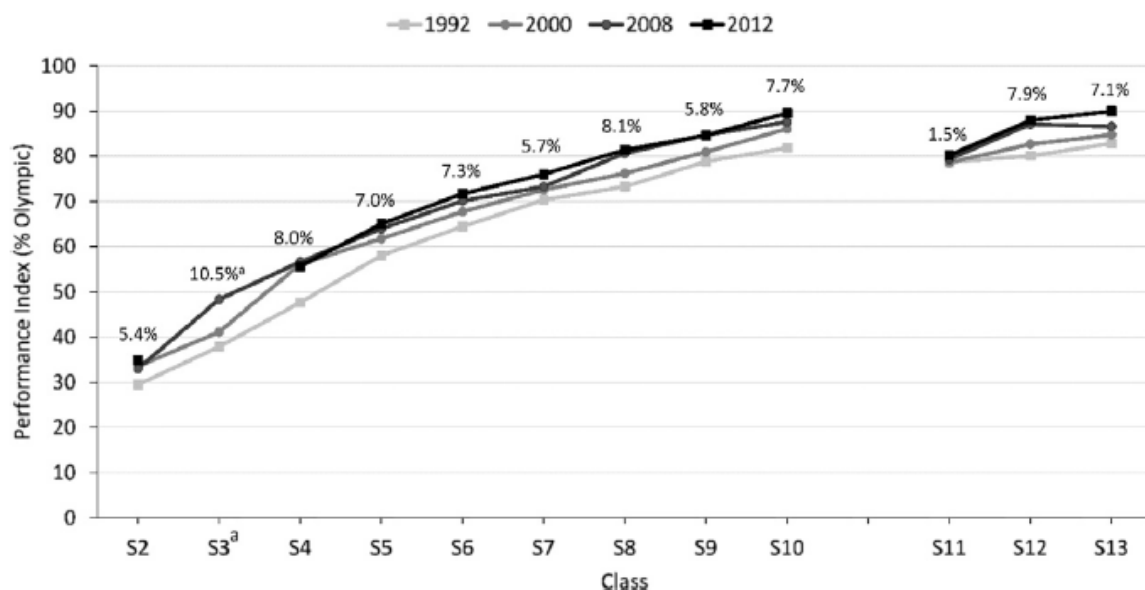


Figure 8 : Performance moyenne (en % des performances Olympiques) des médaillés aux Jeux Paralympiques (classes, sexes et épreuves confondus) par classification entre 1992 et 2012. Les pourcentages au-dessus des points représentent l'évolution du pourcentage de performance entre 1992 et 2012. (Extrait de Burkett et coll, 2018.)

Sur la période étudiée, une progression plus marquée des performances a été observée entre 2000 et 2008. Comme chez les nageurs valides, l'utilisation des combinaisons en polyuréthane semble avoir permis d'améliorer significativement les performances aux JP de Pékin, en particulier, chez les nageurs évoluant dans les classes 8, 9 et 12. Suite à l'interdiction de cette technologie en 2010, l'augmentation des performances en 2012 était plus limitée comparativement aux autres années.

Par année, ces tendances à l'amélioration se confirment. En effet, entre 2004 et 2006, les performances ont progressé d'environ 0,5 % par an pour les hommes et les femmes (76). Sur cette période observée, les JP sont ressortis comme la compétition où les performances réalisées étaient les meilleures (76).

Para cyclisme

En para cyclisme, peu d'analyses temporelles des performances ont été conduites. En 2016, aux JP de Rio (77), tenant compte d'une distance plus importante, les vitesses moyenne réalisées étaient nettement supérieures à celles obtenues en 2008. De plus, les écarts de temps du gagnant

de l'épreuve par rapport à son poursuivant étaient en moyenne de 3,1% en 2008 et de 0,5% en 2016, ce qui pourrait témoigner d'une densification de la concurrence.

Cette tendance se reflète également dans la progression de la vitesse des cinq meilleures performances annuelles (Tableau 2) réalisées dans l'épreuve du kilomètre entre 2011 et 2018 chez les para cyclistes (78). Cette augmentation semble plus marquée chez les cyclistes dont la sévérité du handicap est plus importante (classes C1 et C2).

Year*	Median race speed (km/h) $\pm$ IQR					
	C1	C2	C3	C4	C5	Able-bodied**
2011	43.2 $\pm$ 2.3	45.8 $\pm$ 1.4	49.3 $\pm$ 1.4	51.7 $\pm$ 2.9	52.1 $\pm$ 1.0	58.8 $\pm$ 0.9
2012	45.3 $\pm$ 4.5	47.3 $\pm$ 1.6	50.4 $\pm$ 1.2	51.7 $\pm$ 0.8	53.2 $\pm$ 3.0	59.5 $\pm$ 0.9
2014	44.9 $\pm$ 3.8	47.2 $\pm$ 2.3	52.9 $\pm$ 1.0	54.7 $\pm$ 2.7	56.6 $\pm$ 2.1	59.5 $\pm$ 1.1
2015	44.4 $\pm$ 5.1	46.3 $\pm$ 1.3	50.5 $\pm$ 0.9	52.1 $\pm$ 3.0	53.9 $\pm$ 2.1	59.5 $\pm$ 0.5
2016	44.8 $\pm$ 5.8	47.5 $\pm$ 1.6	49.6 $\pm$ 1.4	51.7 $\pm$ 3.7	54.3 $\pm$ 3.0	58.5 $\pm$ 1.3
2017	43.3 $\pm$ 2.8	46.2 $\pm$ 1.3	50.3 $\pm$ 1.3	52.0 $\pm$ 3.2	52.9 $\pm$ 3.4	59.0 $\pm$ 0.3
2018	47.1 $\pm$ 4.3	47.6 $\pm$ 1.6	50.8 $\pm$ 0.6	52.4 $\pm$ 2.7	53.5 $\pm$ 2.4	60.0 $\pm$ 0.8

Tableau 2. Vitesse médiane de course (en km/h) $\pm$ écart interquartile des cinq meilleures performances annuelles en contre la montre sur piste sur 1 km pour les para cyclistes et les cyclistes valides aux championnats du monde et Jeux Paralympiques ou Olympiques. (Extrait de Liljedahl et coll, 2020.)

Les écarts de performance en compétition des para sportifs et sportifs valides

Peu d'études ont analysé les écarts de performances en compétition entre para sportifs et sportifs valides. En effet, mises à part de rares exceptions (79–81), ces derniers concourent séparément.

Au niveau individuel, par comparaison des performances réalisées en athlétisme (1), le para sprinter Jason Smyth (déficient visuel de la classe T13) a établi le record toutes classifications confondues de 10.46 secondes sur 100 m, ce qui représente un écart d'environ 8% au record valide réalisé par Usain Bolt en 2009. Au 200 m, le record actuel de 21.12 secondes se situe à 2% du record valide. Ce temps a été obtenu par un sprinter double amputé bénéficiant de lames en carbone. En saut en longueur, avec 8.62 mètres, Marcus Rehm, athlète évoluant avec une lame, est à 4% du record valide de 8.95 mètres, détenu par Jesse Owens. Chez les femmes, au 100 m, 200 m et saut en longueur, les écarts aux records valides sont respectivement de 11%, 10% et 19%.

Ces écarts obtenus par simple comparaison se confirment dans la littérature. En athlétisme, les temps moyens réalisés lors des JO et JP entre 1992 et 2012 montrent des écarts conséquents entre

les sprinters Paralympiques et Olympiques ayant participé au 100 m et 200 m, qui semblent se réduire sur la période analysée selon la classification étudiée (72).

Par exemple, entre 1992 et 2016, l'écart de la meilleure performance réalisée aux JO et JP entre athlètes valides et para athlètes de la classe T44 en saut en longueur ne cesse de se réduire (Figure 9) (74).

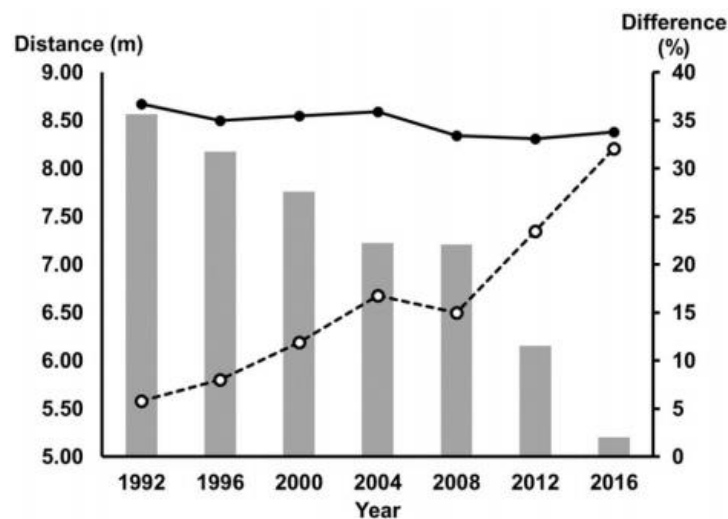


Figure 9 : Meilleure performance des athlètes valides (points noirs) et para de la classe T44 (points blancs) en saut en longueur aux Jeux Olympiques et Paralympiques de 1992 à 2016. Les barres pleines indiquent la différence de performance (en %). (Extrait de Fletcher et coll, 2021.)

En para natation, les nageuses et nageurs les plus rapides sont dans les classes où la sévérité des déficiences motrices et visuelles sont les plus faibles. Au 50 m et 400 m nage libre, les écarts entre les para nageurs et nageurs valides médaillés aux JP et JO, chez les hommes et femmes, sont compris en moyenne entre 14% et 16% (13). En finale des Jeux Olympiques et Paralympiques de Sydney, la vitesse de nage au 100 m nage libre des nageurs valides (Figure 10) était significativement plus rapide que celle des nageurs de la classe S11 (82).

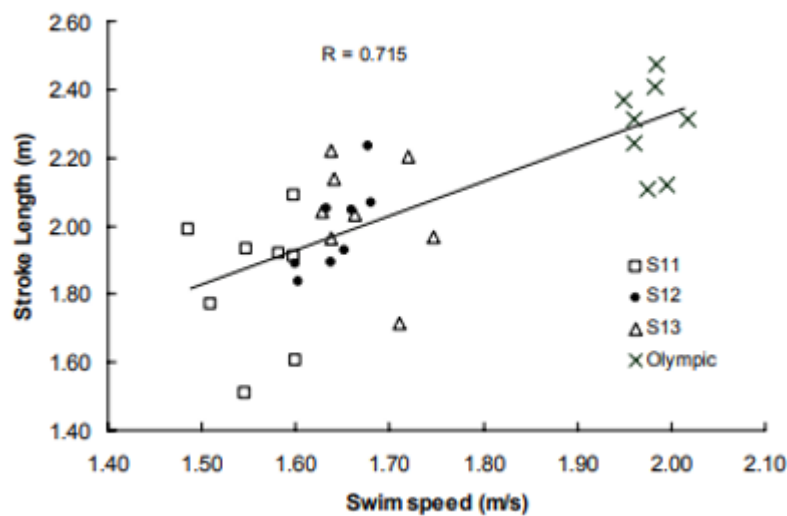


Figure 10 : Relation entre la longueur d'un mouvement de bras (en mètre) et la vitesse de nage (en m/s) chez des nageurs finalistes aux Jeux Paralympiques (classes S11 à S13) et Olympiques au 100 m nage libre. (Extrait de Daly et coll, 2009.)

En para cyclisme, dans les classes où le handicap est le moins sévère (C4-C5), l'écart de performance des 5 meilleurs performeurs en compétition internationale sur l'épreuve du kilomètre sur piste est d'environ 10% (78).

Variabilité et densité des performances

La variabilité peut être définie comme la variation de paramètres autour de valeurs moyennes de l'organisme étudié, sans s'éloigner de manière extrême de ces valeurs moyennes (83). L'organisme n'est évidemment pas invariant dans le temps, les paramètres qui le définissent fluctuent au cours de l'évolution. La variabilité est mesurable à toutes les échelles de l'organisme, du génome à l'individu.

Liée à la nature du handicap, à un nombre de para sportifs faible, à de nombreuses classes sportives de handicap, à une expérience plus limitée des courses internationales et à une évolution plus récente des sports Paralympiques (84), les performances réalisées par les para sportifs présentent une variabilité intra- et interclasse importante.

En athlétisme, grâce à un index de densité tenant compte du nombre de concurrents en fonction de la différence des temps réalisés par l'athlète le plus lent et le plus rapide (72), les sprinters ayant participé aux JO sur 100 m et 200 m entre 1992 et 2012 ont montré une densité de compétition importante, respectivement de 23,90 et 9,29 par compétiteurs/seconde (Figure 11). Chez les para athlètes ayant participé aux JP sur la même période, la densité était la plus importante chez les sprinters ayant des déficiences des membres inférieurs. En outre, la classe T42 était la moins dense au 100 m (4,53 compétiteurs/seconde) et au 200 m (1,93 compétiteurs/seconde). Les athlètes des classes T12 et T13 représentaient quant à eux les classifications avec la densité de concurrence la plus forte.

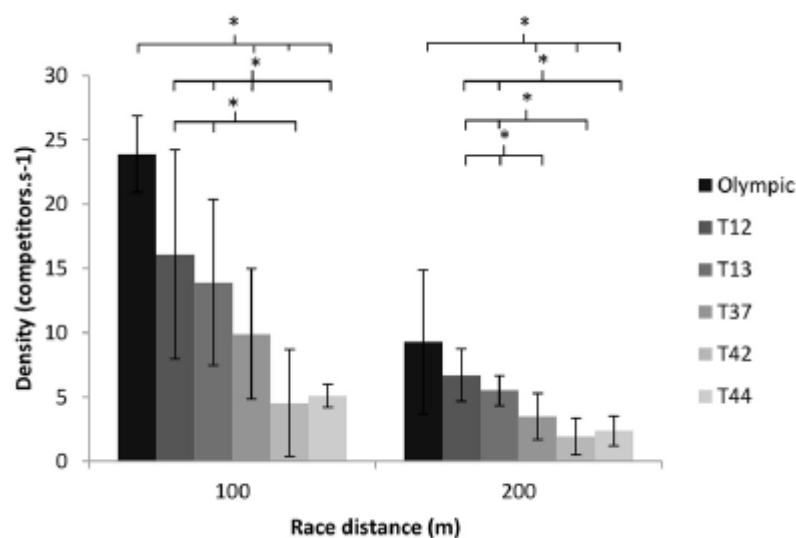


Figure 11 : Densité de concurrence au 100 m et 200 m selon la classification aux Jeux Olympiques et Paralympiques entre 1992 et 2012. L'index de densité correspond au nombre de concurrents divisé par l'écart entre leurs performances = [nombre d'athlètes / (Temps du dernier – Temps du vainqueur)] (Extrait de Grobler et coll, 2015.)

Chez des lanceurs de poids en situation de handicap intellectuel de niveau international, la variabilité inter-individuelle des performances entre les lancers était significativement plus importante que chez des lanceurs valides (85).

En natation, la variabilité mesurée d'une course à l'autre était de 2% en moyenne chez les para nageurs. Selon le niveau de la compétition, l'analyse des performances a montré une variabilité comprise entre 1,2 % et 3,7 % des para nageurs entre chaque évènement selon la classification sportive (76). Chez les nageurs valides de niveau national en catégorie junior, elle était en moyenne de 1,4% et de 0,8% chez les nageurs Olympiques (76).

Les classes avec une sévérité de handicap importante (S2-S4) ont montré une plus grande variabilité dans leurs performances que les nageurs dont la sévérité du handicap est plus faible (84). Enfin, rapportées aux records du monde, les nageurs ayant un handicap physique sévère à modéré (S1-S6) avaient généralement des performances plus faibles vis-à-vis des autres classes sportives mettant en avant une plus grande variation des performances entre les nageurs selon l'âge (34).

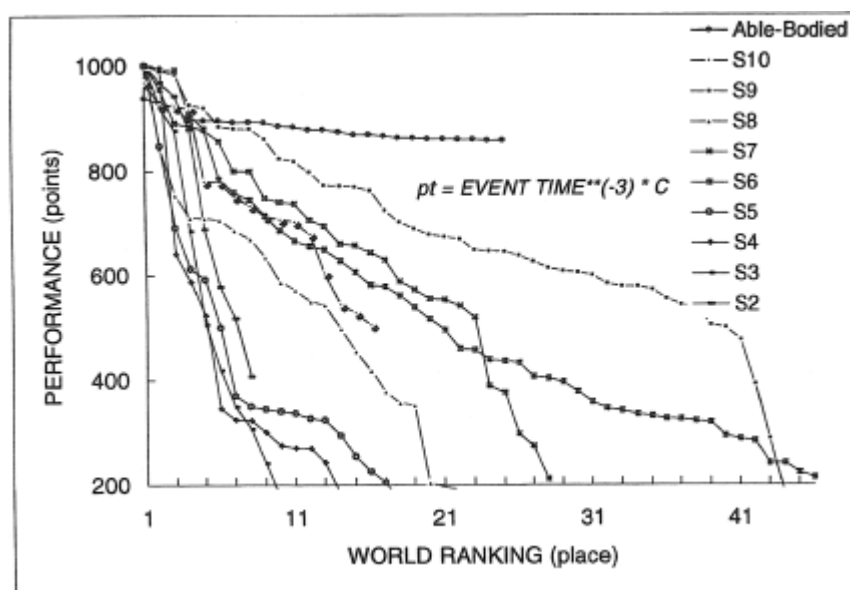


Figure 12 : Evolution des performances exprimées en points, en fonction du classement mondial par classe pour le 100 m nage libre féminin. Le record de l'épreuve par classe équivaut à 1000 points, le temps de chaque nageur est donc rapporté au record de l'épreuve (Extrait de Daly et coll, 1999.)

Cette différence de densité (Figure 12) peut se traduire par un écart de performance aux meilleurs nageurs et nageuses plus important avec un recul au classement mondial (84) et de plus grandes disparités dans les classes ayant une sévérité de handicap importante. Chez les nageurs valides, cet écart de performance par rapport au classement mondial est beaucoup moins marqué et témoigne d'une forte densité de concurrence.

Les para cyclistes présentent également d'importantes variabilités de performances. Sur l'épreuve du kilomètre (78), les 5 meilleurs performeurs en compétition internationale de la classe C1 (handicap sévère) ont atteint une performance comprenant un intervalle interquartile 4 fois plus important ($44,8 \pm 4,2$ km/h) que celui atteint par leurs homologues valides ($59,4 \pm 0,9$ km/h). Les

para cyclistes dans la classification de handicap la plus légère (C5) ont quant à eux un intervalle interquartile 3 fois plus important ($53,5 \pm 2,9$ km/h).

À retenir

Les meilleures performances des sportives et sportifs valides plafonnent dans la plupart des disciplines depuis les années 80.

Malgré une faible littérature sur le sujet, les performances réalisées par les para sportives et para sportifs de haut niveau semblent progressées dans plusieurs épreuves.

Les écarts de performances entre les para sportives, para sportifs et leurs homologues valides semblent se réduire avec les années.

Les performances réalisées par les para sportives et para sportifs témoignent d'une plus grande variabilité intra- et interindividuelles.

2.4 La performance sportive

La performance sportive est directement associée au résultat d'une épreuve compétitive (86). Pour optimiser ce processus, tous les facteurs ayant une influence significative doivent être connus et intégrés afin que la performance soit maximale le jour voulu.

En 1990, Famose (87) a défini la performance, dans le sens restreint, comme liée au résultat obtenu à la suite de la mise en œuvre de l'activité. Platonov (88) a déclaré en 2001 que « la performance sportive exprime les possibilités maximales d'un individu dans une discipline à un moment donné de son développement ». En 2004, Weineck (89) ajouta que « dans un cadre complexe, elle est conditionnée par une pluralité de facteurs spécifiques ».

La performance sportive se manifeste à travers une multitude de facteurs. De nombreux modèles de performances pour les sportifs valides de haut niveau ont été proposés dans la littérature au gré des avancées de la recherche dans les sciences du sport. Certains chercheurs ont élaboré un modèle théorique général (89,90) ou spécifique à une discipline sportive (91,92) en distinguant les différents facteurs qui peuvent être associés à la réussite sportive, les modèles ont surtout été établis par rapport aux spécialités des chercheurs (physiologie, sociologie ou psychologie,).

Par le biais de ces différents modèles, l'optimisation des nombreux facteurs a permis l'amélioration de la performance des sportives et sportifs de haut niveau à travers : i) les facteurs propres à l'environnement du sportif tels le suivi et l'encadrement médical (93), la qualité, la gestion et la capacité à tolérer la charge de travail à l'entraînement et en compétition (94), la nutrition (95), l'utilisation de technologie avancée (50,96) ; ii) les facteurs intrinsèques que sont la génétique (97,98), l'environnement et les conditions climatiques (99), iii) l'environnement social (100) ; iv) les facteurs biomécaniques (61,101) et tactiques; v) les facteurs physiologiques (le transport d'oxygène, le coût énergétique, la performance du métabolisme musculaire, le contrôle cardiovasculaire ou le fonctionnement des différentes composantes du système nerveux (96,102) ; vi) les facteurs psychologiques à travers la préparation mentale, l'expérience acquise dans la discipline, l'approche tactique, la cohésion au sein de l'équipe, le niveau de maturité, l'anticipation, la prise de décision et la capacité à se dépasser dans les grands moments (103,104).

L'analyse d'un facteur isolé de la performance semble complexe tant cette dernière est multifactorielle. Il serait réducteur d'affirmer que l'optimisation d'un facteur de la performance n'aurait pas d'effets sur les autres, tant les facteurs sont étroitement liés les uns aux autres. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'ensemble de ce qui englobe l'entraînement et des conditions dans lesquelles le sportif de haut niveau évolue (105).

La performance sportive spécifique aux para sportifs

Comme précisé dans le paragraphe précédent, la performance dans le sport de haut niveau est multifactorielle. A ce jour, des études sur les conditions de pratique chez des sportives et sportifs de haut niveau valides et para sportives et para sportifs ont mis en évidence des similitudes (106) et des différences (107). L'entraînement d'un sportif Paralympique de haut niveau nécessite la compréhension d'obstacles potentiels, tant physiques que mentaux (108). Pour cela, la mobilisation d'un ensemble de paramètres doit être pris en considération, tels que l'origine et le type de handicap, les adaptations biomécaniques et sociales (107,109), la préparation à la compétition, l'adaptation et l'optimisation de l'entraînement (106).

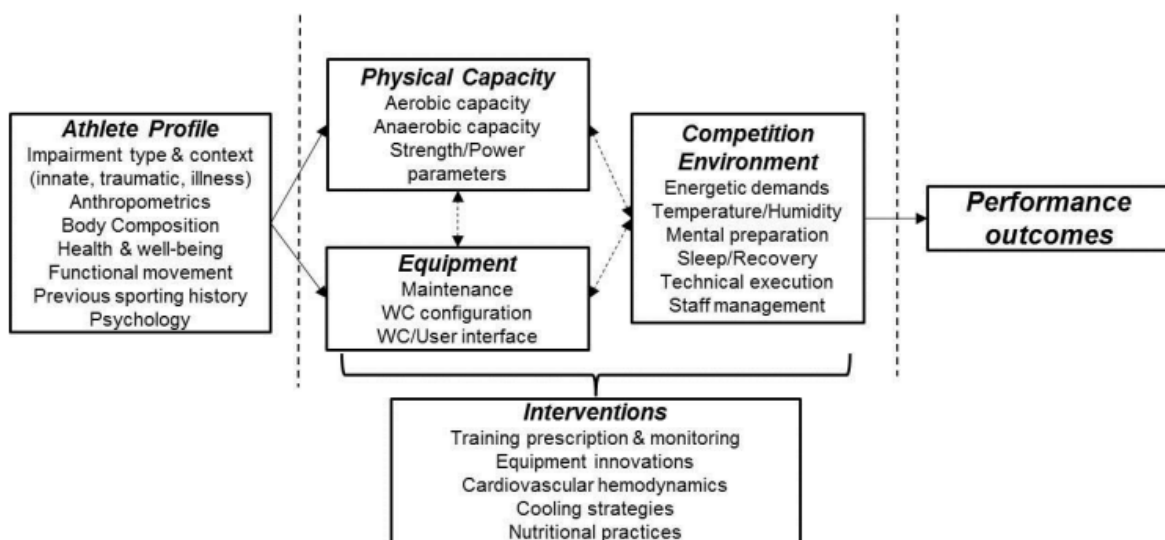


Figure 13 : Les facteurs clés de la performance sportive pour les athlètes en fauteuil roulant.
(Extrait de Paulson et Coll, 2017.)

Le modèle de performance proposé par Paulson et Coll (110) à destination des para sportives et para sportifs évoluant en fauteuil (Figure 13), bien que similaire à un modèle de performance de

athlètes valides, présente des spécificités. Les facteurs liés au handicap (type de déficience, nature de la déficience, moment d'apparition et classification potentielle) introduisent un degré de complexité supérieur qui peut avoir un impact sur l'ensemble des facteurs de la performance et le développement de l'athlète (35). De manière spécifique, le modèle conceptuel proposé par Van der Woude et coll (111) illustre les principaux facteurs influençant l'ergonomie de la performance en fauteuil roulant manuel et souligne l'importance des composantes biomécaniques et physiologiques dans l'adaptation du para sportif au matériel.

L'âge, un facteur de la performance

Le lien entre les types de handicap et la performance tend aujourd'hui à proposer un système de classification le plus équitable possible (25). Ce système fonctionnel basé sur l'impact de la déficience sur la performance est issu de nombreuses recherches. Cependant, il reste encore perfectible et ne prend pas en compte, par exemple, les différents stades du développement et l'évolution des capacités physiques avec l'âge (34).

En effet, l'âge ressort comme un facteur de la performance prépondérant dans l'ensemble du vivant (16). Les recherches actuelles sur le vieillissement se sont concentrées sur les mécanismes sous-jacents conduisant au déclin observé dans les capacités physiques et physiologiques. Les recherches expérimentales sur la réduction des vitesses de déplacement, des fonctions perceptives ou cognitives, des composantes de la mémoire, du temps de réaction, de la vitesse de conduction nerveuse, de la force et de la souplesse musculaires ont permis de fournir des informations précieuses sur la dynamique évolutive au cours de la vie (16) qui s'expriment pleinement dans le sport de haut niveau.

De la phase de conception à la maturation de l'organisme, soutenue par le processus de développement, les performances physiologiques suivent une progression jusqu'à un pic physiologique (14,112), défini par l'instant auquel la fonction considérée atteint son maximum. Puis, la valeur maximale décroît (14,16,22). Ce processus s'impose dans nos différents modes de locomotion, exprimés dans les épreuves sportives, comme la course et la nage. Le principal changement observable durant le développement et le vieillissement se situe au niveau de la capacité maximale de vitesse de déplacement (14,21,22,113). Durant la phase de développement,

la vitesse maximale de déplacement progresse graduellement en course à pied comme en natation. Puis, durant la phase de senescence, cette vitesse maximale diminue progressivement.

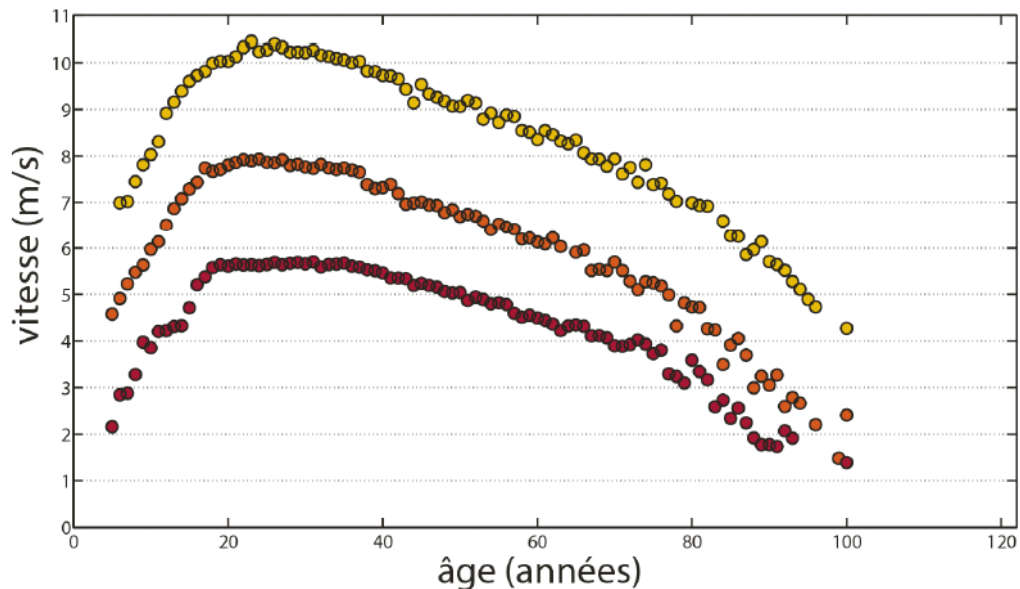


Figure 14 : Performances maximales par âge chez les hommes au 100 m (en jaune), 800 m (en orange) et marathon (en rouge). (Extrait de Berthelot et coll, 2019.)

De manière descriptive (Figure 14), les vitesses maximales mesurées sur l'épreuve du 100 m en population sont de 8,0 m/s à 9 ans et augmentent au cours de l'âge jusqu'à atteindre actuellement un record de 10,43 m/s à 23 ans, et décroissent ensuite progressivement pour se situer à 7,9 m/s à 70 ans et 4,3 m/s à 100 ans.

Selon les épreuves, les pics de performance observés peuvent être asynchrones. En natation, les performances maximales sont atteintes autour de 18-23 ans (14,49,114), tandis que pour les épreuves de course en athlétisme, ce pic se situe entre 23 et 31 ans (14,16). Les performances dans les épreuves de sprint atteignent un pic plus précoce comparativement aux épreuves d'endurance et d'ultra endurance (Figure 15) : 25 ans sur le 100 m, 31 ans sur le marathon, 34 ans au 100 km, 40 ans au 48h et 45 ans dans l'épreuve de 6 jours (14,17).

D'autres épreuves sportives ont montré une atteinte au pic de performance chez les sportifs valides autour de 25-30 ans en tennis, cyclisme, aviron, le baseball, haltérophilie ou le triathlon (21,115–117). Enfin, concernant les performances cognitives, la meilleure performance aux échecs exprimée par un score maximal est atteint vers 31 ans (16).

Selon le sexe, il existe également une différence d'âge au pic de performance maximale entre les hommes et les femmes (15). Lié à l'écart de déclenchement de la puberté, le pic physiologique est en moyenne 2 à 3 ans plus précoce pour les femmes dans toutes les épreuves étudiées (14,58). En tennis, par exemple, le pourcentage maximal de victoires du top 10 mondial féminin est atteint à environ 21 ans contre 24 ans pour les hommes (18). De plus, les femmes qui ont obtenu un titre aux JO dans les épreuves d'athlétisme et de natation étaient en moyenne plus jeunes (entre 1 et 2 ans) par rapport aux hommes (118).

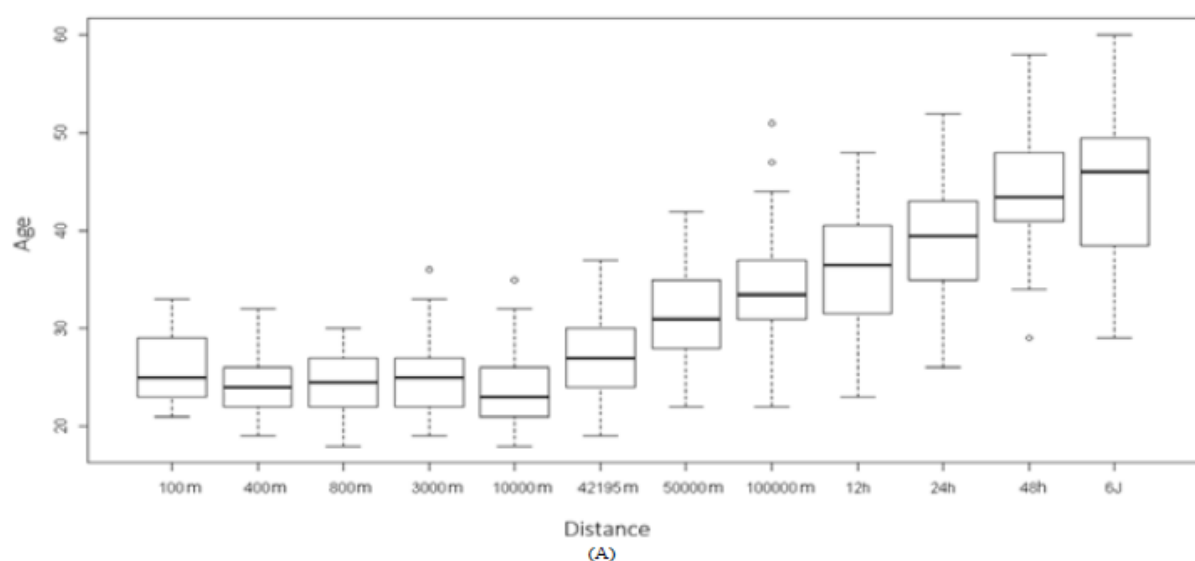


Figure 15 : Moyenne d'âge des 50 coureurs les plus rapides du monde, du 100 m à l'épreuve des 6 jours. (Extrait de Marc et coll, 2018.)

Ces augmentations et baisses de performance sont également observables en population générale (74,75). Des marqueurs associés à la locomotion changent avec l'âge. Le vieillissement se traduit ainsi par une baisse de la mobilité, de la coordination des mouvements et une augmentation progressive du risque de chute (76,77).

La relation âge-performance

L'évolution de la performance en fonction de l'âge est basée sur les travaux de recherches modélisant les processus de croissance de séries temporelles. Benjamin Gompertz et Ludwig Von Bertalanffy sont à l'origine de fonctions mathématiques largement utilisées dans les processus de modélisation de la mortalité humaine et dynamique de population (119), d'évolution des tumeurs (120) ou encore de croissance d'organismes biologiques (121). De nombreuses méthodes ont été développées pour décrire la relation âge-performance et estimer un âge où la meilleure performance est atteinte. Cette relation s'avère être un modèle en U inversé continu et asymétrique, où l'âge au pic de performance se situe au début de la vie (122). Dans la littérature scientifique, l'utilisation de fonctions polynomiales, de modèles mixtes, de moyennes mobiles et des régressions (114) ont permis de modéliser la nature de cette relation.

En outre, l'utilisation de fonctions quadratiques (123) et de polynômes du second degré (124) semblent fournir une mauvaise estimation de l'âge au pic de performance ne tenant pas compte de la nature de la relation âge-performance. En effet, l'asymétrie de cette relation est due à la précocité de l'âge au pic de performance.

L'une des premières approches empiriques décrivant cette relation a été étudiée par Dan H. Moore en 1975 à travers l'utilisation d'un modèle en U inversé appliqué sur des données de performances en athlétisme dans 15 épreuves de course et 2 épreuves de lancer (22). L'équation, utilisée dans cette étude et basée sur 2 fonctions exponentielles, est la suivante :

$$P(t) = a \left(1 - e^{-bt}\right) + c \left(1 - e^{-dt}\right) \quad \text{avec } a, b, c, d > 0$$

a , b , c , d sont quatre paramètres positifs où $P(t)$ est la valeur de performance à l'âge t . Dans cette équation, $P(t)$ représente la performance (avec t le temps), a et c sont des paramètres scalaires, b^{-1} et d^{-1} les temps caractéristiques des processus de croissance et de déclin de la performance. Ces paramètres sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Plusieurs données de diverses espèces et de performances sportives (Figure 16) ont été ajustées avec cette équation (14,15,18) afin de modéliser les capacités athlétiques et cognitives individuelles. Pour l'ensemble de ces

régressions, le rapport des valeurs de a/b et de c/d est toujours supérieur à 1, suggérant que l'utilisation d'une équation quadratique pour décrire le modèle n'est pas adapté.

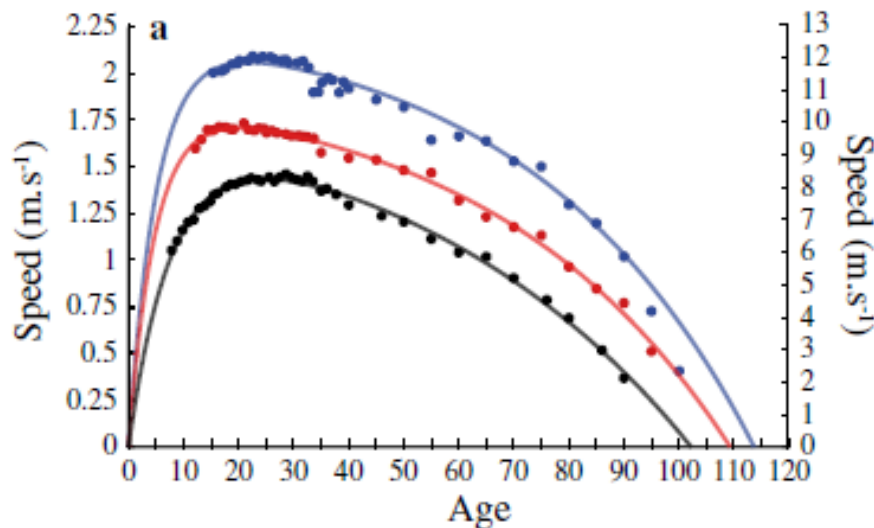


Figure 16 : Performances maximales par âge ajustées avec le modèle de Moore dans 2 épreuves de natation (ordonnée à gauche en m/s) : 100 m hommes (bleu) et 200 m femmes (rouge) et une épreuve d'athlétisme (ordonnée à droite en m/s) : 400 m femmes (noir). (Extrait de Berthelot et coll, 2011.)

Enfin, comme la plupart des équations précédemment citées, les paramètres de l'équation de Moore semblent mathématiquement pertinents mais peu associés à toute signification physiologique.

Fort de ce constat, un modèle biologique tenant compte du lien entre la prolifération cellulaire conduisant à la croissance puis à la perte de fonctionnalité cellulaire menant au déclin (112) a permis d'ajuster les dynamiques de performances physiques et cognitives selon l'âge.

L'équation, appelée IMAP (Integrative model of age-performance) est la suivante :

$$P(t) = \beta_0 N_0 \cdot e^{\frac{\alpha_0}{\alpha_r}(1-e^{-\alpha_r t})} \cdot (1 - e^{\beta_r(t-t_d)})$$

Dans cette équation, $P(t)$ est la valeur de performance à l'âge t ; $\beta_0 N_0$ représente le niveau de performance initial à t_0 ; α_0 est le niveau de performance maximale théorique ; α_r est la vitesse de

croissance pour arriver au pic de performance ; β_r est la vitesse de déclin et t_d représente l'âge au décès.

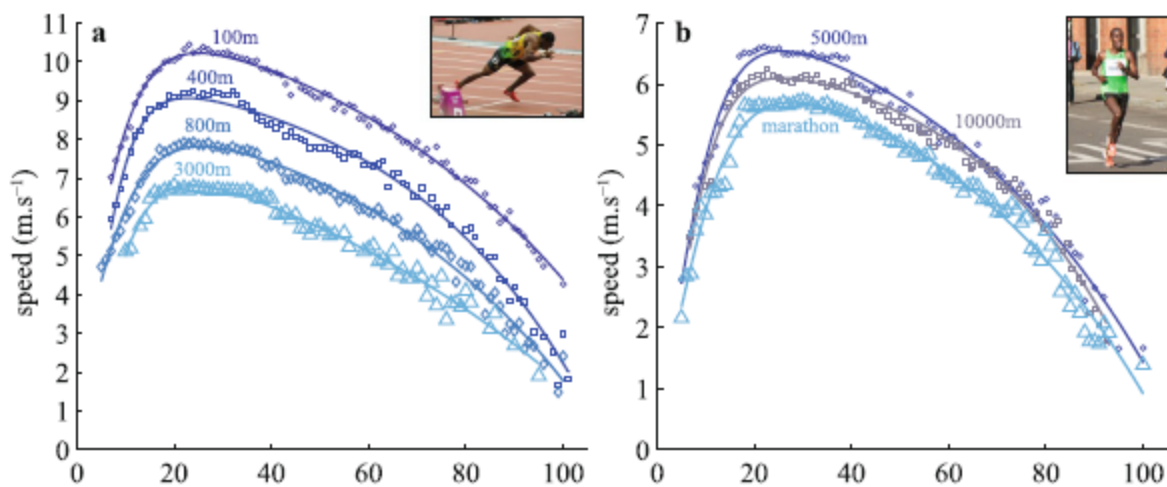


Figure 17 : Performances maximales par âge ajustées avec le modèle IMAP dans les épreuves du 100 m (points bleus) au 3000 m (triangles bleus) à gauche et, à droite, dans des épreuves de fond, du 5000 m (points bleus) au marathon (triangles bleus). (Extrait de Berthelot et coll, 2019.)

Au-delà de la considération de l'évolution biologique, la différence entre l'équation de Moore et le modèle IMAP porte sur un paramètre, t_d , qui correspond au moment où le processus décroissant atteint 0, c'est-à-dire à l'âge au décès, synonyme de perte totale de toute capacité. Ce paramètre contrôle la convergence et réduit la variabilité.

La relation âge-performance chez les para sportifs

La relation âge-performance a été peu étudiée chez les para sportives et para sportifs. Cette analyse nécessite de considérer entre autres les caractéristiques démographiques particulières de cette population où les sportifs sont souvent plus âgés que leurs homologues valides (125) et également une variabilité des performances plus ou moins importante selon la classification des sportifs.

En athlétisme (12), les performances réalisées par les athlètes évoluant en fauteuil dans la classe T54 semblent corrélées à l'âge. En effet, dans les épreuves de sprint et de demi-fond, l'âge des athlètes lors de la performance était plus précoce que dans les épreuves d'endurance. Les âges au pic de performance observés n'ont pas été communiqués et l'utilisation d'un coefficient de

corrélation de Pearson pour mettre en avant ce constat est basée sur une relation linéaire entre l'âge et la performance. L'analyse de l'âge des athlètes en fauteuil ou en cyclisme avec propulsion à bras dans l'épreuve du marathon entre 1999 et 2011 (11) peut permettre d'affirmer ces observations sans pour autant analyser la nature de la relation âge-performance. L'âge des vainqueurs et des athlètes sur le podium se situait entre 31 et 36 ans pour les fauteuils et entre 43 et 48 ans pour les cyclistes, que ce soit pour les hommes et les femmes.

En natation (34), la relation âge-performance a été étudiée chez les para nageurs et para nageuses (Figure 18) ayant un handicap physique, visuel ou intellectuel. Les analyses se sont basées sur les 10 661 meilleures performances annuelles réalisées par 411 nageurs en grand bassin entre 2009 et 2019. La modélisation linéaire à effets mixtes a montré qu'il existait une relation significative entre l'âge et la meilleure performance annuelle. Les trajectoires de performance selon l'âge ont été caractérisées par des améliorations annuelles progressives entre 12 ans et 20 ans avant de se stabiliser pour culminer entre 21 ans et 26 ans et ont ensuite régressé progressivement entre 27 ans et 35 ans. Au niveau individuel, les trajectoires de performance sont caractérisées par une grande variabilité des performances entre 12 ans et 20 ans. Par sexe, les hommes atteignent leur pic de performance entre 22 ans et 27 ans pour ensuite régresser de 0,1 % à 0,2 % par an à partir de 29 ans. Par rapport aux hommes, les performances féminines sont supérieures pendant l'adolescence. Elles atteignent leur pic de performance entre 20 ans et 21 ans pour ensuite régresser progressivement entre 22 ans et 35 ans.

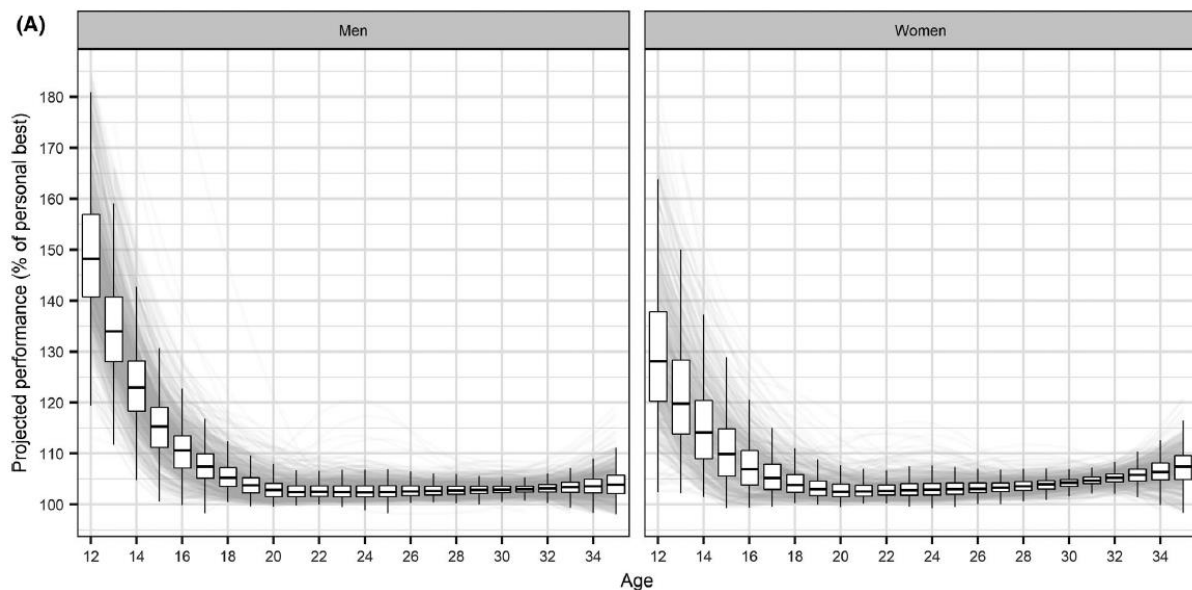


Figure 18 : Meilleures performances selon l'âge chez les para nageurs et para nageuses représentées en box-plots à travers la médiane et la dispersion (en % du meilleur temps personnel). Les courbes grises représentent les prédictions individuelles dérivées de la modélisation linéaire à effets mixtes. (Extrait de Hogarth et coll, 2020.)

La classification sportive impact également la relation âge-performance. Entre les classes sportives, la trajectoire moyenne de performance selon l'âge est similaire entre 12 ans et 20 ans et se stabilise par la suite. Les nageuses et nageurs ayant un handicap physique modéré à sévère (S1-S6) montrent une trajectoire similaire avec des progressions annuelles continues de leur performance jusqu'à l'âge de 28-30 ans pour ensuite régresser entre 31 ans et 35 ans. Les nageuses et nageurs présentant un handicap physique léger (S7-S10) et un handicap intellectuel (S14) présentent des trajectoires de performance similaires, caractérisées par un pic de performance compris entre 25 ans et 27 ans pour ensuite régresser à partir de 28 ans.

À retenir

La performance sportive de haut niveau est multifactorielle. Chez les para sportives et para sportifs, des spécificités centrées autour du handicap, de la classification, du matériel et de l'environnement sont à prendre en compte dans l'ensemble des facteurs.

L'âge est facteur de la performance prépondérant. La relation âge-performance peut être caractérisée par différents modèles (Moore, IMAP, ou modèles mixtes non-linéaires) qui s'ajustent très bien aux données.

Une seule étude a modélisé les performances selon l'âge (avec modèle linéaire mixte) sur un échantillon de 411 para nageuses et para nageurs internationaux, soit 10 661 meilleures performances annuelles en grand bassin, entre 2009 et 2019.

Capacités physiques et physiologiques selon le type de handicap

La majorité des recherches sur l'évaluation des performances des para sportives et para sportifs sont centrées sur l'analyse des capacités physiques et physiologiques. La section ci-dessous s'est intéressée aux adaptations des sportifs, qui influent ou qui pourraient limiter l'expression des facteurs de performance.

Selon le sport et le type de handicap étudiés, les performances seraient plutôt limitées par des facteurs physiologiques (126), qui sont actuellement un pilier du système de classifications du CIP. Il a par ailleurs été suggéré que la dépense énergétique et la capacité aérobie, plutôt que l'habileté motrice, pouvaient expliquer et contribuer à la performance en para cyclisme (126).

Les adaptations présentées restent cependant à interpréter avec précaution dans la mesure où les études sont peu nombreuses et les variations intra et inter sportifs importantes. Des différences ont été constatées dans les capacités aérobies des para sportifs selon le type de handicap. La classification explique par exemple, 30 et 38% de la variabilité mesurée lors de l'évaluation de la puissance aérobie et anaérobie sur un ergomètre à bras (127). De plus, entre 47 % et 87 % de la variabilité des meilleures performances individuelles pourraient s'expliquer par la longueur des membres, selon l'épreuve étudiée, en para natation (128).

Lésion médullaire

L'impact physiologique d'une lésion de la moelle épinière sur les capacités physiologiques est un champ de recherche fortement investi (110). La moelle épinière est le canal principal, formé de fibres nerveuses par lequel les informations afférentes et efférentes sont relayées entre le cerveau et le reste de l'organisme (129). La paraplégie fait référence à des lésions des régions thoracique, lombaire ou sacrée, qui entraînent une perte de fonction du tronc, des organes et des jambes selon le niveau de la lésion. La tétraplégie fait référence à des blessures de la région cervicale qui entraînent une perte de fonction des quatre membres. Les para sportifs atteints d'une lésion médullaire et évoluant en fauteuil roulant dans les sports tels que l'athlétisme, le rugby, le basketball et le tennis ont permis d'étudier les adaptations physiologiques par rapport à des sportifs valides (130,131). Les para sportives et para sportifs ayant une lésion complète de niveau supérieur ont un impact plus important sur leur performance, tandis que ceux atteints d'une lésion

incomplète de niveau inférieur présentent des réponses physiologiques à l'exercice plus proches des sportifs valides (130).

Les para sportifs blessés médullaires présentent des capacités physiques réduites (131) en raison principalement d'une perte de masse musculaire et du dérèglement du système sympathique. Durant un exercice sollicitant les membres supérieurs, la sollicitation d'une plus faible masse musculaire a été observée comparativement à des sujets valides, qui peuvent utiliser les muscles du tronc et des jambes pour se stabiliser. Par conséquent, le pic de $\dot{V}O_2$, la ventilation volontaire maximale et la concentration maximale de lactate sanguin sont inversement liés au niveau de la lésion.

Conséquences d'une altération de la vasoconstriction sympathique située en dessous de la lésion et d'une perte d'innervation motrice des muscles des membres inférieurs (131), le système vasculaire et, en particulier, les pompes valvulo-musculaires propres au retour veineux ne sont plus fonctionnels. Cela limite les régulations visant à optimiser la distribution sanguine sous la lésion. Le volume d'éjection systolique est réduit en raison d'un plus faible remplissage ventriculaire, ce qui est le plus souvent compensé par une augmentation de la fréquence cardiaque. L'adaptation cardiaque à long terme se traduit par un débit cardiaque (volume de sang fourni par le cœur par unité de temps) plus faible, inférieur de 20 à 30 % chez les sujets paraplégiques en comparaison à des sujets valides. L'innervation sympathique du cœur chez les sujets présentant des lésions au niveau ou au-dessus du cinquième segment thoracique (T5) est altérée (131), et entraîne une diminution de la fréquence cardiaque maximale qui se situe entre 100 et 135 battements par minute. La diminution du remplissage ventriculaire a pour effet une masse cardiaque ventriculaire gauche significativement réduite et des dimensions plus faibles chez les individus tétraplégiques.

Chez des athlètes évoluant en fauteuil roulant (132), des valeurs moyennes de consommation maximale d'oxygène (pic de $\dot{V}O_2$) de $39,6 \pm 1,9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ont été relevées lors d'épreuve sur ergomètre à bras. En cyclisme avec propulsion à bras, des valeurs moyennes de pic de $\dot{V}O_2$ de $36,0 \pm 4,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ont été rapportées. En para-natation (133), un nageur masculin paraplégique a affiché un pic de $\dot{V}O_2$ maximum de $47,8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Des valeurs de seuil aérobie et anaérobie, respectivement, de $137 \pm 26 \text{ watts (W)}$ et $162 \pm 25 \text{ W}$ ont été rapportées sur des cyclistes

masculins évoluant en vélo à propulsion à bras (134). De plus, des valeurs de puissance maximale aérobie (PMA) comprises entre 159 ± 29 W (135) et 178 ± 34 W (134) ont été observées.

Au niveau du triceps brachial, des adaptations ont été observées chez des marathoniens de niveau international et des para sportifs pratiquant en fauteuil roulant, qui présentent une endurance plus importante et un déclin plus lent de la fréquence et de la puissance développées comparativement à des athlètes de niveau loisirs (136,137).

Par ailleurs, une lésion médullaire entraîne un dysfonctionnement des signaux afférents au centre de thermorégulation entraînant une perte du contrôle vasomoteur et de la capacité de transpiration sous le niveau de la lésion (138).

Amputation des membres

Très peu de recherches ont porté sur la physiologie des sportives et sportifs amputés. La majorité des études se sont centrées sur les propriétés biomécaniques (139). Les sportifs amputés sont confrontés aux mêmes réductions de masse musculaire que les para sportifs ayant une lésion médullaire (140). De plus, les amputés des membres supérieurs présentent une incidence plus importante de syndromes de surutilisation. Celle-ci est liée à la charge supplémentaire transposée sur le membre résiduel (141), provoquant une surcompensation. Les sportifs ayant subi une amputation sont également sujets à des mouvements inefficaces dans la réalisation de tâches (142). A charge de travail externe égale, le coût énergétique est significativement plus élevé pour les sujets amputés que pour les sujets valides (143).

Une particularité des athlètes amputés est la présence d'une surface corporelle plus faible qui diminue la perte de chaleur par évaporation et convection, exposant plus rapidement l'organisme aux coups de chaleur lors de compétition en ambiance chaude. De plus, le revêtement des prothèses peut agir comme une barrière isolante, limitant aussi la dissipation de chaleur et pouvant favoriser les lésions cutanées (144).

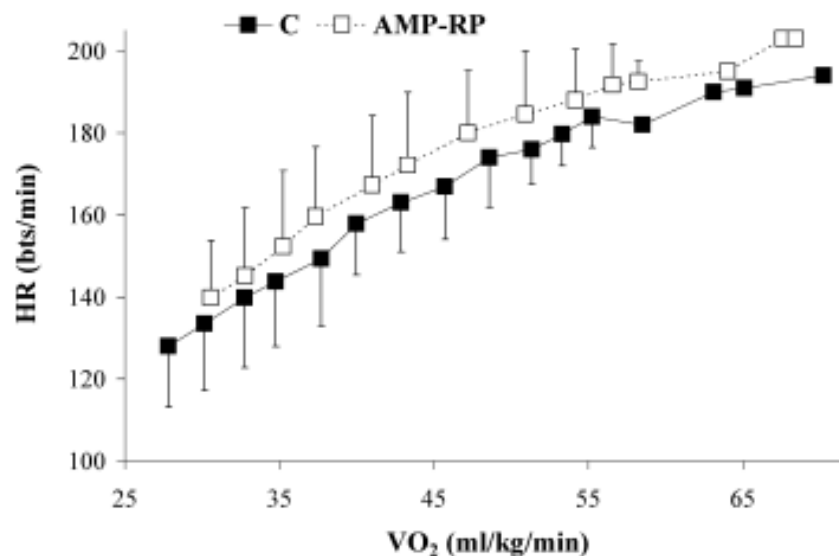


Figure 19 : Relation entre la fréquence cardiaque (FC) et la consommation d'oxygène (VO₂) chez des athlètes amputés utilisant une prothèse spécifique pour la course par rapport à un groupe contrôle de sujets valides pendant une course sous-maximale et maximale sur tapis roulant.
(Extrait de Brown et coll, 2009.)

Il existe un nombre limité d'études qui détaillent les caractéristiques physiologiques. Chez des sujets amputés au niveau fémoral (145) et tibial (146), des valeurs d'absorption maximale de la $\dot{V}O_2$ comprises, respectivement, entre $55,4 \pm 6,0 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et $56,3 \pm 7,6 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ont été rapportées.

Paralysie cérébrale

La paralysie cérébrale est un trouble postural causé par une lésion cérébrale centrale résultant d'une lésion non progressive du cerveau lors de son développement (147). Cette déficience entraîne une altération du système neuromusculaire et une diminution des capacités physiologiques (148). Trois types de déficience sont recensés (149) : l'hémiplégie (un côté du corps affecté) ; la diplégie (deux membres sont touchés (généralement les membres inférieurs dans la paraplégie)) et la quadriplégie (les quatre membres sont touchés).

L'analyse des paramètres physiologiques des personnes atteintes de paralysie cérébrale s'est principalement limitée aux enfants et aux non sportifs dans la littérature (148).

Les sportifs atteints de paralysie cérébrale présentent des mouvements parasites et non productifs dans la réalisation d'une tâche (142), dus à la présence d'athétose, de spasticité ou d'ataxie limitant de fait la coordination musculaire, ce qui augmente le coût énergétique dans l'exécution des mouvements. Concernant les caractéristiques physiologiques, la consommation maximale d'oxygène dans un groupe de para cyclistes atteints de paralysie cérébrale (150) était en moyenne de $42,5 \pm 13,2 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et la force musculaire produite était également significativement plus faible.

Les athlètes ayant une paralysie cérébrale ont montré des stratégies d'allures différentes tout en ayant un ressenti de l'effort plus faible vis-à-vis de leurs homologues valides sur des épreuves de demi-fond (148). En sprint (60m), les capacités d'accélération et de vitesse maximale mesurées ont été inférieures chez les para athlètes vis-à-vis des athlètes valides (151). Sur un test Wingate de 30 secondes (152), des para cyclistes de haut niveau ont exprimé un index de fatigue similaire aux cycliste valides. Cela pourrait souligner que le niveau sportif des sujets ou les années d'expériences ont un impact sur l'interprétation de ces mesures.

Handicap visuel

Un handicap visuel peut être défini comme l'absence totale ou partielle de la vision. Cela se traduit par la réduction de l'acuité visuelle (distance à laquelle le para sportif peut reconnaître une lettre divisée par la distance à laquelle une personne sans handicap peut le faire) et du champ visuel (capacité à détecter des objets en périphérie du champ visuel : respectivement à 210° dans le plan horizontal et à 90° dans le plan vertical) (153).

L'absence totale ou partielle de vision semble affecter l'endurance cardiovasculaire et musculaire, la flexibilité, l'équilibre et l'apprentissage moteur durant l'enfance (129,130). Il est également établi que l'apprentissage par observation joue un rôle important dans l'acquisition des habiletés motrices et techniques (155,156). La difficulté ou incapacité à utiliser l'apprentissage par observation chez les para sportifs pourrait ralentir l'acquisition des apprentissages moteurs et des compétences spécifiques de la discipline pratiquée (23,157).

En saut en longueur (153,158), le mécanisme de régulation de la foulée lors de la phase d'approche de la planche a été étudié chez des athlètes valides et para athlètes des classes T11 à T13.

Comparativement aux athlètes valides et aux para athlètes de la classe T13, similaires en termes de régulation de la foulée, les athlètes T11 et T12 régulent leur approche plus précocement, c'est-à-dire, qu'ils anticipent d'avantage au niveau de la planche de saut. Chez des nageurs en situation de handicap visuel, des altérations significatives dans la gestion de l'allure par rapport aux nageurs valides ont également été observées et pourraient être liées à un manque de perception de l'allure (159).

Concernant les caractéristiques physiologiques, des valeurs de pic de $\dot{V}O_2$ comprises entre 36 ml.kg⁻¹.min⁻¹ et 44 ml.kg⁻¹.min⁻¹ ont été observées sur ergomètre à bras chez des nageurs, finalistes aux Jeux Paralympiques de Sydney (82). Chez des cyclistes évoluant en tandem (160), des valeurs de consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) de $45,8 \pm 6,9$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ et $52,2 \pm 9,8$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ ont été constatées respectivement pour les cyclistes avec un handicap visuel et les pilotes.

Handicap intellectuel

Un handicap intellectuel représente, au sens de l'Organisation Mondiale de la Santé, « la capacité sensiblement réduite à comprendre une information nouvelle ou complexe, d'apprendre et d'appliquer de nouvelles compétences. Il s'ensuit une aptitude diminuée à faire face à toute situation de manière indépendante (trouble du fonctionnement social), un phénomène qui commence avant l'âge adulte et exerce un effet durable sur le développement » (161). Les mécanismes d'apprentissage d'une habileté motrice sont liés à la capacité cognitive, altérée chez les personnes en situation d'handicap intellectuel (85). L'intégration sensorimotrice est limitée et régulée moins efficacement (afférences sensibles intégrées par le système nerveux central et utilisées pour assister l'exécution des programmes moteurs). La synchronisation et la coordination de séquences de mouvements sont également perturbées (85).

En athlétisme, la fréquence, la longueur des foulées, la vitesse et l'accélération des sprinters avec un handicap intellectuel (162) ont été étudiées. Comparativement à des sprinters valides de niveau universitaire, les sprinters avec un handicap intellectuel ont une fréquence significativement plus faible et une longueur de foulée plus courte, ce qui se traduit par une vélocité et une accélération réduite.

Par ailleurs, il est démontré que les athlètes avec un handicap intellectuel ont des difficultés à mettre en place une stratégie d'allure et à réguler l'intensité appliquée lors d'une épreuve de course (163,164). Cela confirme que l'instauration d'une stratégie d'allure est associée à des mécanismes cognitifs.

Des mesures de pic de $\dot{V}O_2$ élevées, comparables à des sujets valides bien entraînés, ont été rapportées sur un nombre faible de sportifs en situation d'handicap intellectuel (165). Ces travaux ont été confirmés sur des athlètes de haut niveau pratiquant plusieurs disciplines. Sur un test EUROFIT d'évaluation de la condition physique, des niveaux égaux ou inférieurs à ceux de leurs homologues valides ont pu être obtenus (165).

À retenir

Un nombre limité d'études a exploré les capacités physiques et physiologiques des para sportifs selon le type de handicap.

Dans les études recensées, un faible nombre de para sportives et para sportifs a été inclus, laissant une grande part d'incertitude et de variabilité dans les résultats observés.

Une grande majorité des recherches s'est concentrée sur des para sportifs avec blessure médullaire.

Selon les types de handicap étudiés et les paramètres analysés, les para sportives et para sportifs présentent des adaptations physiques et physiologiques qui s'expriment de la même façon que pour les sportives et sportifs valides de haut niveau.

2.5 Le handicap congénital et acquis

Cette dernière partie étaye une définition du handicap auquel s'ajoute une classification tenant compte du moment d'apparition du handicap, selon qu'il soit congénital ou acquis au cours de la vie. Les connaissances de l'origine du handicap et de ses impacts sur les trajectoires, les étapes de développement et ses effets sur la performance sont peu étudiés dans la littérature. Enfin, une observation particulière est proposée sur les para sportives et para sportifs en situation de handicap visuel afin de comprendre les effets de l'origine du handicap dans les épreuves de natation et athlétisme où les performances sont non médiées par des apports matériels ou technologiques.

De manière générale, le terme handicap est générique et désigne les déficiences, les limitations d'activité et les restrictions de participation (166). Si son utilisation semble simple, elle suscite de multiples interrogations. En effet, les débats conceptuels autour de la définition du handicap ne sont pas stabilisés et alimentent toujours les réflexions tant du milieu académique que des professionnels et des associations (167).

Dans le cadre de la classification internationale du fonctionnement, la déficience représente l'altération de la fonction organique (fonction physiologique d'un système organique y compris la fonction psychologique) ou de la structure anatomique (organes, membres et leurs composantes) tels qu'un écart ou une perte importante par rapport à un niveau de structure anatomique normé. L'incapacité représente toute réduction (résultant d'une déficience), partielle ou totale, de la capacité à accomplir une activité dans les limites considérées comme normales. Enfin, les limitations d'activité sont considérées comme les difficultés que peut rencontrer une personne dans l'exécution de cette activité.

La CIF représente un cadre polyvalent et un système de classification élaboré par l'OMS. Elle reconnaît que le diagnostic ne se traduit pas automatiquement et directement par l'état fonctionnel, le pronostic ou le niveau des soins et des services fournis. Elle est utilisée pour décrire et mesurer la santé, et non pour donner un diagnostic ou un pronostic (166).

Une des voies les plus utilisées dans le classement du handicap est celui par mécanisme général de survenue (168). Plusieurs classements pour catégoriser l'origine du handicap peuvent s'opposer : le handicap congénital et acquis ; le handicap par malformation, maladie, accident, ou vieillissement ; le handicap évolutif et non évolutif.

La nomenclature « handicap congénital » et « handicap acquis » résulte de l'utilisation d'un classement tenant compte du moment d'apparition. Un handicap est dit congénital ou inné s'il est visible ou dépisté dès la naissance. Un handicap est dit acquis si sa révélation survient ensuite : chez le nourrisson, l'enfant ou l'adulte (168). Parmi les causes de handicap (168), les malformations sont toujours congénitales ; les blessures traumatiques toujours acquises (à l'exception des très rares blessures traumatiques survenues lors de la naissance, qu'il faut dissocier des accidents de périnatalité ou traumatismes obstétricaux responsables d'infirmité motrice cérébrale). Les maladies, évolutives ou non, peuvent également être soit congénitales soit acquises.

Adaptation et développement

La définition de l'adaptation concerne ici les changements affectifs, cognitifs et comportementaux qui se rapprochent d'un état optimal d'adéquation entre la PSH et son environnement (169). Le faible nombre d'études ayant comparé les adaptations selon l'origine du handicap suggère qu'un handicap d'origine congénital est associé à une meilleure adaptation que les handicaps acquis au cours la vie. Dans la littérature scientifique, l'adaptation des PSH en fonction de l'origine du handicap est étudiée principalement à travers des approches psychologiques. Ces recherches se sont principalement intéressées aux personnes avec un handicap acquis et énoncent l'hypothèse selon laquelle les PSH avec handicap inné éprouvent moins de difficultés à s'adapter (169).

En effet, basée sur plusieurs observations, l'adaptation au handicap serait plus importante lorsque l'apparition survient à la naissance ou durant l'enfance (169). Sur le plan cognitif et affectif, les enfants seraient plus résilients et flexibles, la perception de leur image corporelle ne serait pas complètement développée et les préjugés de la société sur le handicap ne sont pas encore intériorisés. Enfin, il a été constaté que les PSH ayant un handicap congénital avaient un niveau d'acceptation du handicap plus élevé que les personnes ayant acquis leur handicap (169)

La littérature scientifique sur les trajectoires de développement dans le para sport est peu fournie. Il existe un large éventail de variables qui influencent les trajectoires des sportives et sportifs (170) : les variables démographiques (statut socioéconomique, statut familial et antécédents sportifs), physiques et psychologiques, sportives (qualité de l'encadrement, relations sociales et environnementales, accès aux installations) et politiques (accès au sport, financement). Pour autant, le type de handicap, le moment d'apparition et la classification potentielle introduisent des niveaux de complexité qui ont un impact sur l'étendue des facteurs pouvant être intégrés dans le modèle de développement d'un para sportif.

Les différences dans les modèles de développement entre les para sportives et para sportifs avec des handicaps congénitaux et acquis sont relativement peu documentées.

L'origine du handicap peut influencer la façon dont les PSH peuvent accéder à la pratique d'une APS (35). Le para sport a structurellement deux entrées principales. La première où les PSH avec handicap acquis ont accès à un processus de réadaptation par le biais des hôpitaux et services de réhabilitation. La seconde où les enfants avec handicap congénital commencent dans des écoles ou clubs spécialisés. Des différences concernant l'âge d'entrée dans la discipline sportive, plus tardif dans le Paralympisme par rapport au sport valide, ont été confirmées par des entretiens semi-directifs auprès d'experts Paralympiques internationaux (35).

Il est reconnu qu'il existe une relation positive entre les heures accumulées de pratique d'APS intentionnelle et l'acquisition de compétences (171). Les para sportives et para sportifs avec un handicap congénital ont ainsi l'occasion de participer et de s'entraîner à un âge plus précoce que ceux et celles ayant un handicap acquis, compte tenu de la variabilité autour du moment d'apparition du handicap. A l'inverse, les para sportives et para sportifs avec un handicap acquis peuvent être en mesure de transférer des compétences cognitives générales acquises dans les pratiques sportives passées, où l'expérience peut aider à l'acquisition de compétences et à l'adaptation aux contraintes du para sport. Ces éléments ont été confirmés sur un échantillon de 345 para sportives et para sportifs brésiliens issus de 15 sports Paralympiques (172). Il a été démontré à travers un questionnaire que les sportives et sportifs avec handicap acquis avaient des phases de développement plus courtes (4,5 ans en moyenne) entre le premier contact avec le para sport et l'atteinte d'un statut élite vis-à-vis de leurs homologues avec handicap congénital (6 ans en moyenne). De plus, ces derniers ont commencé le para sport en moyenne 8 ans plus tôt et ont remporté des titres sur le circuit international 7 ans plus tôt en comparaison aux sportifs avec

handicap acquis au cours de la vie. Le transfert de compétence ainsi que l'expérience acquise avant l'apparition du handicap seraient en faveur d'une accession plus précoce au sport de haut niveau.

Enfin, au niveau psychologique, une étude a observé de meilleurs scores chez les para sportifs en fauteuil avec handicap acquis (173) avec une humeur générale plus positive, une meilleure estime de soi, une meilleure maîtrise de soi et une anxiété plus faible par rapport aux para sportifs avec handicap congénital.

Performances

Très peu d'études ont comparé quantitativement le niveau de performance atteint entre les para sportifs avec handicap congénital ou acquis (170). Le moment d'apparition du handicap n'est actuellement pas pris en compte dans le système de classification.

Une étude réalisée sur 345 para sportives et para sportifs brésiliens (33) n'a trouvé aucune association concernant l'origine du handicap et l'obtention de médailles. L'origine n'influencerait donc pas le nombre de titres obtenus en compétition au cours de la carrière.

Sur un groupe de 55 basketteurs en fauteuil de l'équipe national du Canada (hommes et femmes), les étapes de progression et d'accession au haut niveau au cours de leur carrière sportive ont été étudiées à travers des questionnaires (174). Celles et ceux avec handicap congénital ont commencé à pratiquer plus jeune et ont atteint un niveau de performance national ou international plus tôt dans leur carrière. La majorité des joueuses et joueurs avec handicap acquis ont atteint les mêmes niveaux de performance, mais en moyenne plus tardivement, malgré une variabilité inter individuelle plus importante dans les étapes de progression.

Pour autant, cette dichotomie n'est toujours pas concluante dans la littérature et doit être explorée davantage en incluant des variables sur les niveaux d'habileté motrice et les types de handicap. Enfin, l'inclusion dans le système de classification de l'âge auquel le handicap est acquis rendrait la classification trop complexe, car il faudrait soit des classes supplémentaires, soit des critères de classification différents pour chaque classe, en fonction de l'âge d'apparition du handicap (23).

Les sportifs avec un handicap visuel congénital et acquis

Comme pour les para sportives et para sportifs avec handicap moteur, les sportives et sportifs avec handicap visuel concourent actuellement dans plusieurs classes sportives, indépendamment du moment d'apparition du handicap. Selon certains experts, acquérir un handicap visuel plus tard dans la vie, quand on a pratiqué une activité sportive avant le moment d'apparition, pourrait donner un avantage par rapport aux sportives et sportifs avec handicap congénital (23,24).

Une étude DELPHI sur le système de classification des sportives et sportifs en situation de handicap visuel (157) se basant sur une méthode de prospection interactive systématique a rapporté que 91% des experts interrogés étaient d'accord sur le fait que dans certains sports, l'âge d'apparition du handicap avait un impact sur l'acquisition des compétences nécessaires. De plus, la relation entre l'âge auquel le handicap est acquis et le temps d'acquisition des habiletés dépend de la complexité et des contraintes inhérentes au sport pratiqué (24,157).

Un handicap visuel affecte l'endurance cardiovasculaire et musculaire, la souplesse, l'équilibre, l'apprentissage moteur et la performance motrice comparativement à des personnes sans handicap visuel (175,176). Il est reconnu que l'apprentissage par observation joue un rôle important dans l'acquisition d'habiletés motrices et techniques (177). L'existence d'un lien entre l'exécution motrice, l'observation et l'imitation a largement été étayé dans la littérature. L'âge ressort comme un important médiateur de l'apprentissage par observation dans les différentes phases de développement. Par exemple, les démonstrations par autrui permettent d'assimiler et d'exécuter davantage de mouvement chez les enfants que chez les adultes. Chez ces derniers, les démonstrations permettent par contre d'affiner et de mieux contrôler les mouvements déjà maîtrisés (155).

La difficulté d'utiliser l'apprentissage par observation chez des athlètes et nageurs ayant un handicap visuel congénital est donc potentiellement un facteur à prendre en compte dans le processus de développement. Cela induit un temps plus long d'acquisition des apprentissages moteurs et des compétences spécifiques du sport (157,178). Cependant, pour compenser ces difficultés, un sportif avec un handicap visuel depuis la naissance est susceptible de développer des adaptations par des mécanismes compensatoires via des processus visuo-spatiaux (179) et systèmes somato-sensoriel et vestibulaire (180).

À retenir

Le terme handicap est générique et désigne les déficiences, les limitations d'activité et les restrictions de participation.

La nomenclature « handicap congénital » et « handicap acquis » résulte de l'utilisation d'un classement tenant compte du moment d'apparition du handicap.

Très peu d'études ont comparé quantitativement le niveau de performance atteint entre les para sportives et para sportifs ayant un handicap congénital et un handicap acquis. Les performances des sportives et sportifs ayant acquis leur handicap au cours de la vie sont caractérisées par une progression plus rapide et un âge au pic plus tardif. Cependant, il semble difficile de dégager des tendances fortes de la littérature.

Selon certains experts, acquérir un handicap visuel plus tard dans la vie pourrait être un avantage par rapport à une sportive ou sportif avec un handicap visuel de naissance.

3. Questions de recherche

Les travaux évoqués dans la revue de littérature ont permis d'identifier les premiers repères spécifiques au champ Paralympique, de caractériser des tendances sur l'évolution des performances Paralympiques et des trajectoires de progression (selon l'âge et l'impact de l'origine du handicap). Il subsiste toutefois un certain nombre de questionnements et d'analyses à approfondir afin de justifier les premières observations. Les principales questions de recherches sont les suivantes :

- Comment évoluent les performances des sportifs Paralympiques dans l'ensemble des épreuves en natation et athlétisme ?
- Comment se caractérise la relation âge-performance chez les sportifs Paralympiques ?
- L'origine du handicap, innée ou acquise, est-elle un facteur de la performance ?
- En para natation, la multiplicité de participation aux épreuves est-elle associée à un meilleur niveau de performance ?

4. Objectifs et hypothèses

Cette thèse a pour objectif d'analyser les performances et les spécificités de facteurs de la performance identifiés chez les sportives et sportifs Paralympiques à travers trois sous-objectifs :

- 1) Analyser **l'évolution des meilleures performances** en compétitions en para athlétisme et para natation afin d'appréhender le contexte global dans lequel les para sportives et para sportifs évoluent.

Hypothèse : les performances en para athlétisme et para natation, sports Paralympiques majeurs, progressent encore alors que les performances des sportives et sportifs valides plafonnent.

- 2) Etudier **l'effet de l'âge sur les performances maximales et l'impact de l'origine du handicap sur l'âge au pic de performance** et le niveau atteint par les meilleurs para athlètes et para nageuses et nageurs en situation de handicap visuel.

Hypothèse : la relation âge-performance présente des trajectoires similaires à celles observées dans la littérature avec des pics de performance plus ou moins tardifs. Cette relation pourrait varier selon l'origine du handicap, innée ou acquise. De plus, l'origine du handicap aurait un impact sur le niveau de performance atteint.

- 3) Etudier **les performances des para nageuses et para nageurs les plus rapides** à l'aune de leur **participation à de multiples épreuves** et en comparaison avec leurs homologues valides.

Hypothèse : la faible densité de concurrence en para natation permettrait aux nageuses et nageurs des classes de handicap S7 à S14 d'être compétitifs dans différentes épreuves et d'exprimer ainsi leur polyvalence.

5. Contribution scientifique

Structure du cadre expérimental

La structure de la thèse est illustrée de manière schématique dans la Figure 20, selon les approches de chaque étude et la question de recherche abordée.

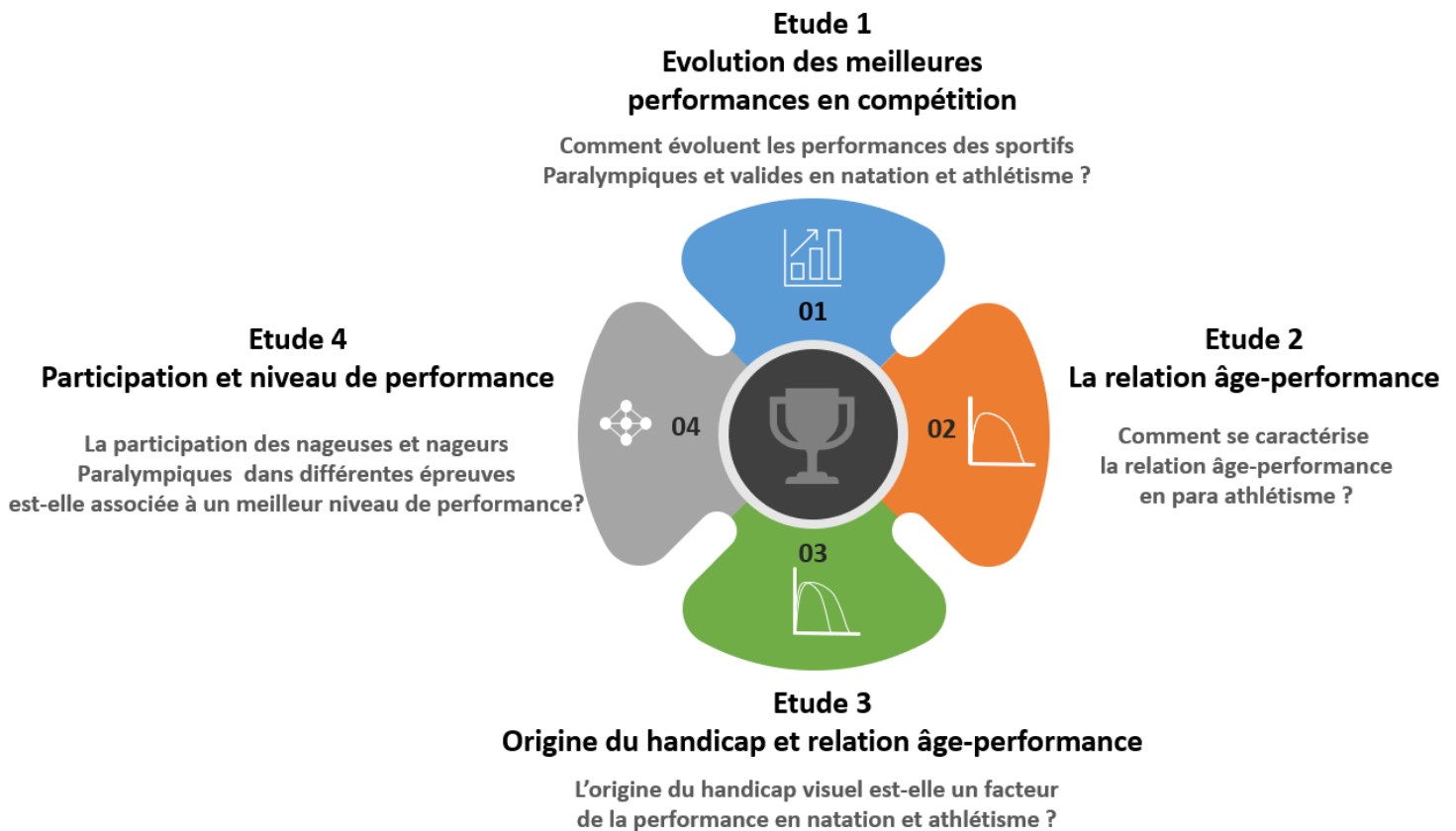


Figure 20 : Schéma du cadre expérimental de la thèse.

5.1. Etude 1

Résumé

Les performances réalisées par les athlètes valides révèlent des plateaux, observés depuis la fin des années 80. Chez les athlètes Paralympiques, peu d'études ont analysé les meilleures performances en athlétisme et en natation. La pandémie de COVID-19 a grandement perturbé la pratique sportive mais aucune étude n'a mesuré son effet sur les performances de haut niveau. L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact de la pandémie de COVID-19 sur les meilleures performances mondiales en athlétisme et en natation chez les athlètes valides et Paralympiques. Les résultats des 10 meilleurs performeurs mondiaux dans 66 épreuves Olympiques depuis 1891 (soit 48 401 performances) et 255 épreuves Paralympiques depuis 2010 (34 422 performances) ont été collectés, chez les femmes et les hommes. Par épreuve, une moyenne mobile des 10 meilleures performances annuelles a été calculée sur un pas de 4 ans. L'évolution d'une année sur l'autre des performances a été estimée par la pente de la moyenne mobile. La distribution des performances (en % du record du monde de l'épreuve) par année a été analysée afin de comparer les performances de 2020 aux autres années depuis 2010. Le taux de stabilité (athlètes entrants et sortants par année dans le top 10) depuis 2010 et le nombre de compétitions annuelles dans les 2 sports ont également été pris en compte dans l'analyse.

Sur la période 2010-2019, les performances en athlétisme féminin, et natation valides ont progressé significativement. Sur la période 2014-2019, les performances Paralympiques ont également augmenté significativement. En 2020, le niveau des performances toutes épreuves confondues (en % du record par épreuve) a baissé significativement par rapport aux années précédentes. En 2020, le nombre de nouveaux entrants dans le Top 10 était significativement plus important avec un nombre de compétitions organisées plus faible par rapport aux autres années. Cette étude a permis de mesurer l'impact d'un événement mondial unique sur les performances sportives des meilleurs athlètes Olympiques et Paralympiques. La mise à jour des performances depuis les dernières études a montré que les performances évoluent depuis 2010 chez les valides mais plafonnent toujours à l'échelle de l'ère Olympique alors que les performances Paralympiques progressent de manière plus importante.

**The COVID-19 pandemic impact on the best performers
in Track and Field and Swimming among Paralympic and non-disabled athletes.**

Julien Schipman^{1,2}, Guillaume Saulière¹, Andy Marc¹, Imad Hamri¹, Bryan Le Toquin¹, Yann Rivallant¹, Audrey Difermand^{1,2}, Jean-François Toussaint^{1,2,3} and Adrien Sedeaud¹

¹ Institute for Biomedical and Epidemiological Research in Sport, EA7329, National Institute of Sports Expertise and Performance, Paris, FRANCE.

² Paris University, Paris, FRANCE.

³ Center for Sports Medicine Research, Hôtel-Dieu, Publics Assistance Paris Hospitals of Paris, Paris, FRANCE.

Abstract

The COVID 19 pandemic has greatly disrupted high performance sport and international competition. The aim of this study was to quantify the impact of the COVID-19 pandemic on the world's top 10 performances in Track & Field and Swimming among non-disabled and Paralympic athletes.

The results of the 10-best world performers in 66 Olympic events since 1891 and 255 Paralympic events since 2010 were collected. To quantify the performance trend, the slopes of the 4 years moving average were calculated and analyzed by time period. The distribution of performances (in % of the world record) by year was analyzed to compare the 2020 values to the ten previous years. The stability rate (athletes joining and leaving each year) since 2010 and the number of annual competitions events were also measured.

Over the study period, such declines in performance have only been observed during the two World Wars. In 2020, the level of performances has decreased significantly, corresponding to a 6 to 10 years setback. In 2020, the number of new athletes in the 10-best was significantly higher with a lower number of organized competitions.

The impact on the performances of the best international non-disabled and Para athletes has been considerable.

Key words: SPORT PERFORMANCE; RECESS; TOP 10; SARS-CoV-2

Introduction

As of July, 20th 2021, more than 190 770 507 cases of COVID-19 have been recorded and 4 095 924 deaths are to be officially deplored (*WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard*, n.d.). This pandemic situation has generated varying levels of response. Societal restrictions and lockdown have caused several impacts on society. The global economic, environmental or health co-factors and collateral impacts of the pandemic are beginning to be assessed (De Larochelambert et al., 2020a). Regarding the sports field, the pandemic situation generated a sudden end to competitions (Beneke & Leithäuser, 2021) and a postponement of the Tokyo Olympic and Paralympic Games (Gallego et al., 2020). Months later, after setting up strict health protocols, the competitions were able to resume (Carmody et al., 2020; Hughes et al., 2020), without exposing athletes to an increased risk of contamination (Jones et al., 2021; Meyer et al., 2021; Schumacher et al., 2021). Meanwhile, different level of detraining (Dauty et al., 2020; Pla et al., 2021a; Pyne et al., 2004; Sedeaud et al., 2014) have been induced depending on each country's situation.

Among elite athletes, world records reflect maxima and temporal or absolute limits (Berthelot et al., 2008). Secular trend based on 3263 world records, starting in 1896, revealed exponential progression toward a recent plateau (Berthelot et al., 2008, 2015). This trend was also observed in sports with outdoor events exposed to non-standardized environments (Desgorces et al., 2008). For more accurate measures, between 1891 and 2008, the annual performance of the ten best performers in more than 40 000 performances from 36 track and field and 34 swimming events were scrutinized (Berthelot, Tafflet, et al., 2010). Progressions were observed until a major stagnation since 1988 (Berthelot, Tafflet, et al., 2010). For swimming and running, several studies highlighted progression and stagnation of world records for female and male (Berthelot et al., 2015; Lippi et al., 2008; Nevill et al., 2007; Nevill & Whyte, 2005).

Exceptional performances are limited by physiological and genetic conditions, economic and environmental contexts and a participant population mostly consisting of athletes with optimized traits (Berthelot et al., 2015). For Paralympic athletes, according to some disciplines, events and classifications, performance has increased slightly or not significantly over the past few years in Track & Field (de Macedo et al., 2020; Lepers et al., 2014) and Para swimming (Fulton et al., 2009). An overall trend for improved Paralympic sprint performances in athletes with lower-limb amputations since 1992 to 2012 was observed with a consequent role played by running-specific prostheses (Grobler et al., 2015). Best performances are also subject to an Olympic and Paralympic periodicity with an important increase during the months preceding the Games and a decrease the following year (Berthelot, Tafflet, et al., 2010; Costa et al., 2010; Fulton et al., 2009; Pyne et al., 2004). For Olympic and Paralympic athletes, major historical events may possibly alter both the organization of international competitions and the development of morphologies (Sedeaud et al., 2014) and physical performance (Berthelot et al., 2015).

At the individual scale, a deconditioning was observed during lockdown associated with an increase in resting heart rate and a decrease in self-reported well-being (Pla et al., 2021a). Aerobic abilities and endurance capacity have also decreased in adolescent (Dauty et al., 2020) and adult elite players (Fikenzer et al., 2020). For professional soccer players, prolonged abstinence from training and competitions induced by lockdown engaged athletes in a detraining situation (Cavarretta et al., 2021). In professional cyclists, a large reduction in physical tests as the best 5-minute and best 20-minute performance has been observed with 1% to 19% losses (Muriel et al., 2020). Significant reduction in physical fitness of international kickboxers has also been measured (Ambroży et al., 2021). Even in para-athletes, time spent engaging in sedentary screen time activities increased during the COVID-19 pandemic, but with different capabilities of resilience (Shaw et al., 2021, p. 19). The lockdown has already

altered athletes' condition and well-being, but no study has measured the pandemic impact on high-level performances.

The aim of this study was to quantify the impact of the COVID-19 pandemic on the world's best performances in Track & Field and Swimming among non-disabled and Paralympic athletes.

Methods

Data collection

We collected the single best result of the 10-best world performers every year from two quantifiable sports in 66 major Olympic events and 255 major Paralympic events: 38 Track & Field (T&F) events over the modern Olympic era (1891–2020) and 28 swimming events over the 1963–2020 period; 168 Paralympic T&F events between 2010–2020 and 139 Paralympic swimming events over the 2010–2020 period.

The Olympic and Paralympic events collected were in T&F for the race events: 100m, 200m, 100m hurdles, 110m hurdles, 200m, 400m, 400m hurdles, 800m, 1500m, 3000m steeple, 5000m, 10000m and Marathon; for the jump events: HighJump, LongJump, Pole Vault and Triple Jump; for the throw events: Discus, Hammer, Javelin and Shotput.

In Swimming, the Olympic and Paralympic race events collected were in 5 disciplines with different distances: in freestyle, 50m, 100m, 200m, 400m, 800m and 1500m; in backstroke: 50m, 100m and 200m; in breaststroke: 50m, 100m and 200m; in butterfly: 50m, 100m and 200m; in individual medley: 150m, 200m and 400m. Relays in both sports have not been included in this study. A total number of 48 401 non-disabled performances and 34 422 Para performances were gathered.

Event groups by impairment types

For Para athletes and Para swimmers, all performances were normalized and calculated as a percentage (%) of the present world record for each classification event. Then, groups by impairment type have been set based on the IPC competition classification. For T&F Para athletes (PA), the following groupings were: athletes with visual impairment: T/F11-T/F12-T/F13; athletes with cerebral palsy: T/F35-T/F36-T/F37-T/F38; athletes with upper limb disabilities: T/F45-T/F46-T/F47; athletes with lower limb disabilities: T/F42-T/F43-T/F44-

T/F61-T/F62-T/F63-T/F64 and athletes with intellectual disabilities: T/F20. For Wheelchair athletes, the classifications were: athletes with cerebral palsy in a wheelchair: F31-F32-T/F33-T/F34; athletes with tetraplegia disabilities: T/F51-T/F52 and athletes with paraplegia disabilities: T/F53-T/F54-F55-F56-F57. For Para swimmers (PS), the groupings were: PS from classes 1 to 4 with an impairment of 3 or 4 limbs and the trunk; PS from classes 5 to 6 with an impairment of 2 limbs and the trunk or the 2 complete upper limbs; PS from class 7 to 8 Impairment of 2 lower limbs or a complete upper limb, PS from classes 9 to 10 with an impairment of a complete or incomplete lower limb or an incomplete upper limb; PS from classes 11 to 13 with a complete blindness or significant visual impairment. This grouping resulted in 105 para T&F and 87 para Swimming performances by impairment type categories.

Performance trends

To analyze and compare the performance trends of each event, performances were derived from the race times by converting them into mean speeds (m.s^{-1}) for the race events in T&F and swimming. All performances were normalized and calculated as a percentage (%) of the present world record for each event. A moving average, based on the 10-best performers over the past 4 years, has been used in order to consider the Olympic and Paralympic performance periodicity (Berthelot et al., 2008). For Para T&F and Para Swimming, the moving average was calculated from 2014 up to 2020, due to the limited data available before 2010.

Then, to quantify the performance evolutions, moving average slopes between two consecutive years were computed for each year. Slopes were derived from the following equation:

$$\text{slope}(t) = \frac{[Y(t) - Y(t-1)]}{[X(t) - X(t-1)]}$$

Slopes were reported as mean $\pm$ standard-deviation per year by sport and sex for non-disabled athletes (NDA), non-disabled swimmers (NDS), PA and PS (Table 1).

In order to focus on the impact of 2020, moving average's slopes between 2010 and 2019 for NDA and NDS and between 2014 and 2019 for PA and PS have been computed for each events and reported as mean $\pm$ standard-deviation by sport and sex. Those slopes were then compared with the ones computed for 2020.

Performance levels

To estimate the recess amplitude, the performance levels per year (in %) were analyzed all events combined. We compared the 2020 performances to the 2010-2019 performances. In T&F, the performances levels were analyzed for the three groups of racing, jumping and throwing events. In swimming, the analysis regrouped all distances by stroke styles.

Stability rate of the 10-best and number of competitions held by year

To understand the renewal trend, a stability rate measured by the turnover of the 10-best athletes year after year since 2010 has been explored in each event. It refers to the number of similar athletes participating to the official competitions between two successive years, expressed in %. For PA and PS, events were analyzed by IPC classification. In some para events, too few athletes competed in 2020. These events were not considered: 209 Para events provided a reliable assessment of the stability rate.

To appreciate the number of cancelled competitions in 2020, we collected the number of event organized since 2016. For the non-disabled athletes, all international level swimming competitions on the FINA website and all IAAF competitions for the T&F events from the IAAF website have been gathered by year. For the Para athletes, all the referenced competitions

from the IPC rankings results in swimming and T&F from the IPC website have also been collected by year.

Statistical analysis

Results were reported as mean $\pm$ standard deviation. A Wilcoxon Test and a post-hoc with Bonferroni correction were performed to test if the slopes differ from 0 and if the 2020 performance levels differ compared to other years since 2010 according to the sport, discipline and sex. The same methodology was used to compare the stability rate of the 10-best between two successive years by sports. Significant results were set at $\alpha \leq 0.05$. To investigate the distribution of the number of organized competitions per year, a chi-square test for a uniform distribution was used to identify an overall effect. In the presence of a global effect, Haberman residuals were calculated and compared to the quantiles of the normal distribution (at $\alpha = *$: 0.1; $**$: 0.05; $***$: 0.01) to determine if the number of competitions held per year has been over or under represented. All statistical analyses were performed using R (version 3.6.2; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

Results

Performance trends and levels in 2020

The distribution of the slopes applied on the moving averages (**Table 1**) is significantly different from 0 for the year 2020 ($p \leq 0.05$). A significant decreases of -0.20 ± 0.24 % for non-disabled male athletes and -0.45 ± 0.25 % for non-disabled female athletes; and -0.24 ± 0.09 % for non-disabled male swimmers and -0.27 ± 0.17 % for non-disabled female swimmers has been observed. In Para Athletes, the distribution of the slopes is significantly different from 0 for the year 2020 ($p \leq 0.05$). A significant decreases of -1.81 ± 1.25 % for male and -1.69 ± 1.31 % for female, based on slope is observed. In Para Swimmers, the distribution of the slopes is significantly different from 0 in 2020 ($p \leq 0.05$) with -1.59 ± 0.88 % for male and -1.68 ± 0.94 % for female.

The mean performance levels (in % of WR) have significantly decreased in 2020 compared to the performances of the previous years (**Table 2**). For NDA, the mean performance levels in 2020 for male and female were significantly lower ($p \leq 0.05$) compared to each year, except in 2014 for male and 2010 for female. For NDS, the mean performance levels in 2020 for male and female were significantly lower ($p \leq 0.05$) compared to each year, except in 2012 for male and 2010 for female. For PA, the mean performance levels in 2020 for male and female were significantly lower ($p \leq 0.05$) compared to each year, except for male in 2010 and for female in 2010, 2011, 2013 and 2014. For PS, the mean performance levels in 2020 for male and female were significantly lower ($p \leq 0.05$) compared to each year, except for female in 2010.

Evolutions of the 10-best performers are illustrated in four non-disabled events and four Para impairment type categories in **Figure 1** (T&F) and **Figure 2** (Swimming).

The analyses in T&F and swimming by discipline related to the slopes and performance levels are presented in **supplementary files**.

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Non-disabled	Male	T&F	-0.06 ± 0.19*	0.02 ± 0.20	0.03 ± 0.18*	-0.01 ± 0.12	-0.06 ± 0.29	0.01 ± 0.22	-0.04 ± 0.23*	0.05 ± 0.31	0.16 ± 0.38*	0.08 ± 0.24*	-0.20 ± 0.24*
		Swimming	0.20 ± 0.09*	0.15 ± 0.08*	-0.04 ± 0.10*	-0.21 ± 0.11*	0.14 ± 0.07*	0.10 ± 0.10*	0.08 ± 0.08*	0.11 ± 0.11*	0.07 ± 0.09*	0.10 ± 0.10*	-0.24 ± 0.09*
	Female	T&F	-0.01 ± 0.22	0.03 ± 0.20	0.06 ± 0.29*	0.03 ± 0.19	-0.13 ± 0.29*	0.01 ± 0.25	0.00 ± 0.27	0.06 ± 0.23*	0.26 ± 0.27*	0.16 ± 0.17*	-0.45 ± 0.25*
		Swimming	0.23 ± 0.13*	0.21 ± 0.12*	0.06 ± 0.07*	-0.11 ± 0.17*	0.15 ± 0.12*	0.12 ± 0.10*	0.10 ± 0.09*	0.09 ± 0.13*	0.11 ± 0.12*	0.08 ± 0.10*	-0.27 ± 0.17*
Para	Male	T&F	/	/	/	/	0.51 ± 1.03*	0.85 ± 1.08*	0.86 ± 1.42*	0.87 ± 1.19*	0.80 ± 0.96*	0.74 ± 0.82*	-1.81 ± 1.25*
		Swimming	/	/	/	/	0.30 ± 0.37*	0.48 ± 0.41*	0.61 ± 0.80*	0.22 ± 0.63*	0.20 ± 0.50*	0.31 ± 0.58*	-1.59 ± 0.88*
	Female	T&F	/	/	/	/	0.58 ± 1.52*	0.78 ± 1.52*	1.08 ± 1.11*	0.93 ± 1.30*	1.00 ± 1.13*	1.05 ± 1.12*	-1.69 ± 1.31*
		Swimming	/	/	/	/	0.67 ± 0.71*	0.88 ± 0.77*	1.02 ± 1.32*	0.55 ± 1.01*	0.48 ± 0.61*	0.47 ± 0.72*	-1.68 ± 0.94*

Table 1 Mean ± Standard Deviation (%) of the slopes of the moving average per year for non-disabled athletes, non-disabled swimmers, para athletes and para swimmers all events combined in Track and Field (T&F) and Swimming. * Indicates a mean ± SD significantly different from the value 0 ($p \leq 0.05$)

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Non-disabled	Male	T&F	95.44 ± 2.67*	95.67 ± 2.68*	95.74 ± 2.84*	95.46 ± 2.86*	95.19 ± 3.31	95.69 ± 2.65*	95.58 ± 2.62*	95.64 ± 2.40*	95.83 ± 2.47*	96.03 ± 2.60*	94.79 ± 2.76
		Swimming	96.59 ± 1.05*	96.88 ± 1.10*	97.20 ± 1.11	97.11 ± 0.93*	97.16 ± 0.96*	97.3 ± 0.89*	97.53 ± 1.03*	97.55 ± 0.91*	97.46 ± 0.90*	97.70 ± 0.98*	96.56 ± 1.05
	Female	T&F	93.87 ± 3.26	94.07 ± 3.53*	94.66 ± 2.97*	94.17 ± 3.29*	93.33 ± 3.86	94.11 ± 3.55*	94.66 ± 3.34*	94.43 ± 3.57*	94.38 ± 3.52*	94.75 ± 3.60*	92.87 ± 3.75
		Swimming	96.36 ± 0.73	96.70 ± 0.75*	97.01 ± 1.02*	97.06 ± 0.91*	96.97 ± 0.90*	97.16 ± 0.93*	97.43 ± 1.09*	97.42 ± 1.03*	97.40 ± 0.96*	97.49 ± 0.98*	96.36 ± 1.09
Para	Male	T&F	83.01 ± 11.64	84.43 ± 11.26*	85.61 ± 11.26*	84.50 ± 10.93*	84.90 ± 10.29*	87.56 ± 9.32*	88.75 ± 8.33*	88.01 ± 8.92*	88.10 ± 8.46*	90.53 ± 7.23*	81.35 ± 12.24
		Swimming	87.10 ± 7.68*	88.19 ± 7.27*	89.22 ± 8.33*	86.91 ± 9.10*	87.86 ± 8.18*	89.68 ± 6.82*	91.16 ± 6.74*	87.59 ± 8.38*	88.72 ± 8.70*	91.09 ± 7.10*	84.96 ± 9.54
	Female	T&F	77.29 ± 14.21	79.33 ± 14.27	81.07 ± 13.26*	78.75 ± 14.49	79.43 ± 14.75	82.45 ± 13.7*	84.94 ± 12.53*	82.58 ± 13.13*	83.25 ± 12.36*	86.66 ± 11.13*	78.02 ± 14.62
		Swimming	83.64 ± 9.46	84.97 ± 8.56*	86.03 ± 9.75*	84.78 ± 9.17*	86.30 ± 7.48*	88.23 ± 7.00*	89.98 ± 6.53*	87.01 ± 8.03*	88.31 ± 8.14*	90.19 ± 7.09*	83.11 ± 9.68

Table 2 Mean ± Standard Deviation (%) of the performance (in % of the WR by event) per year for non-disabled athletes, non-disabled swimmers, para athletes and para swimmers all events combined in Track and Field (T&F) and Swimming. * Indicates a mean ± standard deviation significantly different from the performances in 2020 ($p \leq 0.05$).

Performance trends from 2010 to 2019

Over the 2010 to 2019 period, significant performance improvements based on the slope ($p \leq 0.05$) of 0.05 ± 0.11 %, 0.06 ± 0.05 %, 0.09 ± 0.05 % for female's NDA, male's NDS and female's NDS respectively, are measured. Among male NDA, the increase of 0.03 ± 0.11 % was not significantly different from 0.

From 2014 to 2019, performances significantly increased ($p \leq 0.05$) from 0.93 ± 1.00 %, 1.05 ± 1.02 %, 0.32 ± 0.35 % and 0.74 ± 0.75 % for male's para athletes, females' para athletes, male's para swimmers and female's para swimmers respectively.

Stability rate

All sports and sexes combined for NDA and NDS, the stability rate was significantly lower in 2020 with 38.18 % as compared to 55.76 % in 2019. Between 2020 and 2019, the stability rates of non-disabled significantly decreased of 16.06 % among males (Table 3) and 19.09 % among females. Following the Olympic Games in 2012 and 2016, a less significant decreased was measured in 2013 and 2017 (**Table 3**).

All sports and sexes combined for PA and PS, the stability rate was significantly lower in 2020 with 38.90 % as compared to 59.95 % in 2019. Between 2020 and 2019, the stability rates significantly decreased of 18.50 % among Para males (Table 3) and 25.97% among Para females. Following the Paralympic Games in 2012 and 2016, a less significant decrease was measured in 2013 and 2017 (Table 3).

Number of competitions

In 2020, a significant decrease in the number of organized competitions was observed (Figure 3). For Para athletes and Para swimmers, the number of competitions dropped significantly after a year of increases in 2019.

%			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Non-disabled	Male	All	/	52.12	47.27	47.58	49.39	51.82	52.73	43.64*	53.03*	56.06	40.00*
		T&F	/	45.79	45.26	47.89	43.16	47.89	46.32	37.89	48.42*	53.68*	34.21*
		Swimming	/	60.71	50.00*	47.14	57.86*	57.14	61.43	51.43	59.29	59.29	47.86*
	Female	All	/	49.09	57.27*	47.88*	51.21	53.94	55.76	53.94	54.55	55.45	36.36*
		T&F	/	46.84	50.53	45.26	47.89	49.47	52.11	54.74	49.47	54.74	32.11*
		Swimming	/	52.14	66.43*	51.43*	55.71	60.00	60.71	52.86	61.43	56.43	42.14
All		/	50.61	52.27	47.73*	50.30	52.88	54.24	48.79*	53.79*	55.76	38.18*	
Para	Male	All	/	65.69	69.17*	61.01*	63.40	63.28	70.84*	60.35*	58.21	58.04	39.54*
		T&F	/	59.07	64.61*	58.22*	59.46	62.54	67.75*	64.31*	59.09*	59.91	35.21*
		Swimming	/	73.10	74.33	64.17*	68.00	64.17	74.50*	55.67*	57.17	55.83	44.67*
		All		/	68.61	72.57*	64.64*	64.05	64.91	72.67*	62.28*	62.92	63.79
	Female	T&F	/	66.08	71.00	62.97*	59.69	63.29	71.95*	65.37*	63.35	62.62	36.10*
		Swimming	/	71.68	73.51	65.32*	68.62	66.22	73.96*	57.84*	61.08	63.72	39.73*
		All		/	66.84	70.31*	62.16*	63.6	63.8	71.61*	60.89*	59.73	59.95

Table 3 Mean stability rate (%) according to the previous year from 2010 to 2020 of the non-disabled athletes, non-disabled swimmers, para athletes and para swimmers 10-best for male and female all sports combined, all Track & Field (T&F) events combined and all Swimming events combined. * indicates a significant difference in the year's stability rate compared to the previous year ($p \leq 0.05$).

Discussion

In 2020, the level of performances in all Olympic and Paralympic studied events has decreased significantly compared to the previous years. Such declines in performance have not been observed except during both World Wars. The measured recess corresponded to a 6 to 10 years setback. This recession occurred in a context of stagnating male performance in Track and Field, slight increases in female Track & Field and swimming, and an increase among Para athletes and swimmers. In 2020, the number of new athletes in the Top 10 was significantly higher and the number of organized competitions significantly lower as compared to the other years.

Performance trends

In 2020, performances have significantly decreased for NDA, NDS, PA and PS. This trend could be due in part to a lack of training, generating a detraining (Cavarretta et al., 2021; Pla et al., 2021b) and a decrease in performance capacity (Dauty et al., 2020; Pla et al., 2021a; Pyne et al., 2004; Sedeaud et al., 2014), or to travel restrictions with a deficit of competitions.

In Track and Field, among non-disabled athletes, the performance decrease experienced in 2020 is similar to the decrease that followed the second World War (Berthelot et al., 2008; Berthelot, Tafflet, et al., 2010) as shown in Figure 1 for NDA. In the last decade, performances have slightly increased among non-disabled female athletes. The other T&F events have stopped progressing since 1993 (Berthelot et al., 2008; Berthelot, Tafflet, et al., 2010). Over this period, few regulatory or technological developments have emerged. Since 2017, the first carbon shoes have helped to break many records on long distance running events. This reopened the debate on the technological impacts on the running economy and biomechanical gains (Nigg et al., 2020). However, this contribution remains limited for the moment for the global T&F evolution.

Among Para athletes, the hindsight to analyze the performance trends is more limited compared to NDA. In 2020, performances have considerably dropped after a significant progression over the 2014-2019 period. Among Paralympic sprinter amputees (Dyer, 2015), the mean performance of medalists between 1976 and 2012 has increased consistently and confirmed our study results.

In non-disabled swimming, a similar decline happened a few years ago. Indeed, the last equivalent recess occurred in 2010 following the ban of polyurethane swimsuits that contributed to a large sample of records in 2008 and 2009 (Berthelot, Len, et al., 2010). During the following decade, performances progressed again with higher margins for improvement than in T&F. Since the ban of polyurethane swimsuits, the swimmers compete in bodyskins, kneeskins or jammers and use new angled starting blocks that still provide some gains (Berthelot, Len, et al., 2010).

In 2020, the swimming Paralympic performance also declined significantly after a 2014-2019 progression phase. From 1992 to 2012, Paralympic swimming performances have progressed (Burkett et al., 2018), by 0.5% per year for males and female in the 100m freestyle (Fulton et al., 2009), a faster progression than in Olympic swimming.

Our study highlights the 2020 large performance decrease in both para and non-disabled swimming.

Performance levels

For non-disabled T&F performances, the observed drop ranged from 1.2 % for males to 1.88 % for females between 2019 and 2020. This recess corresponds to an equivalent setback of 6 years (i.e. back to the 2014 performances) for both sexes. In swimming, all events combined, a decline of 1.1 % has been observed for both sexes which corresponds to an 8 - 10 years recess.

Para athletes and PS have experienced a much greater decline than NDA and NDS. The performance loss ranged from 8.6 % for females to 9.2 % for males in Para T&F, corresponding to the level reached in 2010 for males and 2014 for females, all events combined. In swimming, with a loss of 7.1 % for females, the performances referred to the 2010 performance level. For males, the decline in performance is superior to the studied period and does not allow the quantification of the setback.

The analysis of performances showed a 4 years periodicity with an increase each Olympic years and a decrease the following year (Berthelot, Tafflet, et al., 2010; Costa et al., 2010; Fulton et al., 2009; Pyne et al., 2004). This tendency shown among Para events reproduces what was already demonstrated among non-disabled disciplines (Berthelot, Tafflet, et al., 2010).

The gap between Paralympic and non-disabled athletes & swimmers

The decline of performances in 2020 was more important for PA and PS compared to NDA and NDS. This difference could be due to a lower density of athletes and a higher variability of performance within and between each classes of impairment (Burkett et al., 2018; Liljedahl et al., 2020; Schipman et al., 2020). Depending on the classification, some events have considerable variability in performance within the 10 years of follow-up and a wider gap to the best performance which could confirmed a higher variability.

Depending on the year, performance levels ranged from 93% to 97% of the best performance among NDA and between 77% and 91% for the PA. These levels of performance underline a potential improvement that could be more important for PA than for non-disabled ones. This observation has been confirmed in amputee sprinting which has seen a greater and faster rate of performance progression (Dyer, 2015).

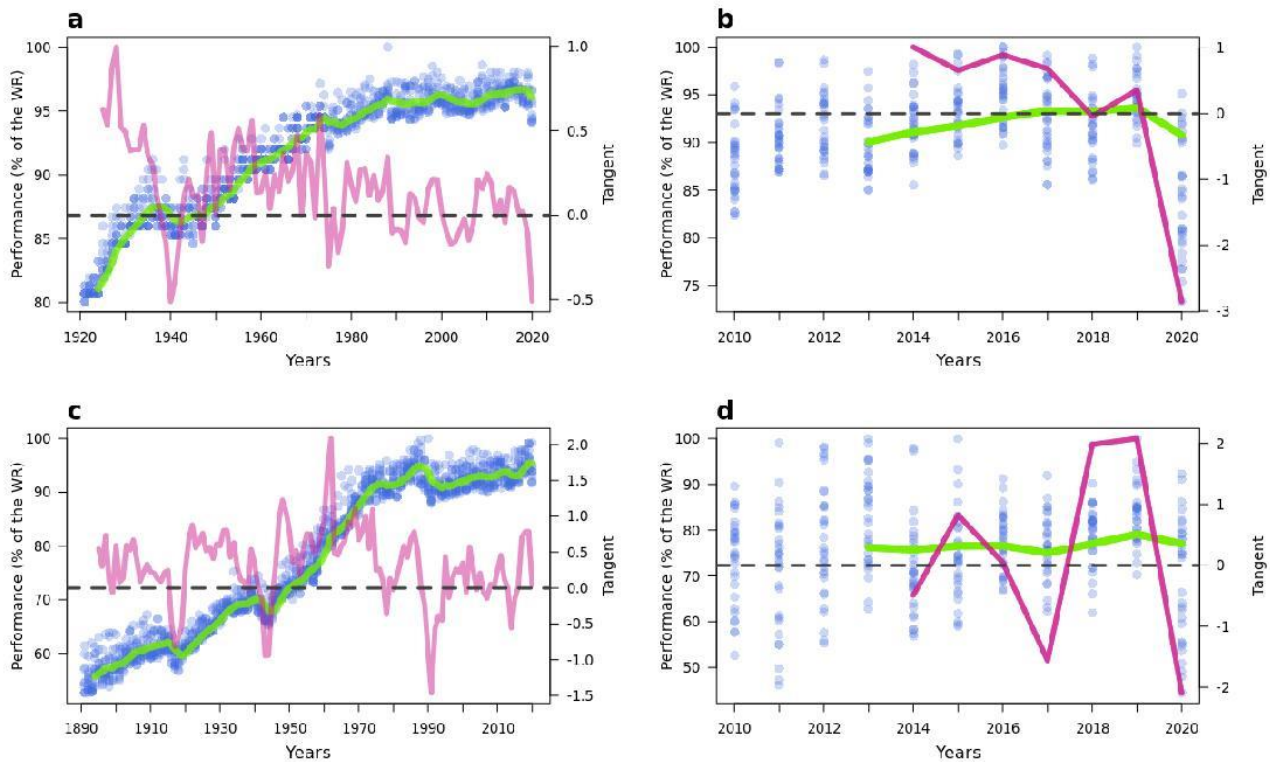


Figure 1. Evolution in % of the WR of the 10-best performers per year in Track and Field in several events (left scale). The green curve represents the moving average of the 10-best performances per year during the 4 previous years. The pink curve represents the slope applied on the moving average (right scale). The graphs on the left refer to: **(a)** the non-disabled female athletes on the 100m race event, **(c)** the non-disabled male athletes in the shotput event. The graphs on the right refer to: **(b)** the visually impaired female para athletes (T11, T12, T13) on the 100m race event, **(d)** the cerebral palsy male para athletes in wheelchair (F31-F32-F33) in the shotput event

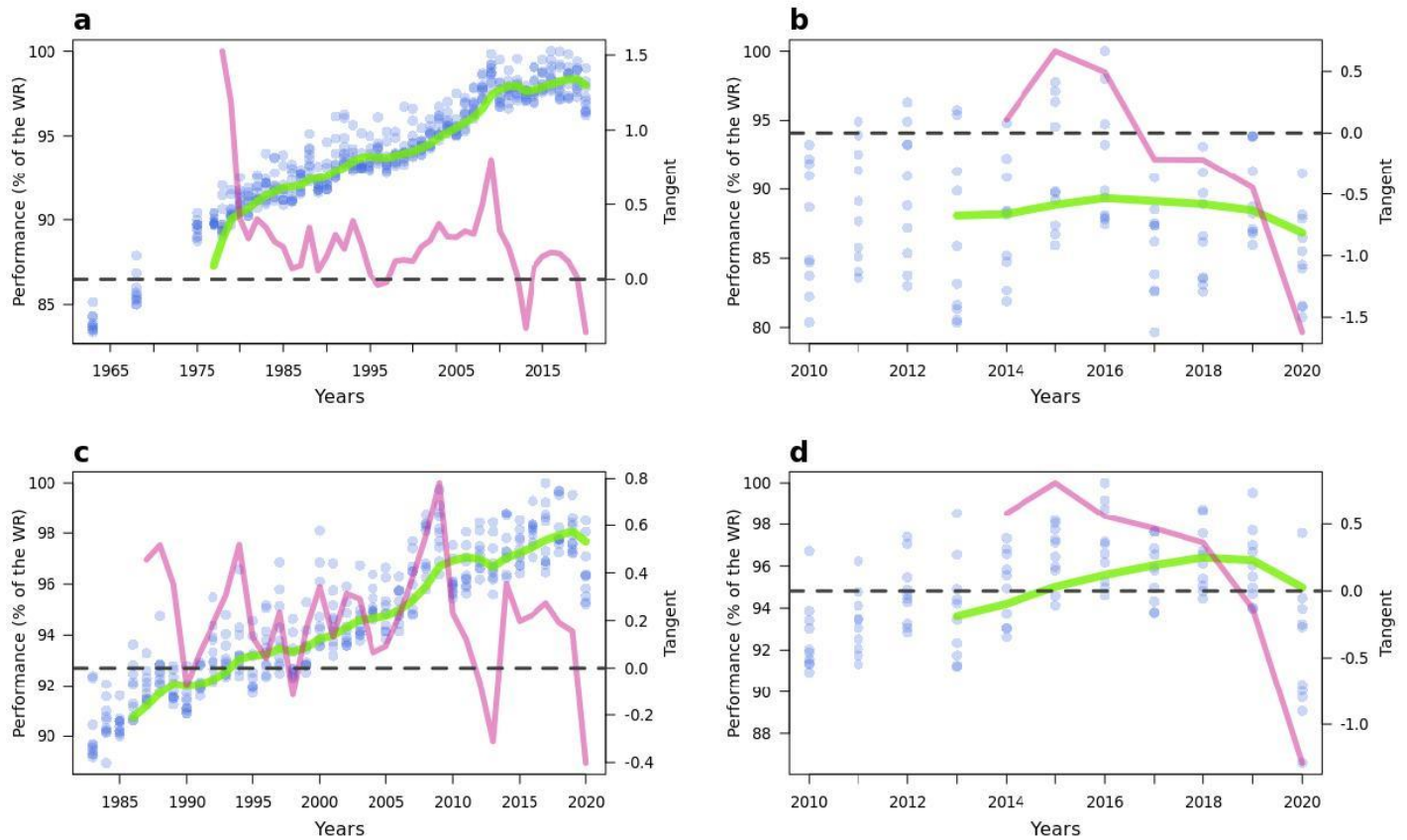


Figure 2. Evolution in % of the WR of the 10-best performers per year in swimming in several events (left scale). The green curve represents the moving average of the 10-best performances per year during the 4 previous years. The pink curve represents the slope applied on the moving average (right scale). The graphs on the left refer to: **(a)** the non-disabled male swimmers on the 100m backstroke race event, **(c)** the non-disabled female swimmers in the 50m freestyle. The graphs on the right refer to: **(b)** the S5-S6 male para swimmers on the 100m backstroke race event, **(d)** the S9-S10 female para swimmers in the 50m freestyle

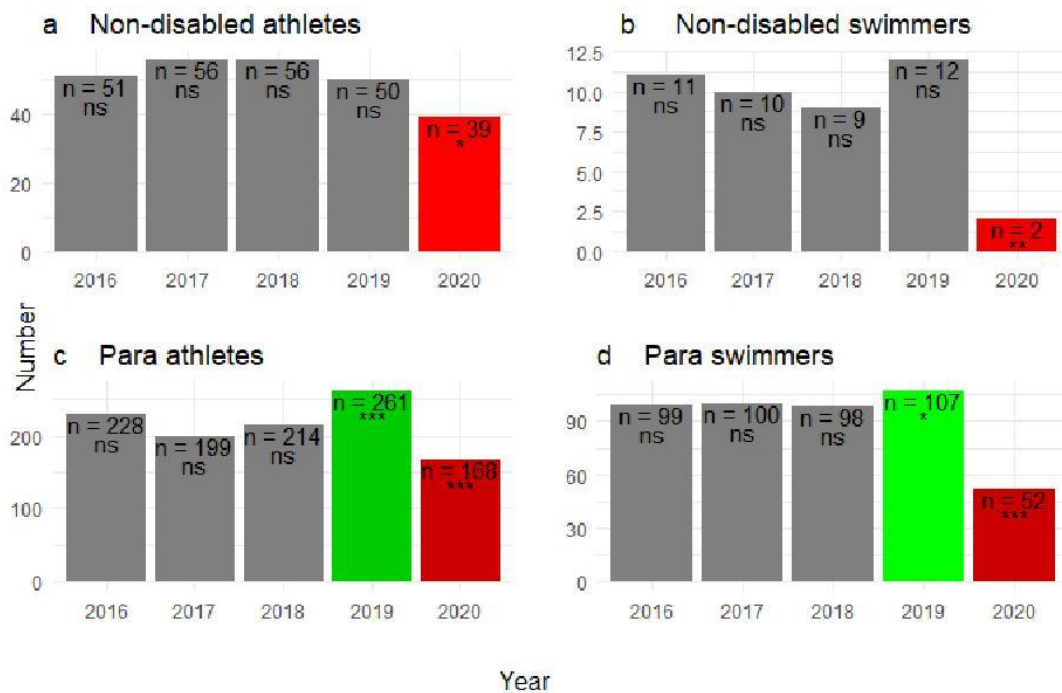


Figure 3. Number of competitions organized by year for non-disabled athletes (a) and non-disabled swimmers (b) (International level) and para athletes (c) and para swimmers (d) (referenced competitions from the IPC rankings results) in Track and Field and swimming from 2016 to 2020. *, **, *** indicate a significant over or under representation

Stability rates and competition number

In 2020, the stability rates of the 10 best athletes are lower than in 2019, suggesting that some of the best athletes may not have competed in 2020, depending on their nation policies. In most cases, Olympic and Paralympic periodicity was well reflected in the stability rate of each Olympic year in 2012 and 2016. The 2020 rates decrease were almost twice lower compared to the stability rate occurred in 2013 and 2017.

This observation is also confirmed in swimming among the top world-ranked swimmers and could be explained by the fact that the training and periodization procedures of swimmers are carefully designed to achieve the peak performance in the most important competitions (Costa et al., 2010). In addition, the 2020 decrease in performance, level and stability may also be due to a lower number of organized competition because the pandemic led to the postponement or cancellation of many competitions and championships (Beneke & Leithäuser, 2021; Gallego et al., 2020). Swimming has been the most impacted discipline with a reduction of 83% and 51% of the non-disabled and Para events respectively.

Still on the edge?

Many studies have focused on the evolution of non-disabled records. The democratization of sport as well as its professionalization explain the progression of the best performances (Berthelot et al., 2008, 2015; Nevill et al., 2007; Nevill & Whyte, 2005; Norton & Olds, 2001). This optimization is also favored by technological advances and innovations dedicated to sport. Also, the geopolitical context plays a determining role in the quest for records (Berthelot et al., 2015; Guillaume et al., 2009) but what will be the priorities in the years to come? Indeed, this pandemic dramatically upset all areas of human life, leading to a profound change that will deeply influence the societies, their economy and most of their components including the elite

sport field. As a result, annual best performances who reflect the limits of the present capacities, may also be impacted.

Limitations

The current study has several limitations. First, applying a mathematical function such as Berthelot et al (Berthelot et al., 2008; Berthelot, Tafflet, et al., 2010) on the Top 10 performance trend considering the stability rate and the number of competitions would allow another vision on the last decade trends. Secondly, the number of competitions analyzed in non-disabled and Paralympic athletes come from different sources. The available competition data on the IPC website are taken from local, national or international meetings. Lastly, measuring the impact of the pandemic situation on the top 10 by nation according to the containment or stringency index would also be relevant (De Larochelambert et al., 2020b; Pla et al., 2021b). Additional work combining monitoring test and training load during the 2020 years may provide a clue on the resilience of the sport field in the present context.

Conclusion

The year 2020 will remain unique in the sport history as it has been for all other human activities. Its impact on the performances of the best international athletes has been considerable. Such declines have not been observed in the last 10 years corresponding to a 6 – 10 years setback. The following years will tell how societies will recover from such a recess.

Acknowledgments

The authors thank the INSEP teams, the French National Sport Agency (ANS), the French disabled sports federation (FFH), and the French Paralympic and Sports Committee (CPSF) for their full support.

Data availability statement

Data may be obtained from a third party and are not publicly available.

Funding details: This work was not funded by any outside sources, including companies, manufacturers, or external agencies.

Disclosure statement: The authors have no conflicts of interest to report. Results of the study are presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation.

References

- Ambroży, T., Rydzik, Ł., Obmiński, Z., Klimek, A. T., Serafin, N., Litwiniuk, A., Czaja, R., & Czarny, W. (2021). The Impact of Reduced Training Activity of Elite Kickboxers on Physical Fitness, Body Build, and Performance during Competitions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8).
<https://doi.org/10.3390/ijerph18084342>
- Beneke, R., & Leithäuser, R. M. (2021). COVID-19: Impact of a “Global Player”-A Reflection 1 Year On. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(3), 323–324. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0029>
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., El Helou, N., Escolano, S., Guillaume, M., Schaal, K., Nassif, H., Desgorces, F. D., & Toussaint, J.-F. (2010). Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Materials Today*, 13(11), 46–51.
[https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70203-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70203-0)
- Berthelot, G., Sedeaud, A., Marck, A., Antero-Jacquemin, J., Schipman, J., Saulière, G., Marc, A., Desgorces, F.-D., & Toussaint, J.-F. (2015). Has Athletic Performance Reached its Peak? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(9), 1263–1271.
<https://doi.org/10.1007/s40279-015-0347-2>
- Berthelot, G., Tafflet, M., El Helou, N., Len, S., Escolano, S., Guillaume, M., Nassif, H., Tolaïni, J., Thibault, V., Desgorces, F. D., Hermine, O., & Toussaint, J.-F. (2010). Athlete atypicality on the edge of human achievement: Performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS One*, 5(1), e8800.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008800>
- Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Escolano, S., El Helou, N., Jouven, X., Hermine, O., & Toussaint, J.-F. (2008). The citius end: World records progression announces the

- completion of a brief ultra-physiological quest. *PloS One*, 3(2), e1552.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001552>
- Burkett, B., Payton, C., Van de Vliet, P., Jarvis, H., Daly, D., Mehrkuehler, C., Kilian, M., & Hogarth, L. (2018). Performance Characteristics of Para Swimmers: How Effective Is the Swimming Classification System? *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 29(2), 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2018.01.011>
- Carmody, S., Murray, A., Borodina, M., Gouttebarga, V., & Massey, A. (2020). When can professional sport recommence safely during the COVID-19 pandemic? Risk assessment and factors to consider. *British Journal of Sports Medicine*, 54(16), 946–948. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102539>
- Cavarretta, E., D'Angeli, I., Giammarinaro, M., Gervasi, S., Fanchini, M., Causarano, A., Costa, V., Manara, M., Terribili, N., Sciarra, L., CalÒ, L., Fossati, C., Peruzzi, M., Versaci, F., Carnevale, R., Biondi-Zoccai, G., & Frati, G. (2021). Cardiovascular effects of COVID-19 lockdown in professional Football players. *Panminerva Medica*. <https://doi.org/10.23736/S0031-0808.21.04340-8>
- Costa, M. J., Marinho, D. A., Reis, V. M., Silva, A. J., Marques, M. C., Bragada, J. A., & Barbosa, T. M. (2010). Tracking the performance of world-ranked swimmers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(3), 411–417.
- Dauty, M., Menu, P., & Fouasson-Chailloux, A. (2020). Effects of the COVID-19 confinement period on physical conditions in young elite soccer players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.11669-4>
- De Laroche Lambert, Q., Marc, A., Antero, J., Le Bourg, E., & Toussaint, J.-F. (2020a). Covid-19 Mortality: A Matter of Vulnerability Among Nations Facing Limited Margins of

- Adaptation. *Frontiers in Public Health*, 8, 604339.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.604339>
- De Laroche Lambert, Q., Marc, A., Antero, J., Le Bourg, E., & Toussaint, J.-F. (2020b). Covid-19 Mortality: A Matter of Vulnerability Among Nations Facing Limited Margins of Adaptation. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.604339>
- de Macedo, T. A., Aguiar, S. da S., Sousa, C. V., Barbosa, L. P., Deus, L. A., Santos, P. A., Maciel, L. A., Nikolaidis, P. T., Knechtle, B., & Simões, H. G. (2020). Performance trends in Paralympic athletes in sprint, middle-distance and endurance events. *Sport Sciences for Health*, 16(3), 485–490. <https://doi.org/10.1007/s11332-020-00630-w>
- Desgorces, F.-D., Berthelot, G., El Helou, N., Thibault, V., Guillaume, M., Tafflet, M., Hermine, O., & Toussaint, J.-F. (2008). From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PloS One*, 3(11), e3653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003653>
- Dyer, B. (2015). The Progression of Male 100 m Sprinting with a Lower-Limb Amputation 1976–2012. *Sports*, 3(1), 30–39. <https://doi.org/10.3390/sports3010030>
- Fikenzer, S., Fikenzer, K., Laufs, U., Falz, R., Pietrek, H., & Hepp, P. (2020). Impact of COVID-19 lockdown on endurance capacity of elite handball players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.11501-9>
- Fulton, S. K., Pyne, D., Hopkins, W., & Burkett, B. (2009). Variability and progression in competitive performance of Paralympic swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 27(5), 535–539. <https://doi.org/10.1080/02640410802641418>
- Gallego, V., Nishiura, H., Sah, R., & Rodriguez-Morales, A. J. (2020). The COVID-19 outbreak and implications for the Tokyo 2020 Summer Olympic Games. *Travel*

- Medicine and Infectious Disease*, 34, 101604.
<https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101604>
- Grobler, L., Ferreira, S., & Terblanche, E. (2015). Paralympic Sprint Performance Between 1992 and 2012. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(8), 1052–1054. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0560>
- Guillaume, M., Helou, N. E., Nassif, H., Berthelot, G., Len, S., Thibault, V., Tafflet, M., Quinquis, L., Desgorces, F., Hermine, O., & Toussaint, J.-F. (2009). Success in developing regions: World records evolution through a geopolitical prism. *PloS One*, 4(10), e7573. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007573>
- Hughes, D., Saw, R., Perera, N. K. P., Mooney, M., Wallett, A., Cooke, J., Coatsworth, N., & Broderick, C. (2020). The Australian Institute of Sport framework for rebooting sport in a COVID-19 environment. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(7), 639–663. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.05.004>
- Jones, B., Phillips, G., Kemp, S., Payne, B., Hart, B., Cross, M., & Stokes, K. A. (2021). SARS-CoV-2 transmission during rugby league matches: Do players become infected after participating with SARS-CoV-2 positive players? *British Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103714>
- Lepers, R., Stapley, P. J., & Knechtle, B. (2014). Analysis of marathon performances of disabled athletes. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 84, 43–50. <https://doi.org/10.1051/sm/2013078>
- Liljedahl, J. B., Bjerkefors, A., Arndt, A., & Nooijen, C. F. J. (2020). Para-cycling race performance in different sport classes. *Disability and Rehabilitation*, 1–5. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1734106>

- Lippi, G., Banfi, G., Favaloro, E. J., Rittweger, J., & Maffulli, N. (2008). Updates on improvement of human athletic performance: Focus on world records in athletics. *British Medical Bulletin*, 87(1), 7–15. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldn029>
- Meyer, T., Mack, D., Donde, K., Harzer, O., Krutsch, W., Rössler, A., Kimpel, J., von Laer, D., & Gärtner, B. C. (2021). Successful return to professional men's football (soccer) competition after the COVID-19 shutdown: A cohort study in the German Bundesliga. *British Journal of Sports Medicine*, 55(1), 62–66. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103150>
- Muriel, X., Courel-Ibáñez, J., Cerezuela-Espejo, V., & Pallarés, J. G. (2020). Training Load and Performance Impairments in Professional Cyclists During COVID-19 Lockdown. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(5), 735–738. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0501>
- Nevill, A. M., & Whyte, G. (2005). Are there limits to running world records? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(10), 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(12), 1012–1017. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965088>
- Nigg, B. M., Cigoja, S., & Nigg, S. R. (2020). Effects of running shoe construction on performance in long distance running. *Footwear Science*, 12(3), 133–138. <https://doi.org/10.1080/19424280.2020.1778799>
- Norton, K., & Olds, T. (2001). Morphological evolution of athletes over the 20th century: Causes and consequences. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(11), 763–783. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131110-00001>

- Pla, R., Bosquet, L., Aubry, A., Toussaint, J.-F., & Sedeaud, A. (2021a). Resting heart rate measurement in elite athletes during COVID-19 lockdown: The impact of decreased physical activity. *Sustainability*.
- Pla, R., Bosquet, L., Aubry, A., Toussaint, J.-F., & Sedeaud, A. (2021b). Resting Heart Rate Measurement in Elite Athletes during COVID-19 Lockdown: The Impact of Decreased Physical Activity. *Sustainability*, 13(5), 2970.
<https://doi.org/10.3390/su13052970>
- Pyne, D., Trewin, C., & Hopkins, W. (2004). Progression and variability of competitive performance of Olympic swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 22(7), 613–620.
<https://doi.org/10.1080/02640410310001655822>
- Schipman, J., Saulière, G., Le Toquin, B., Marc, A., Forstmann, N., Toussaint, J.-F., & Sedeaud, A. (2020). Involvement in Multiple Race Events Among International Para and Non-disabled Swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 608777.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2020.608777>
- Schumacher, Y. O., Tabben, M., Hassoun, K., Al Marwani, A., Al Hussein, I., Coyle, P., Abbassi, A. K., Ballan, H. T., Al-Kuwari, A., Chamari, K., & Bahr, R. (2021). Resuming professional football (soccer) during the COVID-19 pandemic in a country with high infection rates: A prospective cohort study. *British Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103724>
- Sedeaud, A., Marc, A., Schipman, J., Schaal, K., Danial, M., Guillaume, M., Berthelot, G., & Toussaint, J.-F. (2014). Secular trend: Morphology and performance. *Journal of Sports Sciences*. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.889841>
- Shaw, K. A., Bertrand, L., Deprez, D., Ko, J., Zello, G. A., & Chilibeck, P. D. (2021). The impact of the COVID-19 pandemic on diet, fitness, and sedentary behaviour of elite

para-athletes. *Disability and Health Journal*, 101091.

<https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2021.101091>

WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. (n.d.). Retrieved January 27, 2021, from

<https://covid19.who.int>

Données supplémentaires

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Track and Field											
All	-0,06 ± 0,19*	0,02 ± 0,20	0,03 ± 0,18*	-0,01 ± 0,12	-0,06 ± 0,29	0,01 ± 0,22	-0,04 ± 0,23*	0,05 ± 0,31	0,16 ± 0,38*	0,08 ± 0,24*	-0,20 ± 0,24*
Race	0,02 ± 0,13	0,07 ± 0,15*	0,14 ± 0,11*	0,01 ± 0,08	0,01 ± 0,14	0,00 ± 0,18	-0,06 ± 0,13*	-0,03 ± 0,12*	0,01 ± 0,16	0,06 ± 0,17*	-0,24 ± 0,20*
Jump	-0,15 ± 0,04*	0,01 ± 0,11	-0,06 ± 0,15*	0,02 ± 0,20	0,03 ± 0,17	0,10 ± 0,10*	0,05 ± 0,18	0,03 ± 0,11	0,15 ± 0,19	0,07 ± 0,17	-0,27 ± 0,31*
Throw	-0,20 ± 0,29*	-0,22 ± 0,31	-0,24 ± 0,17*	-0,05 ± 0,07*	-0,58 ± 0,42*	-0,22 ± 0,34	-0,12 ± 0,40	0,35 ± 0,56*	0,66 ± 0,64*	0,17 ± 0,35*	-0,01 ± 0,21
Swimming											
All	0,20 ± 0,09*	0,15 ± 0,08*	-0,04 ± 0,10*	-0,21 ± 0,11*	0,14 ± 0,07*	0,10 ± 0,10*	0,08 ± 0,08*	0,11 ± 0,11*	0,07 ± 0,09*	0,10 ± 0,10*	-0,24 ± 0,09*
Freestyle	0,15 ± 0,09*	0,15 ± 0,07*	-0,10 ± 0,06*	-0,19 ± 0,09*	0,15 ± 0,04*	0,04 ± 0,12	0,08 ± 0,06*	0,03 ± 0,03*	0,04 ± 0,07*	0,14 ± 0,07*	-0,21 ± 0,09*
Butterfly	0,21 ± 0,05*	0,07 ± 0,01*	-0,13 ± 0,04*	-0,35 ± 0,03*	0,05 ± 0,05	0,17 ± 0,05*	0,08 ± 0,10	0,29 ± 0,03*	0,19 ± 0,03*	0,05 ± 0,03*	-0,24 ± 0,01*
Backstroke	0,27 ± 0,05*	0,15 ± 0,07*	0,04 ± 0,01*	-0,26 ± 0,07*	0,11 ± 0,03*	0,16 ± 0,01*	0,12 ± 0,06*	0,11 ± 0,07*	0,08 ± 0,04*	0,00 ± 0,02	-0,37 ± 0,02*
Breaststroke	0,24 ± 0,03*	0,27 ± 0,01*	0,13 ± 0,00*	-0,18 ± 0,07*	0,26 ± 0,04*	0,21 ± 0,04*	0,14 ± 0,04*	0,24 ± 0,05*	0,14 ± 0,08*	0,23 ± 0,02*	-0,17 ± 0,06*
Indiv. Medley	0,20 ± 0,09*	0,14 ± 0,08*	0,02 ± 0,03	-0,08 ± 0,06*	0,14 ± 0,03*	0,07 ± 0,04*	0,00 ± 0,05	0,06 ± 0,04*	0,00 ± 0,07	-0,01 ± 0,01*	-0,26 ± 0,06*
Non-disabled											
Track and Field											
All	-0,01 ± 0,22	0,03 ± 0,20	0,06 ± 0,29*	0,03 ± 0,19	-0,13 ± 0,29*	0,01 ± 0,25	0,00 ± 0,27	0,06 ± 0,23*	0,26 ± 0,27*	0,16 ± 0,17*	-0,45 ± 0,25*
Race	-0,07 ± 0,18*	0,07 ± 0,12*	0,02 ± 0,27	0,01 ± 0,16	0,00 ± 0,13	0,07 ± 0,16*	0,07 ± 0,20*	0,14 ± 0,21*	0,2 ± 0,18*	0,17 ± 0,19*	-0,38 ± 0,27*
Jump	0,01 ± 0,11*	-0,14 ± 0,14	-0,12 ± 0,25*	-0,01 ± 0,13	-0,15 ± 0,01*	-0,03 ± 0,12	0,06 ± 0,28	-0,09 ± 0,11*	0,2 ± 0,33*	0,18 ± 0,16*	-0,51 ± 0,14*
Throw	0,15 ± 0,31*	0,07 ± 0,31*	0,34 ± 0,11*	0,13 ± 0,26*	-0,49 ± 0,44*	-0,10 ± 0,45	-0,23 ± 0,30*	0,00 ± 0,26	0,51 ± 0,28*	0,13 ± 0,07*	-0,59 ± 0,19*
Swimming											
All	0,23 ± 0,13*	0,21 ± 0,12*	0,06 ± 0,07*	-0,11 ± 0,17*	0,15 ± 0,12*	0,12 ± 0,10*	0,10 ± 0,09*	0,09 ± 0,13*	0,11 ± 0,12*	0,08 ± 0,10*	-0,27 ± 0,17*
Freestyle	0,14 ± 0,07*	0,11 ± 0,04*	0,00 ± 0,04	-0,07 ± 0,17*	0,24 ± 0,07*	0,16 ± 0,05*	0,15 ± 0,07*	0,09 ± 0,16*	0,12 ± 0,08*	0,12 ± 0,06*	-0,24 ± 0,22*
Butterfly	0,17 ± 0,01*	0,26 ± 0,01*	0,13 ± 0,06*	-0,29 ± 0,01*	0,11 ± 0,04*	-0,03 ± 0,06	0,08 ± 0,13	0,09 ± 0,13	0,04 ± 0,08	0,01 ± 0,16	-0,29 ± 0,01*
Backstroke	0,47 ± 0,05*	0,39 ± 0,02*	0,05 ± 0,00*	-0,10 ± 0,02*	-0,06 ± 0,06	0,05 ± 0,07	0,04 ± 0,04*	0,18 ± 0,04*	0,29 ± 0,00*	0,17 ± 0,00*	-0,22 ± 0,09*
Breaststroke	0,22 ± 0,02*	0,17 ± 0,06*	0,12 ± 0,04*	-0,20 ± 0,06*	0,15 ± 0,07*	0,23 ± 0,10*	0,10 ± 0,03*	0,10 ± 0,04*	0,07 ± 0,06	0,03 ± 0,00*	-0,28 ± 0,01*
Indiv. Medley	0,34 ± 0,06*	0,32 ± 0,07*	0,09 ± 0,02*	0,02 ± 0,23	0,14 ± 0,04*	0,08 ± 0,01*	0,05 ± 0,08	-0,01 ± 0,07	-0,03 ± 0,08	0,02 ± 0,08	-0,37 ± 0,19*
Female											

Supplementary files. Mean ± Standard Deviation (%) of the slopes of the moving average per year for non-disabled athletes in Track and Field by race, jump and throw events combined and non-disabled swimmers in Swimming by stroke styles all distances combined.

* Indicates a mean ± SD significantly different from the value 0 ($p \leq 0.05$).

Données supplémentaires

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Track and Field							
All	0,51 ± 1,03*	0,85 ± 1,08*	0,86 ± 1,42*	0,87 ± 1,19*	0,80 ± 0,96*	0,74 ± 0,82*	-1,81 ± 1,25*
Race	0,40 ± 0,86*	0,56 ± 0,91*	0,38 ± 0,87*	0,58 ± 0,65*	0,28 ± 0,32*	0,33 ± 0,33*	-1,20 ± 0,79*
Jump	0,74 ± 0,58*	1,31 ± 0,47*	1,46 ± 0,63*	1,16 ± 0,62*	0,81 ± 0,99*	0,47 ± 0,62*	-2,20 ± 0,70*
Throw	0,61 ± 1,33*	1,13 ± 1,32*	1,37 ± 1,95*	1,18 ± 1,73*	1,58 ± 1,06*	1,48 ± 0,9*	-2,56 ± 1,47*
Swimming							
All	0,30 ± 0,37*	0,48 ± 0,41*	0,61 ± 0,80*	0,22 ± 0,63*	0,20 ± 0,50*	0,31 ± 0,58*	-1,59 ± 0,88*
Freestyle	0,23 ± 0,35*	0,40 ± 0,45*	0,56 ± 0,88*	0,21 ± 0,51*	0,32 ± 0,35*	0,34 ± 0,28*	-1,44 ± 0,93*
Butterfly	0,34 ± 0,33*	0,37 ± 0,37*	0,28 ± 0,37*	0,18 ± 0,45*	0,23 ± 0,52*	0,52 ± 0,49*	-1,18 ± 0,83*
Backstroke	0,33 ± 0,35*	0,60 ± 0,35*	1,10 ± 1,05*	0,58 ± 0,96*	0,17 ± 0,47*	0,55 ± 0,55*	-1,86 ± 0,54*
Breaststroke	0,42 ± 0,36*	0,56 ± 0,26*	0,55 ± 0,32*	0,00 ± 0,32	0,03 ± 0,58	0,06 ± 0,79	-1,71 ± 1,11*
Indiv. Medley	0,22 ± 0,44*	0,52 ± 0,48*	0,34 ± 0,45*	0,02 ± 0,46	0,08 ± 0,64	-0,03 ± 0,74*	-1,84 ± 0,60*
Para							
Track and Field							
All	0,58 ± 1,52*	0,78 ± 1,52*	1,08 ± 1,11*	0,93 ± 1,30*	1,00 ± 1,13*	1,05 ± 1,12*	-1,69 ± 1,31*
Race	0,87 ± 1,21*	0,70 ± 1,01*	0,94 ± 0,69*	0,80 ± 0,66*	0,61 ± 0,43*	0,47 ± 0,37*	-1,62 ± 0,80*
Jump	0,34 ± 1,47	1,22 ± 0,64*	1,09 ± 0,82*	0,36 ± 1,33	0,98 ± 0,93*	0,94 ± 0,77*	-1,25 ± 1,55*
Throw	0,16 ± 1,86	0,76 ± 2,20*	1,29 ± 1,57*	1,34 ± 1,86*	1,64 ± 1,59*	2,03 ± 1,35*	-2,02 ± 1,81*
Swimming							
All	0,67 ± 0,71*	0,88 ± 0,77*	1,02 ± 1,32*	0,55 ± 1,01*	0,48 ± 0,61*	0,47 ± 0,72*	-1,68 ± 0,94*
Freestyle	0,71 ± 0,91*	0,84 ± 0,86*	0,93 ± 1,28*	0,56 ± 0,88*	0,52 ± 0,66*	0,46 ± 0,91*	-1,66 ± 1,04*
Butterfly	0,64 ± 0,35*	0,88 ± 0,71*	0,74 ± 0,88*	0,58 ± 1,10*	0,44 ± 0,69*	0,54 ± 0,37*	-1,59 ± 1,12*
Backstroke	0,60 ± 0,73*	1,00 ± 0,63*	1,42 ± 1,09*	0,65 ± 0,82*	0,33 ± 0,67*	0,17 ± 0,74*	-1,63 ± 0,93*
Breaststroke	0,77 ± 0,57*	0,92 ± 0,91*	0,81 ± 1,55*	0,62 ± 1,53*	0,66 ± 0,47*	0,64 ± 0,48*	-1,53 ± 0,91*
Indiv. Medley	0,55 ± 0,43*	0,74 ± 0,49*	1,14 ± 1,58*	0,32 ± 0,63*	0,44 ± 0,36*	0,64 ± 0,50*	-1,99 ± 0,44*

Supplementary files. Mean ± Standard Deviation (%) of the slopes of the moving average per year for Para athletes in Track and Field by race, jump and throw events combined and Para swimmers in Swimming by stroke styles all distances combined.

* Indicates a mean ± SD significantly different from the value 0 (p ≤ 0.05).

Données supplémentaires

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Track and Field											
All	95.44 ± 2.67*	95.67 ± 2.68*	95.74 ± 2.84*	95.46 ± 2.86*	95.19 ± 3.31	95.69 ± 2.65*	95.58 ± 2.62*	95.64 ± 2.40*	95.83 ± 2.47*	96.03 ± 2.60*	94.79 ± 2.76
Race	97.14 ± 0.83*	97.32 ± 0.85*	97.54 ± 0.86*	97.21 ± 0.75*	97.18 ± 0.89*	97.31 ± 0.86*	97.28 ± 0.64*	97.08 ± 0.68*	97.24 ± 0.92*	97.54 ± 0.73*	96.34 ± 1.19
Jump	94.46 ± 1.37	94.94 ± 1.48	94.80 ± 1.64	94.97 ± 1.61	94.69 ± 1.66	95.32 ± 1.60*	95.0 ± 1.55	94.92 ± 1.49	95.48 ± 1.30*	95.27 ± 1.60*	94.01 ± 1.50
Throw	91.75 ± 2.78	91.85 ± 2.74	91.75 ± 2.81	91.16 ± 2.78	90.20 ± 3.36	91.59 ± 2.13	91.5 ± 2.06	92.43 ± 2.72	92.29 ± 2.62	92.63 ± 3.11	91.33 ± 3.30
Swimming											
All	96.59 ± 1.05*	96.88 ± 1.10*	97.20 ± 1.11	97.11 ± 0.93*	97.16 ± 0.96*	97.3 ± 0.89*	97.53 ± 1.03*	97.55 ± 0.91*	97.46 ± 0.90*	97.7 ± 0.98*	96.56 ± 1.05
Freestyle	96.71 ± 0.93	97.10 ± 1.04	97.23 ± 1.14	97.39 ± 0.75*	97.32 ± 0.81*	97.28 ± 0.86*	97.54 ± 0.99*	97.48 ± 0.88*	97.47 ± 0.77*	97.87 ± 0.87*	96.67 ± 0.97
Butterfly	95.98 ± 0.67	96.31 ± 0.63	96.56 ± 0.72	96.11 ± 0.36	96.17 ± 0.37	96.99 ± 0.57*	96.88 ± 0.70*	97.25 ± 0.60*	96.92 ± 0.62*	97.18 ± 1.08*	95.92 ± 0.79
Backstroke	97.07 ± 0.98	97.09 ± 1.15	97.49 ± 0.93	97.29 ± 0.60	97.50 ± 0.85	97.72 ± 0.93	97.98 ± 0.98	97.71 ± 0.95	97.82 ± 0.98*	97.70 ± 0.95	96.50 ± 1.18
Breaststroke	96.05 ± 1.36	96.39 ± 1.31	97.13 ± 1.39	96.76 ± 1.46	97.08 ± 1.46	97.22 ± 1.21	97.7 ± 1.33	97.70 ± 1.30	97.65 ± 1.31	98.12 ± 1.24	97.01 ± 1.28
Indiv. Medley	96.87 ± 1.03	97.09 ± 1.12	97.56 ± 1.01	97.48 ± 0.63*	97.42 ± 0.64*	97.36 ± 0.79	97.55 ± 0.90*	97.73 ± 0.71*	97.40 ± 0.68*	97.32 ± 0.63	96.49 ± 0.86
Track and Field											
All	93.87 ± 3.26	94.07 ± 3.53*	94.66 ± 2.97*	94.17 ± 3.29*	93.33 ± 3.86	94.11 ± 3.55*	94.66 ± 3.34*	94.43 ± 3.57*	94.38 ± 3.52*	94.75 ± 3.60*	92.87 ± 3.75
Race	95.51 ± 1.36	95.81 ± 1.33*	96.23 ± 1.05*	95.92 ± 1.25*	95.51 ± 1.31	96.08 ± 1.31*	96.49 ± 1.28*	96.49 ± 1.14*	96.29 ± 1.38*	96.74 ± 1.20*	94.98 ± 1.54
Jump	94.20 ± 1.96	94.37 ± 1.71	94.67 ± 1.44*	94.36 ± 1.59*	93.61 ± 1.68	94.23 ± 1.49	94.90 ± 1.56*	94.00 ± 1.79	94.40 ± 1.82	94.94 ± 2.00*	92.88 ± 1.93
Throw	89.03 ± 3.29	88.98 ± 4.14	90.32 ± 3.37*	89.20 ± 3.42	87.07 ± 3.29	88.58 ± 3.41	89.40 ± 3.04	89.21 ± 3.86	89.12 ± 3.57	89.08 ± 3.26	87.04 ± 3.21
Swimming											
All	96.36 ± 0.73	96.70 ± 0.75*	97.01 ± 1.02*	97.06 ± 0.91*	96.97 ± 0.90*	97.16 ± 0.93*	97.43 ± 1.09*	97.42 ± 1.03*	97.40 ± 0.96*	97.49 ± 0.98*	96.36 ± 1.09
Freestyle	96.10 ± 0.74	96.52 ± 0.75	96.7 ± 1.10	97.00 ± 0.79*	97.06 ± 0.96*	97.16 ± 0.98*	97.30 ± 1.36*	97.37 ± 1.12*	97.55 ± 1.11*	97.62 ± 0.92*	96.35 ± 1.10
Butterfly	96.15 ± 0.50	96.84 ± 0.64	97.02 ± 0.79	96.67 ± 0.84	96.60 ± 0.79	96.71 ± 0.82	97.34 ± 0.97*	97.02 ± 1.04	96.77 ± 1.02	96.77 ± 1.06	96.18 ± 1.17
Backstroke	96.68 ± 0.47	96.95 ± 0.62	97.32 ± 0.91	97.01 ± 0.85	96.45 ± 0.62	97.13 ± 0.79	97.50 ± 0.54	97.71 ± 0.56*	97.62 ± 0.61	97.83 ± 1.00	96.60 ± 1.14
Breaststroke	96.59 ± 0.95	96.57 ± 0.94	97.23 ± 1.07	97.36 ± 1.35	97.19 ± 0.94	97.49 ± 0.90	97.62 ± 0.78*	97.74 ± 1.14*	97.47 ± 0.68*	97.60 ± 0.89*	96.49 ± 0.79
Indiv. Medley	96.79 ± 0.47	96.99 ± 0.62	97.42 ± 0.84	97.43 ± 0.64	97.37 ± 0.72	97.33 ± 0.95	97.64 ± 0.98	97.39 ± 0.87	97.25 ± 0.62	97.39 ± 0.87	96.18 ± 1.24

Supplementary files. Mean ± Standard Deviation (%) of the performance (in % of the WR by event) per year for non-disabled athletes in Track and Field by race, jump and throw events combined and non-disabled swimmers in Swimming by stroke styles all distances combined.

* Indicates a mean ± standard deviation significantly different from the performances in 2020 ($p \leq 0.05$).

Non-disabled

Données supplémentaires

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Track and Field											
All	83.01 ± 11.64	84.43 ± 11.26*	85.61 ± 11.26*	84.50 ± 10.93*	84.90 ± 10.29*	87.56 ± 9.32*	88.75 ± 8.33*	88.01 ± 8.92*	88.10 ± 8.46*	90.53 ± 7.23*	81.35 ± 12.24
Race	90.04 ± 6.35*	90.83 ± 6.01*	91.85 ± 6.03*	90.71 ± 5.84*	91.13 ± 4.80*	92.86 ± 4.46*	93.16 ± 4.38*	93.02 ± 4.42*	92.06 ± 5.55*	94.03 ± 4.35*	88.49 ± 6.45
Jump	80.25 ± 8.41	82.27 ± 8.08	83.13 ± 8.16*	82.49 ± 7.22	83.54 ± 7.77*	87.36 ± 6.65*	88.85 ± 6.44*	87.19 ± 6.42*	87.42 ± 7.09*	89.53 ± 5.58*	78.96 ± 8.67
Throw	73.27 ± 11.47	75.30 ± 12.02*	76.70 ± 12.26*	76.13 ± 11.91*	75.98 ± 10.49*	79.67 ± 9.96*	82.04 ± 9.02*	80.85 ± 9.72	82.29 ± 9.21*	85.52 ± 8.28*	71.56 ± 12.76
Swimming											
All	87.10 ± 7.68*	88.19 ± 7.27*	89.22 ± 8.33*	86.91 ± 9.10*	87.86 ± 8.18*	89.68 ± 6.82*	91.16 ± 6.74*	87.59 ± 8.38*	88.72 ± 8.70*	91.09 ± 7.10*	84.96 ± 9.54
Freestyle	88.02 ± 7.19	89.01 ± 6.77*	89.55 ± 8.44*	87.70 ± 8.54	88.93 ± 7.53*	90.62 ± 5.57*	91.81 ± 5.50*	88.54 ± 7.40*	90.20 ± 7.10*	91.97 ± 5.97*	85.96 ± 9.61
Butterfly	88.80 ± 6.79	89.26 ± 6.44	90.72 ± 6.08*	88.66 ± 7.74	89.90 ± 5.81	90.75 ± 5.14*	91.86 ± 5.43*	89.38 ± 6.77	90.82 ± 5.44*	92.83 ± 4.01*	87.05 ± 7.53
Backstroke	84.78 ± 9.96	85.61 ± 9.89*	86.19 ± 11.72*	84.02 ± 11.25	84.17 ± 10.75	86.30 ± 10.00*	88.60 ± 9.96*	85.60 ± 8.82	85.09 ± 11.11*	89.15 ± 8.50*	81.91 ± 10.93
Breaststroke	85.39 ± 6.56	87.01 ± 6.11	88.68 ± 6.14*	85.82 ± 8.77	87.07 ± 7.52	89.25 ± 5.41*	90.88 ± 5.29*	85.82 ± 10.78	87.20 ± 9.57	89.49 ± 8.71*	83.89 ± 9.90
Indiv. Medley	88.48 ± 6.11	89.84 ± 5.14*	91.76 ± 4.40*	88.48 ± 7.70	89.71 ± 5.79*	91.91 ± 4.50*	93.11 ± 4.76*	88.55 ± 7.40	90.05 ± 8.11*	91.81 ± 7.00*	85.94 ± 7.29
Para	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Track and Field											
All	77.29 ± 14.21	79.33 ± 14.27	81.07 ± 13.26*	78.75 ± 14.49	79.43 ± 14.75	82.45 ± 13.7*	84.94 ± 12.53*	82.58 ± 13.13*	83.25 ± 12.36*	86.66 ± 11.13*	78.02 ± 14.62
Race	85.09 ± 8.14	88.38 ± 5.63*	88.97 ± 5.75*	87.20 ± 6.22	88.11 ± 6.64*	90.76 ± 6.61*	92.43 ± 5.20*	90.62 ± 6.37*	90.69 ± 5.44*	92.73 ± 5.30*	85.92 ± 7.83
Jump	74.62 ± 11.20	75.90 ± 9.42	79.07 ± 8.18	76.54 ± 10.08	76.89 ± 9.53	80.72 ± 8.44	83.33 ± 8.01*	78.21 ± 9.00	80.89 ± 7.58	84.51 ± 6.92*	77.56 ± 9.30
Throw	64.42 ± 13.73	66.28 ± 14.68	68.87 ± 14.22*	65.50 ± 15.53	65.14 ± 15.14	69.33 ± 13.43*	73.17 ± 13.04*	70.87 ± 13.17*	71.92 ± 12.99*	77.41 ± 12.72*	63.49 ± 14.96
Swimming											
All	83.64 ± 9.46	84.97 ± 8.56*	86.03 ± 9.75*	84.78 ± 9.17*	86.30 ± 7.48*	88.23 ± 7.00*	89.98 ± 6.53*	87.01 ± 8.03*	88.31 ± 8.14*	90.19 ± 7.09*	83.11 ± 9.68
Freestyle	85.56 ± 9.83	87.02 ± 8.48	88.37 ± 9.11*	87.23 ± 8.40	88.42 ± 7.21*	90.33 ± 6.27*	92.04 ± 5.40*	89.48 ± 6.58*	90.52 ± 7.65*	92.18 ± 6.47*	85.22 ± 10.02
Butterfly	84.30 ± 6.84	85.21 ± 7.34	87.28 ± 6.49	85.72 ± 6.68	86.93 ± 5.63	88.67 ± 4.11*	90.26 ± 4.43*	88.02 ± 5.51	88.70 ± 5.63*	90.88 ± 4.32*	83.38 ± 9.86
Backstroke	81.30 ± 10.16	82.08 ± 9.63	81.94 ± 11.62	81.22 ± 10.98	83.63 ± 8.34	85.56 ± 8.58*	87.30 ± 8.36*	83.90 ± 9.33	85.10 ± 10.10*	86.52 ± 9.42*	80.81 ± 9.36
Breaststroke	81.27 ± 8.58	82.77 ± 8.06	84.51 ± 8.66*	83.01 ± 8.72	84.33 ± 7.21	86.41 ± 5.76*	87.69 ± 6.79*	85.40 ± 6.93*	86.98 ± 6.41*	88.97 ± 5.81*	81.06 ± 9.54
Indiv. Medley	84.63 ± 9.12	86.47 ± 7.05*	86.85 ± 10.01*	85.35 ± 8.68	86.96 ± 6.91*	88.95 ± 7.55*	91.42 ± 4.88*	86.62 ± 9.99*	88.73 ± 8.33*	91.52 ± 5.58*	83.05 ± 8.34

Supplementary files. Mean ± Standard Deviation (%) of the performance (in % of the WR by event) per year for Para athletes in Track and Field by race, jump and throw events combined and Para swimmers in Swimming by stroke styles all distances combined.

*Indicates a mean ± standard deviation significantly different from the performances in 2020 ($p \leq 0.05$).

Liens entre l'étude 1 et 2, 3, 4

Cette étude a permis de définir le contexte global de l'évolution des performances et d'analyser selon différentes échelles de temps, des progressions, stagnations ou régressions. Ces variations de performances sont le résultat de l'évolution simultanée de nombreux facteurs. Les études 2, 3 et 4 se sont successivement intéressées à l'analyse de différents paramètres de la performance chez les sportives et sportifs Paralympiques.

5.2. Etude 2

Résumé

L'âge est un déterminant majeur de la performance chez les athlètes valides. Selon les disciplines sportives et les épreuves concernées, le potentiel de performance d'un athlète augmente jusqu'à atteindre un pic compris entre 20 et 30 ans pour ensuite décliner lentement. L'objectif est d'étudier l'effet de l'âge sur les performances maximales des para athlètes.

La nature de cette relation a été analysée sur 53 554 données de résultats en compétition labellisées CIP (Comité International Paralympique) chez des athlètes catégorisés par type de handicap et évoluant debout et en fauteuil. La fonction de Moore a été utilisée pour modéliser la nature de la relation âge-performance.

L'étude 2 montre que les para athlètes présentent des trajectoires (performances maximales selon l'âge) similaires aux athlètes valides. L'âge de la performance maximale varie selon le sexe, le type de handicap et l'épreuve ; il augmente progressivement en fonction de la distance courue.

Les meilleures performances du Top 100 par épreuve comprennent des écarts d'âge importants, suggérant que les performances n'ont probablement pas encore été complètement optimisées dans la plupart des épreuves. L'âge d'acquisition des divers types des handicaps, inhérents à la pratique d'un sport Paralympique, pourrait-être un facteur limitant de cette optimisation.



Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances

Julien Schipman^{1*}, Pasquale Gallo^{1,2}, Andy Marc¹, Juliana Antero¹, Jean-François Toussaint^{1,3}, Adrien Sedeaud¹ and Adrien Marck^{1,4,5}

¹ Institut de Recherche Bio-Médicale et d'Épidémiologie du Sport, EA 7329, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance, Université Paris Descartes, Université Sorbonne Paris Cité, Paris, France, ² Institut de Formation en Masso-Kinésithérapie Valentin Haüy, Paris, France, ³ Centre d'Investigations en Médecine du Sport, Hôtel-Dieu, Assistance Publique – Hôpitaux de Paris, Paris, France, ⁴ Programme Interdisciplinaire de Recherche la Dynamique du Vieillir, Université Sorbonne Paris Cité, Paris, France, ⁵ Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, UMR 7057 CNRS, Université Paris Diderot, Université Sorbonne Paris Cité, Paris, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Matthew J. Barnes,
Massey University, New Zealand

Reviewed by:

Mike James Price,
Coventry University, United Kingdom
Maha Sellami,
Qatar University, Qatar

*Correspondence:

Julien Schipman
julien.schipman@insep.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Exercise Physiology,
a section of the journal
Frontiers in Physiology

Received: 11 October 2018

Accepted: 25 February 2019

Published: 19 March 2019

Citation:

Schipman J, Gallo P, Marc A, Antero J, Toussaint J-F, Sedeaud A and Marck A (2019) Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances. *Front. Physiol.* 10:256. doi: 10.3389/fphys.2019.00256

During the last decades, all para-athletes with disabilities have significantly increased their performance level due to technological progress and human investment, through better training or recovery protocols, medical care and nutritional monitoring. Among these elements, the athlete's age is one of the determining factors in performance. The aim of this study was to investigate the effect of age on maximal performances for para-athletes and wheelchair racing athletes, scaled on able-bodied records. We collected 53,554 results including athlete's best performance of the year, event, age and disability classification from the International Paralympic Committee competitions between 2009 and 2017 for both female and male para-athletics and wheelchair racing disciplines for a total of 472 sport events in Track and Field (considering each impairment type for each event) and gathered the all-time able-bodied records from the International Association of Athletics Federations (IAAF) at the end of 2017. Maximal performance by age was fitted with the Moore function for each para-athletics and wheelchair racing event. This study finds a similar age-related pattern in maximal performance among para-athletes and wheelchair racing athletes. The age at peak performance varies according to sex, impairment type and event and increases gradually from sprint to endurance events. The best Top 100 performances include a large age range suggesting that performance has probably not been optimized yet for most elite para-athletes and wheelchair racers. The next Paralympic Games of Tokyo 2020 and Paris 2024 will certainly offer exceptional performance.

Keywords: peak age, impairment and disability, track and field, paralympic games, classification

INTRODUCTION

There are a number of unanswered questions relating to the components of performance in Paralympic sport. For example, how age affects para-athletic performance for different types of impairment? Is there an age difference at peak performance between para-athletes and able-bodied athletes? At the age of 19 after his gold medal, the blade runner Jonnie Peacock said at the

Paralympic Games of London in 2012.” I lost my leg aged at 5... Now I’m 1.9 s behind Usain Bolt.” This comment questions the physical capacities of the para-athletes and the technological contribution of prostheses on the evolution of performance (Jones and Wilson, 2009; Weyand et al., 2009; Willick and Lexell, 2014; Dyer, 2015a; Baker, 2016). Since the first 1960 Paralympic Games, an increasing number of athletes with physical, visual or intellectual impairments have participated to elite para-athletic competitions (Dyer, 2015b; Fagher et al., 2016). Scientific and technological progress, such as prosthetic equipment, contributed to para-athletic promotion and the improvement of their performances (Lepers et al., 2012; Dyer, 2015b; Grobler et al., 2015). Indeed, beyond the impairment type, para-athletic performance is a complex process including both intrinsic parameters such as genetics, morphology (height and mass) or age and extrinsic factors such as environmental conditions (temperature, humidity, pollution), training methods, nutrition or technology (Berthelot et al., 2015; Blauwet et al., 2016).

In this framework, age is a major determinant of the performance in able-bodied athletes. Previous studies investigated the effect of age for different maximal physical performances (Moore, 1975; Baker and Tang, 2010; Guillaume et al., 2011; Berthelot et al., 2012; Allen and Hopkins, 2015; Marck et al., 2017b; Lepers et al., 2018; Marc et al., 2018) and showed a similar age-related pattern for maximal physical performances in Track and Field, swimming disciplines, or in tennis performance for high level athletes (Guillaume et al., 2011; Berthelot et al., 2012; Marck et al., 2017b). Maximal performance gradually increases with age until it reached a peak around 25–30 years according to the type of sport event. Then, it exponentially declines due to the aging process (Marck et al., 2017b). All the physiological systems involved in locomotion are intimately linked in the process of development and aging. During childhood and adolescence, there is an increase in muscle mass and strength. After maturity, skeletal muscle aging is characterized by a progressive loss of muscle mass. It is estimated that muscle mass losses are in the range of 0.02 to 3.3% per year (Mitchell et al., 2012; McGregor et al., 2014). These alterations of muscle with age remain intimately related to the degradation of the other systems with which it constantly interacts (Mitchell et al., 2012). This loss of mass can vary greatly from one muscle to another and the muscle mass loss in the legs may be higher compared to the arms (Lepers et al., 2012; Mitchell et al., 2012). This could impact the slope of performance decline that illustrates athlete’s impairment.

In para-athletics, no study has reported age related performance determinants. They only focused on technology (Weyand et al., 2009; Cooper and De Luigi, 2014), biomechanical analyses (Frossard, 2012; Beck et al., 2016), or incidence of injuries (Gawronski et al., 2013; McNamee et al., 2014; Fagher et al., 2016). Furthermore, the performance gap between able-bodied athletes and para-athletes, though well perceived in the daily life, has not been precisely quantified in all Track and Field events.

The present study characterizes the age-related changes in maximal performance and estimates the peak age for 47 para-athletics and wheelchair racing events, with a total of 472 event classes (that considers all impairment types) for both female and male para-athletes. These are scaled to the all-time able-bodied record performance. We also compare the patterns of performance decline for the para-athletes and wheelchair racing athletes and determine the classes contributing to the maximal performance of each event.

MATERIALS AND METHODS

Data Collection

Data (53,554) including athlete’s best performance of the year, event, age, and disability classification were collected for all International Paralympic Committee (IPC¹) competitions from 2009 to 2017 for 47 female and male para-athletes and wheelchair events (see details in **Table 1**) incorporating a total of 472 sport classes. Before 2009, data were unavailable online. These performances were achieved by 7,231 athletes: 3,500 male para-athletes, 1,348 female para-athletes, 1,650 male wheelchair athletes, and 733 female wheelchair athletes.

For the able-bodied maximal performance, the all-time world records by event at the end of 2017 were collected on the International Association of Athletics Federation’s website².

Study Design

For running events, racing times were converted to average speed in meters per second (ms^{-1}). All performances were analyzed according to age (in years), speed (in ms^{-1}) or meters (m) for throwing and jumping events and classes of disability. For males and females in all events, a unique maximal

¹www.paralympic.org

²www.iaaf.org

TABLE 1 | Number of performances and age indicators by event for para-athletes (PA) and wheelchair racing athletes (WCA) included in the database.

Event /Categories	Para-athletes male	Para-athletes female	Wheelchair athletes male	Wheelchair athletes female
100 m	3885	2115	1872	810
200 m	3271	1725	1690	723
400 m	2529	1003	1981	799
800 m	1299	224	1553	654
1 500 m	1458	320	1169	458
5 000 m	618	65	634	211
10 000 m	164	/	109	/
Marathon	319	50	601	174
Discus	2038	936	1969	935
Shot put	2256	1150	2086	1135
Javelin	1639	671	1550	856
Long jump	2110	1061	/	/
Triple jump	282	10	/	/
High jump	387	/	/	/

performance was selected among all individuals for each age. To compare the age-related pattern in performance between para-athletes and wheelchair racing athletes, two main categories were allocated: PA (Para-athletes) and WCA (Wheelchair athletes). Impairments types were regrouped according to IPC competition classification. For PA, these were; athletes with visual impairment (VI): T11-T12-T13-F11-F12-F13, athletes with cerebral palsy (CP): T35-T36-T37-T38-F35-F36-F37-F38, athletes with upper limb disabilities (UL): T45-T46-T47-F45-F46-F47, athletes with lower limb disabilities (LL): T42-T43-T44-F42-F43-F44 and athletes with intellectual disabilities (ID): T20-F20. In addition, for WCA, the classifications were: athletes with cerebral palsy in a wheelchair (CPW) T33-T34-F31-F32-F33-F34, athletes with tetraplegia disabilities (TD): T51-T52-F51-F52 and athletes with paraplegia disabilities (PD) T53-T54-F53-F54-F55-F56-F57-F58.

Characterization of the Age-Performance Relationship

To characterize age-related changes in maximal performance, the data were fitted with the Moore equation, which is a double exponential function (simple inverted U-shaped) initially developed on the athletes running speed-age relationship (Moore, 1975).

$$\text{Eqn1} : P(t) = a \left(1 - e^{-bt}\right) + c \left(1 - e^{-dt}\right) \text{ with } a, b, c, d > 0$$

$P(t)$ is the performance (t the time), a and c are scaling parameters, b and d are the characteristic times of the exponential growth and decline, respectively. For an estimated performance P , the model can be described as the sum of two von Bertalanffy's growth functions (VBGF): $P(t) = A(t) + B(t)$ where $A(t)$ is the increasing exponential process (first VBGF) and $B(t)$ the decreasing exponential process (the second VBGF is modified with $d > 0$). The Moore equation (Eqn 1) allows the estimation of the age (in years) at peak performance. These coefficients are determined using a least-square non-linear regression (Marck et al., 2017b). The quality of each fit was estimated by the coefficient of determination R^2 and the Root Mean Square Error (RMSE) (see **Supplementary Table S1**).

To quantify the gap between PA, WCA and able-bodied athletes, all datasets were scaled by maximal able-bodied performance of the event using the following formula:

$$\text{Eqn2} : \text{Scaled performance} = \frac{\text{performance}}{\text{maximal able-bodied performance of the event.}}$$

For each event, the exact peak age was computed and corresponded to the age when the performance was maximal. All performances [speed (m/s) or meter (m)] were reported in percentages (%) in order to compare the events.

Distribution of Age

In a complementary approach of the characterization of the age-related performance patterns, this study represented the age of the 100 best performances for PA and WCA by event using

the heat map function of Matlab software. This visualization enhances a better visibility of the peak and range of athlete distribution using a density scale [scale: 0 (low density) to 15 (high density)].

Distribution by Class for Best Performances

To assess the impact of each impairment type to the best performance, the number of sporting classifications within the top 100 best performances of each event were calculated as a percentage (%) for each sex.

All analyses were performed using the Matlab (MathWorks Inc.) 2017b 9.3.0 software.

Ethics Statement

This study was designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport) scientific committee. It used a research protocol qualified as non-interventional, in which "...all acts are performed in a normal manner, without any supplemental or unusual procedure of diagnosis or monitoring." (Article L1121-1 of the French Public Health Code).

RESULTS

Age at Peak Performance

In all Track and Field events, the age-performance relationship showed a similar pattern for both PA and WCA categories in female and male athletes. There was a gradual progression of the best performances up to a peak and thereafter performance progressively declined. The age of the estimated peak performance varied according to the event (**Figures 1–3**; details in **Supplementary Table S1**).

In male PA sprinting events, the age of the estimated peak ranged from 24.0 years in the 100 m to 20.8 years in the 400 m (**Figures 1, 2**). In endurance events, the estimated peak was 23.2 years for the 800 m and 33.0 years for the marathon (**Figure 1**). In throwing events, the age of the estimated peak varied from 24.1 years for javelin to 29.3 years for shot-put; in jumping events from 23.2 for triple jump to 26.0 years for high jump. In male WCA events, the estimated peak occurred later and ranged from 29.0 years in the 100 m to 35.6 years for the marathon (**Figures 1, 2**).

In female PA sprinting events, the estimated peak ranged from 24.8 years in the 100 m to 23.3 years in the 400 m (**Figures 1, 3**). In endurance events, no relation occurred between the age of the estimated peak performance and distance. In the marathon, the estimated peak was 18.1 years (**Figure 1**). In throwing events, the age of the estimated peak varied from 26.9 years for javelin to 33.4 years for shot-put; in jumping events from 22.8 for triple jump to 26.4 years for long jump.

Similar to male, the peak performance among female WCA ranged from 23.6 years in the 100 m to 31.9 years for the marathon (**Figures 1, 3**). In throwing events, the study showed a later peak compared to PA, with an estimated peak of 33.6 years for discus and 38.3 years for shot-put.

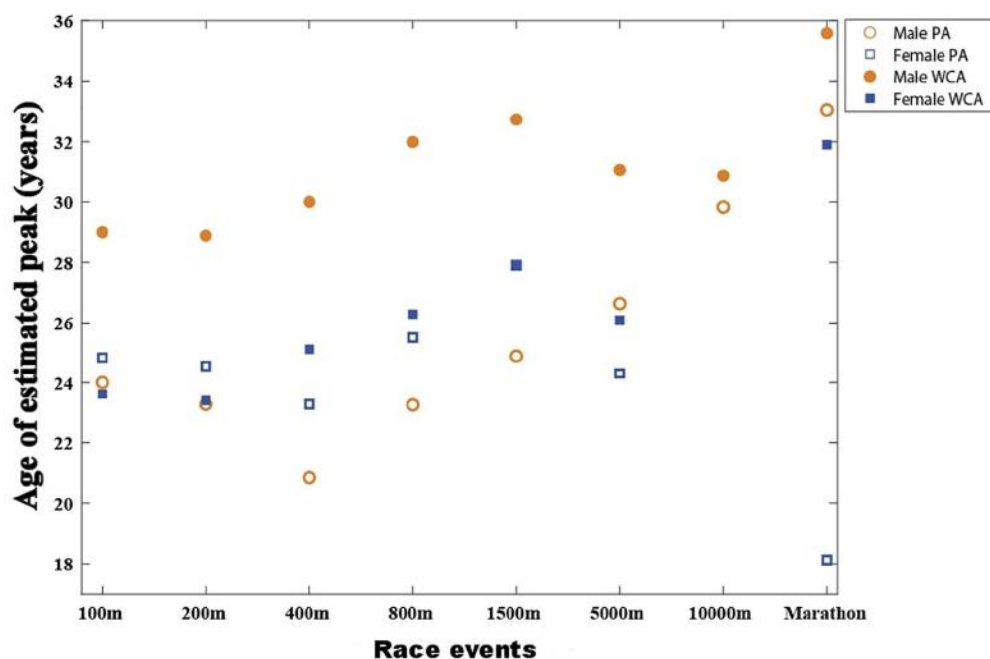


FIGURE 1 | Age of estimated peak performance with the Moore equation in race events for male para-athletes (PA: ○) and male wheelchair racing athletes (WCA: ●); for female para athletes (PA: □) and female wheelchair racing athletes (WCA: ■).

Performance Differences

In sprinting events, both female and male PA were faster than WCA. The difference decreased with distance and maximal performances were similar in the 400 m track event. For both sexes, maximal performances were lower than able-bodied best performances. In endurance events, PA were slower than WCA with the gap increasing as distance increased. In comparison to the best able-bodied athletes, WCA were faster (from +10.3% for female and +10.7% for male in the 800 m to +53.4% and +57.5% in the marathon) while PA were slower. In all throwing events, both female and male PA reached better performances than WCA, though all maximal performances were lower than able-bodied best performances (from −14% for male PA discus to −58% for female wheelchair javelin) (see details in **Supplementary Table S1**).

Age-Range for Optimal Performance

For both sexes, the age-range of the top 100 best performances was determined (**Figures 4A,B**). The findings showed a widespread age distribution from 20 to 60 years old and indicated that the density of performance was maximal around a peak age between 20 to 30 years old dependent upon event and sexes.

Class of Disabilities and Optimal Performance

All classes of disabilities were represented within best PA performances (**Figures 5A,B**). In WCA events for both sexes, the vast majority of the top 100 performances were achieved by athletes from the paraplegia impairments types.

Among female PA, athletes with VI were represented in the top 100 for all events. They represented 78% (400 m) to 85% (100 m) of top 100 best results in sprinting events and 34% for the shot-put events. Athletes with an ID were mostly represented in middle-distance events (31% for the 800 m; 52% for the 1500 m) and shot-put. Athletes with UL were mostly represented in sprinting events (13% in the 400 m; 18% in the 200 m), in javelin (39%) and long jump (27%). Athletes with a LL in long jump (12%) and throwing events (10% in javelin; 18% in discus. Finally, CP were represented in throwing events (6% in discus; 17% in shot-put) and mostly absent from the other events.

The male distribution of the top 100 was similar to female distribution. CP athletes were represented by 5% in javelin and 35% in discus but mostly absent from the other events. Similarly, athletes with a LL were 22% in javelin and 54% in discus, 13% in long jump, 45% in high jump, 32% in the 200 m, and 18% in the 400 m. UL athletes were represented in all events (7% in discus; 55% in triple jump). Athletes with an ID were mostly represented in middle- and long-distance running events (7% in the 10,000 m; 25% in the 1500m), in shot-put (23%), long jump (25%) and triple jump (9%). Male VI athletes were represented in the top 100 of all events (up to 71% in the 10,000 m).

DISCUSSION

The Age at Maximal Peak Performance

Age-related changes in maximal performances for both PA and WCA revealed a similar pattern. The age at peak performance varied depending on sex, impairment classification and event.

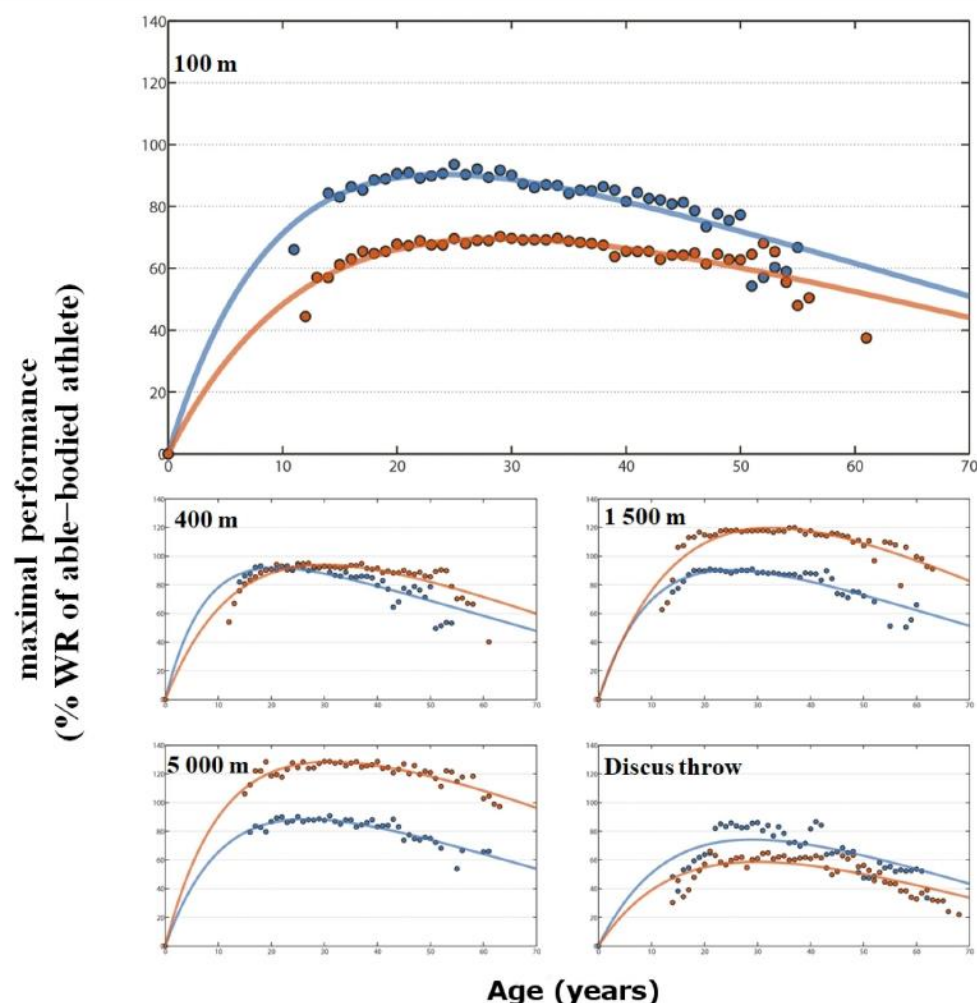


FIGURE 2 | Envelope curve in % of maximal able-bodied performance for male para-athletes (blue line) and wheelchair racing athletes (red line) by age on 100 m, 400 m, 1500 m, 5000 m and discus throw. Peak age and R^2 in **Supplementary Table S1**.

Such an age difference may depend on the “mosaic” of aging processes that do not homogeneously alter the organism but that similarly impacts each type of impairment.

The collected data on 53,554 PA and WCA performances showed a similar pattern of progression in the performance-age relationship for all events, with an initial gradual increase in performance until reaching the peak, then a gradual decrease in maximum performance with age. The maximal PA and WCA performances fitted with the Moore equation showed that the respective determination coefficients (R^2) of this equation were well adjusted to the maximum age-related performances (**Figures 2, 3**). Following this similar age-related performance pattern illustrated in many sport events and different species (Guillaume et al., 2011; Berthelot et al., 2012; Marck et al., 2017b; Marc et al., 2018), the para-athlete age-related performances confirmed the reliability and the robustness of the Moore equation (Eqn 1).

In male sprinting events (**Figures 1, 2**), PA peak age was similar to able-bodied athletes and increases in endurance events

(Moore, 1975; Berthelot et al., 2012; Marck et al., 2017b; Marc et al., 2018). It is well known that the aging process involves physiological and psychological changes, whether structural or functional (Mitchell et al., 2012; McGregor et al., 2014). The number of muscle cells and of motor units decreases sharply with age (Faulkner et al., 2007). However, fast type II fibers (favored in sprint races) are more prematurely altered than slow type I fibers (favored in endurance racing). The increase in peak performance with the event duration and distance could therefore be an explanation for PA male results. For female PA (**Figures 1, 3**), the appearance of a plateau and a young age for marathon peak may be mainly related to a low number of participants (50 archived performances only, vs. 319 in male PA marathon or 2115 in women PA 100 m).

Furthermore, at the individual scale, the origin and development of the disability, either born with it or acquired later in life, is also an element in the age at peak performance or the appearance of not clear peak, which needs to be

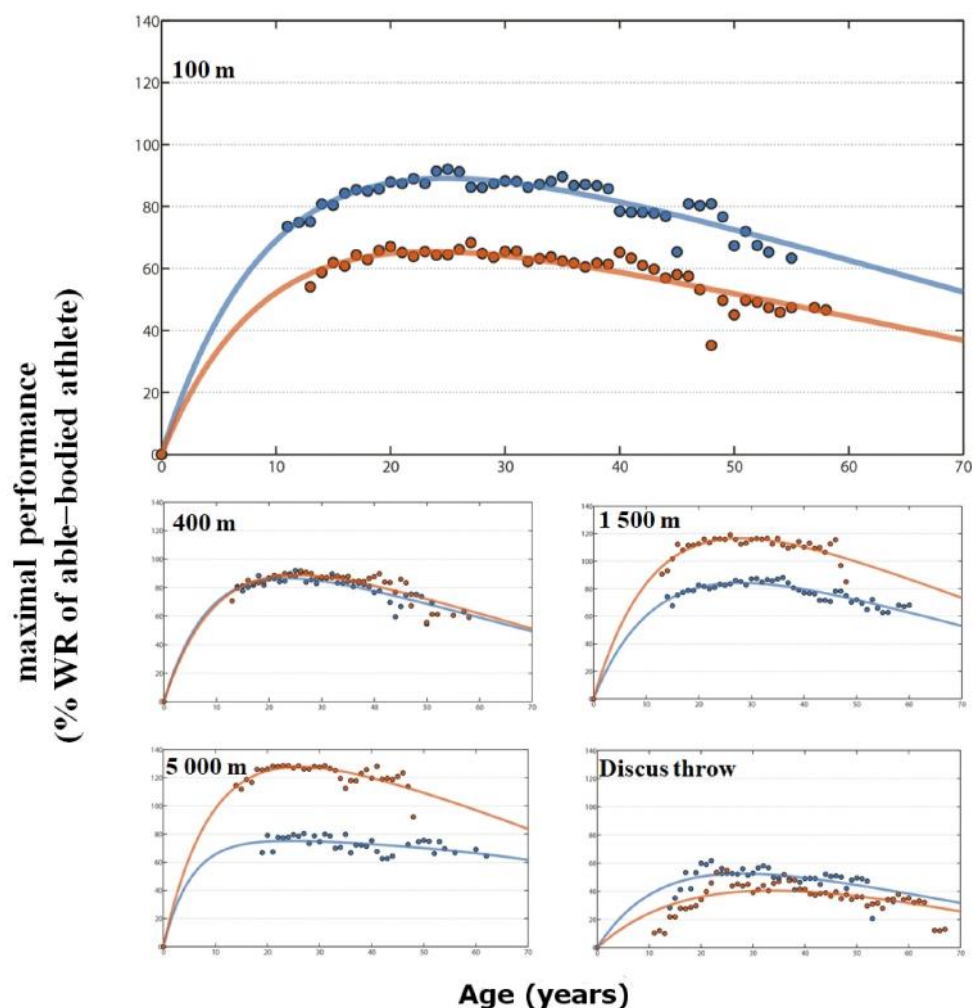


FIGURE 3 | Envelope curve in % of maximal able-bodied performance for female para-athletes (blue line) and wheelchair racing athletes (red line) by age on 100m, 400m, 1500m, 5000m and discus throw. Peak age and R^2 in **Supplementary Table S1**.

investigated. Indeed, PA seem to start their career younger due to the innate origin of the disability (Ravensbergen et al., 2018), while WCA begin their career and peak at a later age because of an impairment acquired during the adolescence or the young adult age (Ravensbergen et al., 2018). Depending upon the disability or the technical equipment, an adaptation period, in order to acquire an optimized techno-physiological interaction, may contribute to an older age at peak performance.

In some events, WCA age-related performance curves did not show a discernible peak performance. Power of the upper arms, muscle strength of the elbow extensors, muscle endurance of brachial triceps (Mitchell et al., 2012) and push angle (Lepers et al., 2014) may contribute to this observation. Such an element certainly increases the inter-individual variability for the age at peak performance.

The Top 100 performances included a large age range from 15 to 55 years (**Figure 4**) revealing that performance is not yet optimized for most of the elite PA and WCA. For the best male

and female able-bodied athletes, the age range varies from 21 to 36 years for the 100 m to 20 to 38 years for the marathon (Marc et al., 2018), which indicates a tighter age-performance range. These results could be explained by the fact that able-bodied athletes who have competed since the first Olympic Games in 1896 represent an accumulated pool of 30,535 able-bodied athletes over 100 years including the 2016 Rio Olympic Games by comparison, the first Paralympic Games held in 1960 only giving 56 years of data on 12,752 para-athletes. Therefore, these lower numbers of participants can also be attributed to disability-induced barriers to mobility. Para-athletes may experience difficult interactions with their social and physical environments which leads to limitations in their activities of daily life, and restrictions in competition participation. Depending on the degree of functional loss, the para-athletes are impacted differently by contextual, environmental and personal factors (Fellinghauer et al., 2012). In addition, such a large age-band might be typical of para-athletes and reflect the performance of those born without impairment who often are

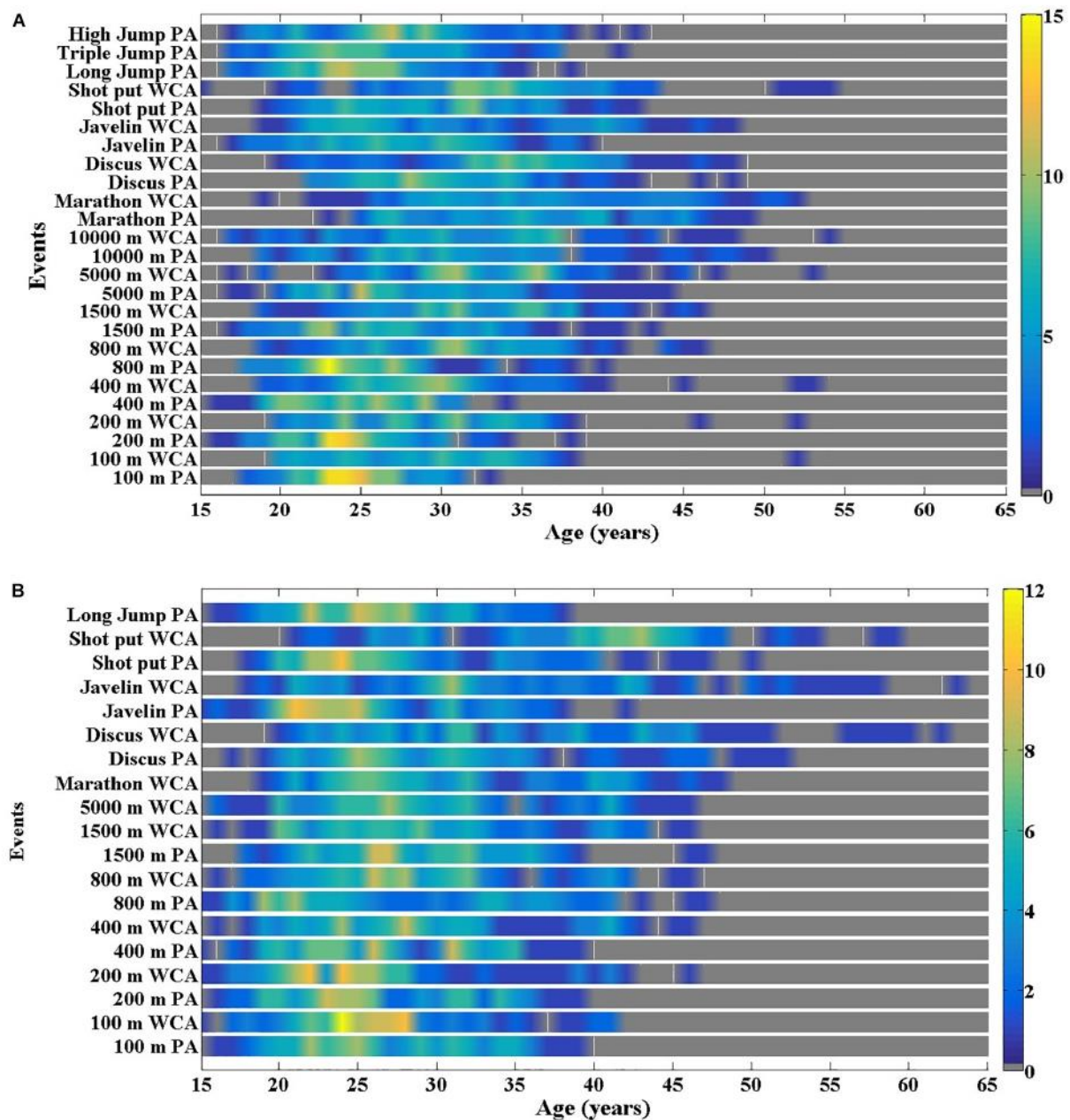


FIGURE 4 | Density distribution of the 100 best performances by age for male (A) and female (B) for para-athletes (PA) and wheelchair racing athletes (WCA).

athletes with accidental or progressive impairments appearing during their life.

For the best performances, only a few classes contributed to the maximal performance (Figure 5). For WCA, in both male and female events, the fastest athletes were in the PD class. Among paraplegic people, muscle strength in the upper extremities and respiratory function are comparable to that of the able-bodied population (Haisma et al., 2006a). In tetraplegic people, muscle strength varies greatly and respiratory function is considerably reduced relative to the values in an able-bodied population (Haisma et al., 2006b). This provides support for

the lack of representation from this group in the 100 best performances achieved by the WCA. Among PA, the distribution seemed more heterogeneous. Overall, from 100 to 400 m, only male PA with a VI, LL and UL represented the best performances, whereas the female PA were predominantly in the VI category. Females with LL were less represented in sprint events. This could be explained by the fact that the mechanical properties of carbon prostheses may not be adapted yet to female specificities (such as developed strength or anthropometric factors – height or BMI (Sedeaud et al., 2014). With a constant stiffness, the lower strength produced by female PA could

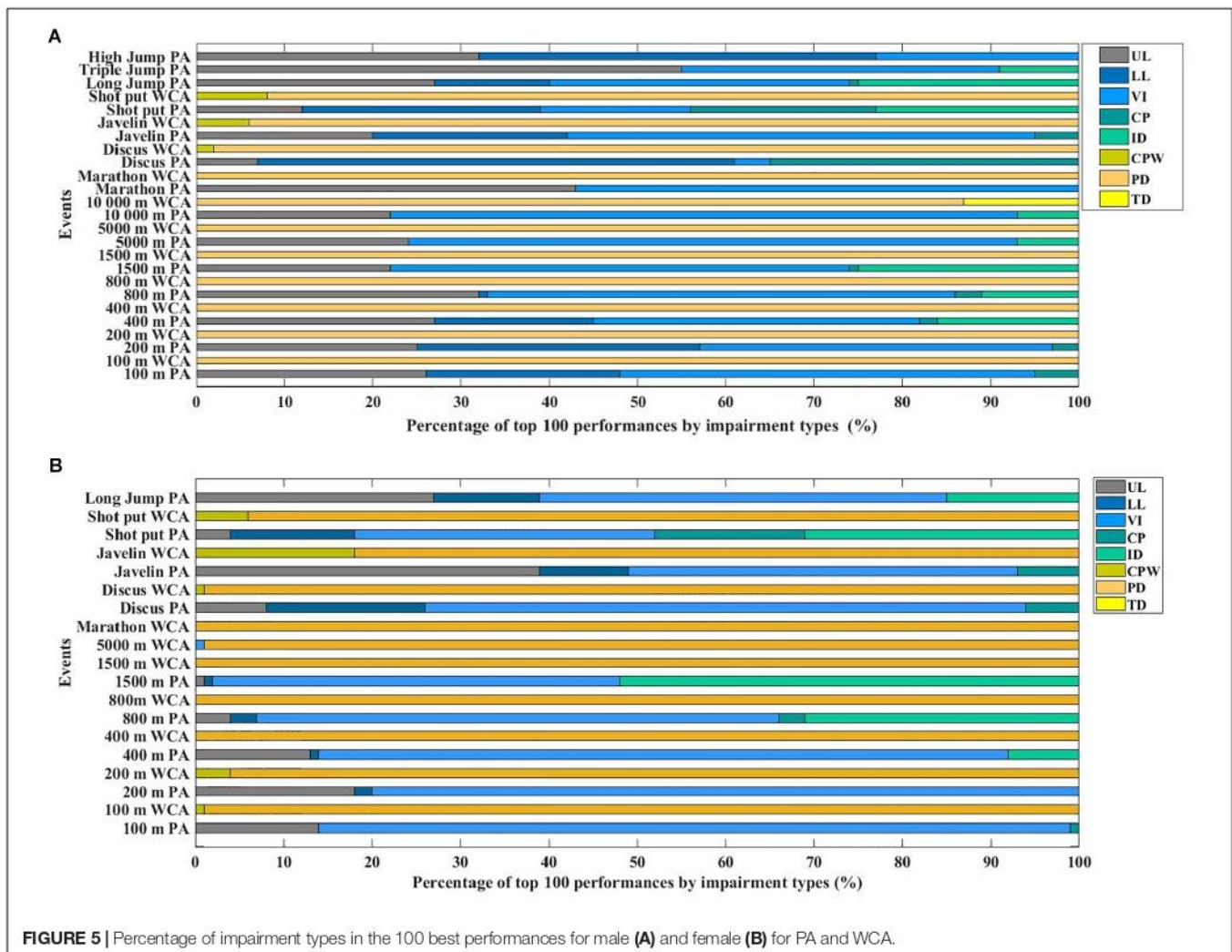


FIGURE 5 | Percentage of impairment types in the 100 best performances for male **(A)** and female **(B)** for PA and WCA.

impact the prosthesis reaction, which depends on the magnitude of the applied force (Beck et al., 2016) thereby reducing the generated speed.

The Performance Levels

Large differences remain between PA, WCA and able-bodied athlete's performances, related to biomechanical properties, difference in equipment and sample size. In male and female sprint events, the best PA performances were 5 to 9% under the able-bodied world record. When race distance increases, so does this gap with a larger difference in females.

The PA's maximal performances have come closer to the able-bodied world records but do not surpass them (Grobler et al., 2015). Nevertheless, maximal performances of able-bodied athletes have been plateauing for three decades and now seem to have reached their upper limits (Marck et al., 2017a). Similarly, the rate of progression of WCA seems to have considerably slowed down, at least through the observation of world records or the best performances such as in the Oita marathon (Lepers et al., 2012). WCA gap gradually increased with the race distance. The best WCA performances from

800 m to the marathon were, respectively, 10 to 57% over the able-bodied world record. These increases demonstrate that WCA in endurance events are comparable to hand cycling events where technological and strategic contributions are different compared to able-bodied athletes (Lepers et al., 2014). Indeed, WCA are able to coast for recovery or energy conservation (Cooper and De Luigi, 2014), whereas able-bodied runners must keep expending precious energy even during downhill sections.

Technological advances will undoubtedly increase the performance levels and at the same time improve the quality of the wheelchair or prosthesis use in the daily life. However, the environment and economic situation could be less favorable to the improvement of such innovations and may even play a crucial role in the regression of maximal performances in both able-bodied and disabled athletes due to travel, physical and financial difficulties. In this context, it would be important to continue to develop policies that increase and promote physical activity and sport for the beneficial effects on health, such as a decreased risk of chronic diseases and an improved quality of life (Global Recommendations on Physical Activity for Health, 2010),

particularly for people with physical disabilities (de Hollander and Proper, 2018).

CONCLUSION

Para-athletes and wheelchair athletes display an age-related pattern in maximal performances, similar to able-bodied athletes. The age at peak performance increases gradually from sprinting to endurance events for para-athletes. The Top 100 best performances include a large age range suggesting that performance has probably not yet been optimized for most elite para-athletes and wheelchair racers. The Paralympic Games of Tokyo 2020 and Paris 2024 will certainly offer exceptional performances which can still be improved upon for most of the elite wheelchair racing and para-athletes. Further studies will contribute to increasing knowledge about age-related changes and the origin of the impairment in para-athletes and wheelchair racing athletes.

DATA AVAILABILITY

Publicly available datasets were analyzed in this study. This data can be found here: www.paralympic.org.

REFERENCES

- Allen, S. V., and Hopkins, W. G. (2015). Age of peak competitive performance of elite athletes: a systematic review. *Sports Med.* 45, 1431–1441. doi: 10.1007/s40279-015-0354-3
- Baker, A. B., and Tang, Y. Q. (2010). Aging performance for masters records in athletics, swimming, rowing, cycling, triathlon, and weightlifting. *Exp. Aging Res.* 36, 453–477. doi: 10.1080/0361073X.2010.507433
- Baker, D. A. (2016). The “Second Place” problem: assistive technology in sports and (Re) constructing normal. *Sci. Eng. Ethics* 22, 93–110. doi: 10.1007/s11948-015-9629-1
- Beck, O. N., Taboga, P., and Grabowski, A. M. (2016). Characterizing the mechanical properties of running-specific prostheses. *PLoS One* 11:e0168298. doi: 10.1371/journal.pone.0168298
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., Guillaume, M., Vollmer, J.-C., et al. (2012). Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age* 34, 1001–1009. doi: 10.1007/s11357-011-9274-9
- Berthelot, G., Sedeaud, A., Marck, A., Antero-Jacquemin, J., Schipman, J., Saulière, G., et al. (2015). Has athletic performance reached its peak? *Sports Med.* 45, 1263–1271. doi: 10.1007/s40279-015-0347-2
- Blauwet, C. A., Lexell, J., and Derman, W. (2016). “Paralympic sports medicine,” in *Training and Coaching the Paralympic Athlete*, eds Y. C. Vanlandewijck and W. R. Thompson (Chichester: John Wiley & Sons, Ltd), 75–95. doi: 10.1002/9781119045144.ch4
- Cooper, R. A., and De Luigi, A. J. (2014). Adaptive sports technology and biomechanics: wheelchairs. *PM R* 6, S31–S39. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.05.020
- de Hollander, E. L., and Proper, K. I. (2018). Physical activity levels of adults with various physical disabilities. *Prev. Med. Rep.* 10, 370–376. doi: 10.1016/j.pmedr.2018.04.017
- Dyer, B. (2015a). The controversy of sports technology: a systematic review. *Springerplus* 4:524. doi: 10.1186/s40064-015-1331-x
- Dyer, B. (2015b). The progression of male 100 m sprinting with a lower-limb amputation 1976–2012. *Sports* 3, 30–39. doi: 10.3390/sports3010030
- JS, PG, AnM, J-FT, AS, and AdM designed the research. JS, PG, AnM, AS, and AdM performed and analyzed the research. JS, PG, AnM, JA, J-FT, AS, and AdM wrote the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.
- ## AUTHOR CONTRIBUTIONS
- ## ACKNOWLEDGMENTS
- The authors thank Stacey Johnson for proofreading the manuscript, the INSEP teams and Arnaud Litou for their full support, Sandra Mauduit, Julien Héricourt, and Oliver Deniaud from the French disabled sports federation (FFH), the French Paralympic and Sports Committee (CPSF). In addition, the authors thank all the curators of the websites.
- ## SUPPLEMENTARY MATERIAL
- The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00256/full#supplementary-material>
- TABLE S1 |** Coefficients values, fitting indicators and age at the peak performance for all track and field events.
- Fagher, K., Jacobsson, J., Timpka, T., Dahlström, Ö, and Lexell, J. (2016). The Sports-Related Injuries and Illnesses in Paralympic Sport Study (SRIIPSS): a study protocol for a prospective longitudinal study. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* 8:28. doi: 10.1186/s13102-016-0053-x
- Faulkner, J. A., Larkin, L. M., Claffin, D. R., and Brooks, S. V. (2007). Age-related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clin. Exp. Pharmacol. Physiol.* 34, 1091–1096. doi: 10.1111/j.1440-1681.2007.04752.x
- Fellinghauer, B., Reinhardt, J. D., Stucki, G., and Bickenbach, J. (2012). Explaining the disability paradox: a cross-sectional analysis of the Swiss general population. *BMC Public Health* 12:655. doi: 10.1186/1471-2458-12-655
- Frossard, L. (2012). Biomechanical analyses of the performance of Paralympians: from foundation to elite level. Interview by Sarah A. Curran. *Prosthet. Orthot. Int.* 36, 380–395. doi: 10.1177/0309364612453257
- Gawronski, W., Sobiecka, J., and Malesza, J. (2013). Fit and healthy Paralympians—medical care guidelines for disabled athletes: a study of the injuries and illnesses incurred by the Polish Paralympic team in Beijing 2008 and London 2012. *Br. J. Sports Med.* 47, 844–849. doi: 10.1136/bjsports-2013-092298
- Global Recommendations on Physical Activity for Health (2010). *Global Recommendations on Physical Activity for Health*. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK305057/> [accessed December 18, 2018].
- Grobler, L., Ferreira, S., and Terblanche, E. (2015). Paralympic sprint performance between 1992 and 2012. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 10, 1052–1054. doi: 10.1123/ijspp.2014-0560
- Guillaume, M., Len, S., Tafflet, M., Quinquis, L., Montalvan, B., Schaal, K., et al. (2011). Success and decline: top 10 tennis players follow a biphasic course. *Med. Sci. Sports Exerc.* 43, 2148–2154. doi: 10.1249/MSS.0b013e31821eb533
- Haisma, J. A., van der Woude, L. H. V., Stam, H. J., Bergen, M. P., Sluis, T. A. R., and Bussmann, J. B. J. (2006a). Physical capacity in wheelchair-dependent persons with a spinal cord injury: a critical review of the literature. *Spinal Cord* 44, 642–652. doi: 10.1038/sj.sc.3101915
- Haisma, J. A., van der Woude, L. H. V., Stam, H. J., Bergen, M. P., Sluis, T. A. R., and Bussmann, J. B. J. (2006b). Physical capacity in wheelchair-dependent persons with a spinal cord injury: a critical review of the literature. *Spinal Cord* 44, 642–652. doi: 10.1038/sj.sc.3101915

- Jones, C., and Wilson, C. (2009). Defining advantage and athletic performance: the case of Oscar Pistorius. *Eur. J. Sport Sci.* 9, 125–131. doi: 10.1080/17461390802635483
- Lepers, R., Stapley, P. J., and Cattagni, T. (2018). Variation of age-related changes in endurance performance between modes of locomotion in men: an analysis of master world records. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 13, 394–397. doi: 10.1123/ijssp.2017-0222
- Lepers, R., Stapley, P. J., and Knechtle, B. (2012). Gender differences in wheelchair marathon performance – Oita International Wheelchair Marathon from 1983 to 2011. *Open Access J. Sports Med.* 3, 169–174. doi: 10.2147/OAJSM.S37819
- Lepers, R., Stapley, P. J., and Knechtle, B. (2014). Analysis of marathon performances of disabled athletes. *Mov. Sport Sci.* 84, 43–50. doi: 10.1051/sm/2013078
- Marc, A., Sedeaud, A., Schipman, J., Saulière, G., and Toussaint, J. F. (2018). Age and performance from 10 seconds to a 6-days race. *J. Athl. Enhanc.* 7:4. doi: 10.4172/2324-9080.1000298
- Marck, A., Antero, J., Berthelot, G., Saulière, G., Jancovici, J.-M., Masson-Delmotte, V., et al. (2017a). Are we reaching the limits of homo sapiens? *Front. Physiol.* 8:812. doi: 10.3389/fphys.2017.00812
- Marck, A., Berthelot, G., Foulonneau, V., Marc, A., Antero-Jacquemin, J., Noirez, P., et al. (2017b). Age-Related Changes in Locomotor Performance Reveal a Similar Pattern for *Caenorhabditis elegans*, *Mus domesticus*, *Canis familiaris*, *Equus caballus*, and *Homo sapiens*. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 72, 455–463. doi: 10.1093/gerona/glw136
- McGregor, R. A., Cameron-Smith, D., and Poppitt, S. D. (2014). It is not just muscle mass: a review of muscle quality, composition and metabolism during ageing as determinants of muscle function and mobility in later life. *Longev. Healthspan* 3:9. doi: 10.1186/2046-2395-3-9
- McNamee, M., Savulescu, J., and Willick, S. (2014). Ethical considerations in paralympic sport: when are elective treatments allowable to improve sports performance? *PM R* 6, S66–S75. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.07.002
- Mitchell, W. K., Williams, J., Atherton, P., Larvin, M., Lund, J., and Narici, M. (2012). Sarcopenia, dynapenia, and the impact of advancing age on human skeletal muscle size and strength; a quantitative review. *Front. Physiol.* 3:260. doi: 10.3389/fphys.2012.00260
- Moore, D. H. II (1975). A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature* 253, 264–265. doi: 10.1038/253264a0
- Ravensbergen, H. J. C., Genee, A. D., and Mann, D. L. (2018). Expert consensus to guide the classification of paralympic swimmers with vision impairment: a delphi study. *Front. Psychol.* 9:1756. doi: 10.3389/fpsyg.2018.01756
- Sedeaud, A., Marc, A., Marck, A., Dor, F., Schipman, J., Dorsey, M., et al. (2014). BMI, a performance parameter for speed improvement. *PLoS One* 9:e90183. doi: 10.1371/journal.pone.0090183
- Weyand, P. G., Bundle, M. W., McGowan, C. P., Grabowski, A., Brown, M. B., Kram, R., et al. (2009). The fastest runner on artificial legs: different limbs, similar function? *J. Appl. Physiol.* 107, 903–911. doi: 10.1152/japplphysiol.00174.2009
- Willick, S. E., and Lexell, J. (2014). Paralympic sports medicine and sports science—introduction. *PM R* 6, S1–S3. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.05.022

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2019 Schipman, Gallo, Marc, Antero, Toussaint, Sedeaud and Marck. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Données supplémentaires

Event	Coefficient values					Fitting indicators			Peak performance	Absolute best Age	Absolute Best Performance %WR able-bodied	Range < 3% of the best performance	Range < 2% of the best performance
	a	b	c	d	R ²	RMSE	Estimated Age (years)						
100m PA	126.3 (101, 151.6)	-0.1046 (-0.1351, -0.07408)			9877 (-7.531e+05, 7.729e+05)	0.0001084 (-0.008195, 0.008411)	0.9862	4,1527	24	25	93.55 [21-29]		
100m WCA	107 (71.41, 142.7)	-0.07642 (-0.1028, -0.05009)			5698 (-4.248e+05, 4.362e+05)	0.0001558 (-0.01146, 0.01177)	0.9799	3,5043	29	29	70.29 [22-36]		
200m PA	124.5 (93.03, 155.9)	-0.1085 (-0.1502, -0.06679)			2,123x10 ⁻⁴ (-4.359e+06, 4.401e+06)	5.085x10 ⁻⁵ (-0.0104, 0.0105)	0.9754	5,5082	23,2741	25	91.16 [17-30]		
200m WCA	121.4 (77.57, 165.2)	-0.07586 (-0.104, -0.04775)			1,122x10 ⁻⁴ (-1.511e+06, 1.534e+06)	9.147x10 ⁻⁵ (-0.01222, 0.0124)	0.977	4,2283	28,885	34	79.23 [21-38]		
400m PA	122.1 (95.89, 148.2)	-0.1297 (-0.1867, -0.07269)			1,041x10 ⁻⁴ (-9.722e+05, 9.93e+05)	0.0001017 (-0.009422, 0.009626)	0.9789	5,4406	20,8434	25	94.80 [17-30]		
400m WCA	150.1 (79.93, 220.3)	-0.07059 (-0.1027, -0.03851)			1,052x10 ⁻⁴ (-1.314e+06, 1.335e+06)	0.0001207 (-0.01492, 0.01516)	0.96	6,1316	30,006	27	95.09 [21-37]		
800 m PA	124.1 (101, 147.1)	-0.1101 (-0.1428, -0.07736)			1,985x10 ⁻⁴ (-2.938e+06, 2.978e+06)	5.313x10 ⁻⁵ (-0.007832, 0.007938)	0.9905	3,7735	23,2546	25	91.72 [18-37]		
800m WCA	178.5 (109.4, 247.6)	-0.06551 (-0.08913, -0.04188)			2404 (-5.104e+04, 5.585e+04)	0.000587 (-0.0118, 0.01298)	0.9676	5,6275	31,9927	24	110.74 [19-40]		
1500m PA	129 (99.51, 158.5)	-0.09767 (-0.1292, -0.06609)			1,108x10 ⁻⁴ (-9.883e+05, 1.01e+06)	9.964x10 ⁻⁵ (-0.008814, 0.009014)	0.9854	4,3922	24,9035	29	90.95 [18-43]		
1500m WCA	198.4 (105.6, 291.2)	-0.06202 (-0.08781, -0.03624)			4325 (-1.673e+05, 1.76e+06)	0.0003691 (-0.0138, 0.01453)	0.9598	6,8171	32,7314	37	119.88 [19-40]		
5000m PA	129 (101.5, 156.4)	-0.08916 (-0.1144, -0.06392)			1,266x10 ⁻⁴ (-1.189e+06, 1.214e+06)	8.434x10 ⁻⁵ (-0.007865, 0.008033)	0.9926	3,1442	26,6338	31	90.84 [21-43]		
5000m WCA	157.9 (142.7, 173.1)	-0.09348 (-0.1099, -0.07701)			43.63 (0.2593, 86.99)	0.0156 (0.0067, 0.01842)	0.9928	3,7057	31,0608	30	128.58 [19-47]		
10000mPA	128.2 (84.47, 172)	-0.07338 (-0.1011, -0.0456)			5617 (-3.363e+05, 3.476e+05)	0.0001866 (-0.01099, 0.01136)	0.9914	3,259	29,8355	32	88.68 [28-36]		
10000m WCA	173.2 (78.25, 268.2)	-0.08142 (-0.1377, -0.02514)			147.5 (-787.8, 1083)	0.006359 (-0.01932, 0.03204)	0.9864	7,2219	30,8772	31	133.12 [19-45]		
Marathon P _f	141.1 (62.36, 219.9)	-0.05946 (-0.08937, -0.02956)			9512 (-1.194e+06, 1.213e+06)	0.0001231 (-0.01527, 0.01552)	0.9862	3,7342	33,0498	34	86.86 [27-38]		
Marathon W	217.8 (162.2, 273.3)	-0.06508 (-0.08365, -0.04651)			131.1 (-170.8, 432.9)	0.008021 (-0.002508, 0.01855)	0.9935	4,7409	35,5851	31	157.49 [28-51]		
Discus PA	122.1 (15.13, 229.1)	-0.07068 (-0.134, -0.007382)			8579 (-1.719e+06, 1.736e+06)	0.0001292 (-0.02558, 0.02584)	0.8538	9,5546	28,9875	41	86.54 [23-42]		
Discus WCA	102.7 (16.67, 188.7)	-0.06407 (-0.1155, -0.01263)			9351 (-1.996e+06, 2.014e+06)	0.0001033 (-0.02185, 0.02205)	0.7236	7,331	29,8889	21	66.19 [21-32]		
Javelin PA	88.18 (48.67, 127.7)	-0.09751 (-0.1601, -0.03489)			2,465x10 ⁻⁴ (-1.198e+07, 1.203e+07)	3.306x10 ⁻⁵ (-0.01602, 0.01608)	0.9283	6,1485	24,1536	26	66.75 [25-35]		
Javelin WCA	72.37 (4.035, 140.7)	-0.06994 (-0.1366, -0.003231)			9325 (-3.438e+06, 3.457e+06)	7.267x10 ⁻⁵ (-0.02662, 0.02676)	0.8401	5,9407	28,7197	22	51.77 [22-23]		
Shot put PA	115.7 (28.99, 202.5)	-0.06982 (-0.1208, -0.01883)			1,919x10 ⁻⁴ (-7.959e+06, 7.997e+06)	5.417x10 ⁻⁵ (-0.02236, 0.02246)	0.9206	7,1118	29,3485	24	86.94 [24-24]		
Shot put WCA	107.8 (14.93, 200.6)	-0.06077 (-0.1085, -0.013)			7693 (-1.353e+06, 1.368e+06)	0.000128 (-0.02224, 0.0225)	0.7834	7,0873	31,1183	38	70.80 [36-39]		
High Jump P	118.9 (42.84, 195)	-0.0898 (-0.1569, -0.02273)			7977 (-1.505e+06, 1.52e+06)	0.000129 (-0.02407, 0.02432)	0.972	6,2482	26,0149	28	89.39 [24-29]		
Long Jump P	118.3 (62.94, 173.6)	-0.09954 (-0.1656, -0.03353)			7819 (-1.033e+06, 1.049e+06)	0.0001344 (-0.01755, 0.01782)	0.9497	7,592	24,2427	26	92.07 [26-28]		
Triple Jump	109.4 (81, 137.8)	-0.1112 (-0.1595, -0.06449)			1,315x10 ⁻⁴ (-2.168e+06, 2.194e+06)	6.688x10 ⁻⁵ (-0.01128, 0.01142)	0.9931	3,1212	23,2545	21	84.91 [20-31]		

TABLE S1: Coefficients values, fitting indicators and age at the peak performance for all track and field events **for males**.

Données supplémentaires

Event	Coefficient values					Fitting indicator:		Peak performance		Absolute Best Performance %WR able-bodied	Range < 3% of the best performance	Range < 2% of the best performance
	a	b	c	d	e	R ²	RMSE	Estimated Age (years)	Absolute best Age			
100m PA	125 (106.3, 143.8)	-0.1005 (-0.1204, -0.0807)	6247 (-2.379e+05, 2.504e+05)	0.0001649 (-0.006193, 0.006523)		0.9927	2.95	24.85	25	92.02 [24-35]		
100m WCA	90.66 (72.31, 109)	-0.1077 (-0.1418, -0.07368)	9945 (-1.089e+06, 1.109e+06)	7.708x10 ⁻⁵ (-0.008389, 0.008543)		0.9813	3.36	23,6081	27	68.34 [20-27]		
200m PA	124 (100.7, 147.3)	-0.1017 (-0.1277, -0.07577)	1,186x10 ⁴ (-1.071e+06, 1.095e+06)	8.722x10 ⁻⁵ (-0.007818, 0.007993)		0.9892	3.67	24.56	24	92.66 [24-32]		
200m WCA	102.7 (74.48, 131)	-0.1085 (-0.1544, -0.06272)	8570 (-9.595e+05, 9.766e+05)	0.0001025 (-0.01139, 0.01159)		0.9756	4.75	23.39	28	76.00 [21-41]		
400m PA	118.3 (90.9, 145.6)	-0.1115 (-0.152, -0.07097)	1,45x10 ⁴ (-2.162e+06, 2.191e+06)	6.78x10 ⁻⁵ (-0.01005, 0.01019)		0.9902	3.85	23.28	25	91.95 [24-32]		
400m WCA	127.4 (95.96, 158.8)	-0.0952 (-0.1282, -0.06483)	2,116x10 ⁴ (-4.008e+06, 4.051e+06)	5.131x10 ⁻⁵ (-0.009677, 0.00978)		0.9858	4.45	25.13	26	91.71 [23-41]		
800 m PA	113.1 (91.14, 135.1)	-0.09999 (-0.1278, -0.07219)	588.3 (-3280, 4456)	0.001444 (-0.007026, 0.009914)		0.9935	2.94	25.52	20	82.75 [20-37]		
800m WCA	156.1 (111.8, 200.5)	-0.09065 (-0.1203, -0.06099)	1,006x10 ⁴ (-8.788e+05, 8.989e+05)	0.0001294 (-0.01118, 0.01144)		0.9907	4.62	26,2854	26	110.28 [24-41]		
1500m PA	124.9 (99.41, 150.4)	-0.08298 (-0.1031, -0.06283)	5343 (-2.079e+05, 2.186e+05)	0.0001904 (-0.007287, 0.007668)		0.9908	9.93	27.91	36	88.00 [27-36]		
1500m WCA	172.8 (118.7, 226.9)	-0.0827 (-0.1105, -0.05602)	6812 (-4.045e+05, 4.181e+05)	0.0002061 (-0.01202, 0.01243)		0.995	3.79	27.88	26	119.04 [21-46]		
5000m PA	78.81 (71.97, 85.66)	-0.1856 (-0.3604, -0.01076)	3,137 (-2.397, 8.67)	0.02673 (0.01338, 0.04009)		0.9877	3.93	24.31	27	80.26 [20-35]		
5000m WCA	164.5 (132.3, 196.6)	-0.1063 (-0.1385, -0.07418)	172.3 (-313.6, 658.2)	0.005494 (-0.005052, 0.01604)		0.9951	4.19	26.09	23	128.49 [18-41]		
10000m PA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10000m WCA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marathon PA	73.64 (68.86, 78.43)	-0.3321 (-15.51, 14.85)	0.8258 (-0.8686, 2.52)	0.03689 (0.02071, 0.05308)		0.9925	3.048	18.125	37	78.69 [37-37]		
Marathon WCA	225.6 (69.81, 381.3)	-0.06568 (-0.1064, -0.02492)	3452 (-1.539e+05, 1.608e+05)	0.0005193 (-0.02207, 0.02311)		0.9958	4.4395	31,9031	33	153.39 [33-33]		
Discus PA	80.44 (16.85, 144)	-0.08004 (-0.1497, -0.01038)	9684 (-3.713e+06, 3.732e+06)	7.133x10 ⁻⁵ (-0.02718, 0.02732)		0.9361	5.7529	27,8639	22	61.72 [22-22]		
Discus WCA	80.65 (-79.88, 241.2)	-0.05009 (-0.1253, 0.02514)	1,101x10 ⁴ (-0.1253, 0.02514)	6.809x10 ⁻⁵ (-0.04371, 0.04384)		0.5464	7.9976	33,588	25	54.75 [23-25]		
Javelin PA	266.8 (-2780, 3313)	-0.02691 (-0.2022, 0.1484)	224.2 (-6507, 6955)	0.01143 (-0.1671, 0.19)		0.9695	4.1351	26,8699	24	61.68 [24-24]		
Javelin WCA	841.4 (-1.772e+05, 1.739e+05)	-0.008019 (-0.6825, 0.6665)	3259 (-2.143e+06, 2.149e+06)	0.001459 (-0.7075, 0.7104)		0.7831	5.013	36,9191	30	42.24 [30-34]		
Shot put PA	234 (-2130, 2598)	-0.02097 (-0.1784, 0.1365)	33.9 (-737.4, 805.2)	0.02808 (-0.1863, 0.2425)		0.9658	5.0905	33,4264	36	76.54 [36-39]		
Shot put WCA	2138 (-2.686e+05, 2.729e+05)	-0.003356 (-0.2857, 0.279)	619.7 (-6.4e+04, 6.524e+04)	0.00761 (-0.2925, 0.3077)		0.8708	3.0092	38,273	40	50.82 [25-40]		
High Jump PA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Long Jump PA	222.3 (-1029, 1473)	-0.04695 (-0.1895, 0.09564)	1894 (-1.98e+05, 2.018e+05)	0.001532 (-0.1445, 0.1476)		0.98	4.8135	26,4096	31	87.77 [31-32]		
Triple Jump PA	142.8 (-840, 1126)	-0.04889 (-0.3712, 0.2735)	6,436 (-167.8, 180.7)	0.07069 (-0.451, 0.5924)		0.9943	1.9082	22,8329	25	75.48 [25-26]		

TABLE S1: Coefficients values, fitting indicators and age at the peak performance for all track and field events **for females**.

Lien en l'étude 2 et 3

Les dynamiques de progression des performances et les âges au pic de performance observés selon les épreuves et le type de handicap pourraient fluctuer en fonction de l'origine du handicap, qu'elle soit innée ou acquise au cours de la vie.

Dans l'étude 2, la relation âge-performance a été ajustée avec la fonction de Moore, qui est un modèle empirique, basée à l'origine sur des performances réalisées en athlétisme. L'étude 3 a permis de modéliser les données de performances selon l'âge avec la fonction IMAP (Integrative Model of Age-Performance) afin de prendre davantage en considération les dynamiques du développement biologique du corps humain.

Afin de comparer l'évolution des performances selon l'origine du handicap, les performances des nageuses, nageurs et athlètes avec un handicap visuel ont été étudiées dans des épreuves non médiées par des apports matériels ou technologiques.

5.3. Etude 3

Résumé

Plusieurs experts des disciplines Paralympiques ont souligné la nécessité d'étudier l'origine du handicap visuel des para nageuses, para nageurs et des para athlètes et son impact potentiel sur leurs performances. L'objectif de cette étude est d'analyser l'écart potentiel de performance entre ceux qui présentent un handicap visuel dès la naissance ou au contraire un handicap acquis au cours de la vie.

Tous les résultats en para natation et para athlétisme ont été recueillis pour les compétitions labellisées IPC entre 2009 et 2019. Les données récoltées contiennent 20 689 temps de course (6381 chez les hommes et 4239 chez les femmes en para natation ; 6904 chez les hommes et 3165 chez les femmes en para athlétisme). L'origine du handicap a été recueillie sur le site internet du CIP et dissociée en deux groupes pour distinguer les sportifs avec un handicap depuis la naissance et ceux avec un handicap acquis au cours de la vie. Dans les catégories 11-12-13, le niveau de performance moyen et la relation âge-performance ont été étudiés en fonction de l'origine du handicap visuel dans les deux sports.

Dans les catégories 11 et 12, l'analyse de la relation entre l'âge et la performance a permis d'observer un âge au pic de performance significativement plus précoce chez les para nageuses et nageurs dont le handicap est présent depuis la naissance. Aucune différence apparaît en para athlétisme. Un niveau de performance moyen similaire est observé entre les deux disciplines et dans chaque catégorie.

Cette étude démontre que l'origine du handicap visuel est un facteur associé à la performance chez les nageuses et nageurs avec un handicap sévère à modéré. La validation de la connaissance d'un âge au pic plus précoce pour les sportifs avec un handicap visuel inné pourrait permettre une optimisation de l'individualisation et une amélioration de l'évaluation des potentiels.

Is the visual impairment origin a performance factor?
Analysis of international level Para swimmers and Para athletes

Bryan Le Toquin ¹, Julien Schipman ^{1,2}, Quentin De Larochelambert ^{1,3}, Guillaume Saulière ¹,
Stéphanie Duncombe ⁴ and Jean-François Toussaint ^{1,2,5}

¹*Institut de Recherche bio-Médicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES), EA 7329, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP)*

²*Université de Paris, Paris, France*

³*Université de Dijon, Dijon, France*

⁴*School of Human Movement and Nutrition Sciences, University of Queensland, Australia*

⁵*Centre d'Investigations en Médecine du Sport (CIMS), Hôtel-Dieu, Assistance Publique – Hôpitaux de Paris, Paris, France*

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of congenital and acquired visual impairments on the international performance of Para swimmers and Para track and field athletes. We collected results from visually impaired Para athletes competing in Para swimming or Para athletic events at all IPC-labelled competitions between 2009 and 2019. The dataset contained 20689 events results. Impairment origin was collected from the International Paralympic Committee (IPC) website. We separated impairment origin into two groups to distinguish those with a congenital impairment from those with an acquired impairment. In visual impairment sport classes (11-12-13), the performance level and the age performance relationship were investigated according to the impairment origin. In classes 11 and 12, peak performance was achieved earlier by male and female swimmers with a congenital impairment compared with those who had an acquired impairment ($p < 0.05$). No differences were present in class 13 or in any class in Para athletics ($p > 0.05$). A similar performance level was observed among the two sport disciplines for each class ($p > 0.05$). This study demonstrated that impairment origin can influence the performance pathway among visually impaired swimmers.

Key Words: swimming; athletics; Paralympic; impairment origin; talent identification; para sport

Introduction

One of the challenges that Para sport faces today is the achievement of fair competition. This can be done by minimizing the impact of an individual's impairment on the outcome so that sporting ability, skill level and training alone determine success and the final result. Historically, the classification system was based on a medical diagnosis for all Paralympic disciplines and sport classes. In the 1980s, a sport specific and evidence-based functional classification system was implemented. However, because of the lack of guidance and scientific evidence of visual impairment (VI) functional impact, the VI classification system is still based on a medical diagnosis. It groups athletes with VI into 3 sport classes (**Table 1**) after an ophthalmological diagnosis of their impairment based on the World Health Organization (WHO) definition of blindness and VI (World Health Organization, 2019; World Para Athletics, 2018; World Para Swimming, 2018).

Sport Class	Rules and regulation		Sport	
	Visual acuity (LogMar scale)	Visual field	Para swimming	Para athletics
11	Less than 2.60	/	Athletes must wear opaque goggles and have a tapper	Athletes must wear opaque glasses and run with a guide
12	Range from 1.50 to 2.60 (inclusive)	Constricted to a diameter of less than 10 degrees	/	Athletes have the option to run with a guide
13	Range from 1 to 1.40 (inclusive)	Constricted to a diameter of less than 40 degrees	/	/

Table 1: Visual impairment rules and regulations in Para swimming and Para athletics

The VI classification system is the same for almost all Paralympic disciplines and therefore does not consider the influence of vision loss on each discipline performances (Ravensbergen et al., 2016). A vision loss seems to affect cardiovascular and muscular endurance, flexibility, balance, motor learning and motor performance (Bouchard & Tetreault, 2000; Daly et al., 2009; Skaggs & Hopper, 1996). Few studies investigate the role of VI on race time in para swimming and para athletics. In both disciplines, 11 classes were found to be slower than 12 and 13 classes with no significant differences between the latter (Chun et al., 2019; Daly et

al., 2009; Malone et al., 2001). In para swimming, the time to turn was a parameter related to the visual capacity highlighting the effect of a poorer vision on swimming performance(Daly et al., 2009; Malone et al., 2001). The development of a sport specific classification system for people with VI is needed but face the lack of knowledge about the effect of VI on each discipline performances(Tweedy et al., 2016).

In order to assess the needs for a sport-specific and evidence-based VI classification system, two studies, based on a systematic interactive survey method address several key points for Para swimming and Para athletics classification systems. In both studies, expert panels unanimously agreed that the age at which a VI is acquired will impact the swimming and running performance and the technical skills acquisitions(Allen et al., 2020; Ravensbergen et al., 2018). Knowledge and scientific evidence about the difference between congenital and acquired impairment on sport performance is very limited. It is recognized that observational learning has an important role in motor and technical skills acquisition(Hodges & Williams, 2007; Weiss et al., 1998; Wesch et al., 2007). Also, observational learning effect and outcomes is known to be influenced by age(Ashford et al., 2006). The relationship between the age at which the impairment is acquired and the time required for skill acquisition will depend on the specific complexity of the sport(Allen et al., 2020; Ravensbergen et al., 2018).The difficulty to use observational learning in training for athlete with VI could induce a longer time to acquire motor learning and specific skills (Mann & Ravensbergen, 2018; Ravensbergen et al., 2016). These observations highlight the need to investigate the age of the acquired VI and how it could influence performance. To our knowledge, no studies have been conducted comparing quantitatively the performance level between Paralympic athletes with a congenital impairment (CI) and an acquired impairment (AI).

There is also limited knowledge around career pathways on Paralympic athletes(Patatas et al., 2018). Identifying key components of developmental pathways can contribute to talent identification and improve athletes supports(Dehghansai et al., 2021). In this framework, age related performance can add precious information for athlete development, classification process, and talent identification(Berthelot, Johnson, et al., 2019; Hogarth et al., 2020; Schipman et al., 2019). Several studies have been conducted on the changes in performance related to age in Paralympic(Hogarth et al., 2020; Schipman et al., 2019) and

Olympic(Berthelot et al., 2012; Marc et al., 2018) disciplines. Due to physiological and psychological changes, para swimmers and para athletes showed annual progressions that reach a peak and then decrease depending on gender, impairment type and event(Hogarth et al., 2020; Schipman et al., 2019). However, at an individual scale, the age at which the impairment is acquired could also have a major influence on this pathway. Therefore, it seems necessary to include the impairment origin in the age-related performance analysis in order to provide information on how it can influence a career pathway.

The objective of this study was to investigate the international performances of Para Swimmer (PS) and Para Athletes (PA) with an AI or a CI. To meet this objective, we first compared the performance level in each impairment class between the CI and AI groups. Then we investigated the relationship between age and performance in each impairment class according to the VI origin for the same events. Firstly, it was hypothesised that PS and PA with acquired VI would perform better than congenital VI. Secondly, it was hypothesised that performance pathway will be different between CI and AI groups in PS and PA.

Material and methods

Data. Publicly available data was extracted from the IPC website: www.paralympic.org. We extracted each athletes' top annual performance for each event between 2009 and 2019. Before 2009, the data were unavailable on the IPC website. In Para swimming, athletes' times were collected for the following long course events: 50 m freestyle, 100 m freestyle, 400 m freestyle, 100 m butterfly, 100 m backstroke, 100 m breaststroke, 200 m individual medley. For Para Athletics, times were collected for the following events: 100 m, 200 m (only females), 400 m, 1500 m, 5000 m (only males), marathon, and long jump. These events were selected because they were in the Tokyo 2021 Paralympic Games program. In order to have the same number of events for Para swimming and Para athletics, we added the 800 m run for Para athletics, which is not included in the 2021 Paralympic Games program. The following variables were included in the dataset: event type, event time converted to speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), year of the event, last and first name, age (in years), sex, and impairment classification. A categorical variable "VI origin" with 3 factors (congenital impairment, acquired impairment, missing information) was added to the dataset. This data was collected from athlete biographies on the IPC website. If the information was missing on the IPC website, the search was extended to a broader internet search to see if the athlete had self-declared his/her VI origin. A congenital impairment (CI) was defined as a VI that presented at birth or in the first 6 months after birth. An acquired impairment (AI) was defined as a PS and PA with previously unaffected vision, but with a visual capacity that is now classified as impaired. For athletes with no recorded VI origin, a third category, missing information (MI) was created.

We defined performance level as the mean performance for the CI group and AI group in each Para swimming and Para athletics event for each class. We defined performance as the best event time converted into speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) for each Para swimmer with a congenital impairment (PSCI) and Para swimmer with acquired impairment (PSAI) in each event for each class. Similarly, the best event time for each Para track and field athlete with congenital impairment (PACI) and Para athlete with acquired impairment (PAAI) in each event by classes was defined as the athlete's performance.

Relative performance. We analysed the best individual performance of each PS and PA according to VI origin in class 11, 12 and 13 for each event. To do so, we calculated the Relative

Performance (RP) for each athlete (i) in percentage of the all-time best performance in each event (j) and for each class (k) (Eqn 1). This method allowed us to compare intra-class performance by grouping all events.

$$\text{Eqn 1 : } RP_i (\%) = \frac{\text{World record}_{jk}}{\text{Best individual performance}_{jk}} * 100$$

Performance level in each event. In order to go further in the investigation, we analysed the best individual performance of each PS and PA in each class for the 21 events in each discipline. The performance was calculated in $m \cdot s^{-1}$ and meters (m) for long jump event.

Missing data imputation. In order to minimize missing data (referred as MI group) bias, a missing data imputation method was implemented. We created one thousand datasets for each sport class and each event in which the MI group was distributed in CI and AI groups in a random manner according to a binomial law $B(n, p)$ with:

n : number of missing data in each class and each event

p : probability corresponding to the CI/AI groups distribution according to the class and event.

We analysed and compared the performance level between the CI and AI groups on each dataset created. The results are expressed in mean and standard deviation (in percentage) of each dataset that didn't allow us to reject the null hypothesis ($p > 0.05$). Results of the missing data imputation was then compared to our study sample (Performance level analysis result) for each event by class.

Age related performance according to the VI origin. In order to investigate the relationship between age and performance, we used the best performance of each PS and PA by age and according to VI origin in each event and for each class.

We modelled the relationship between age and performance according to an Integrative Model of Age-Performance (IMAP1). This model accurately describes the age-related changes of performance in multiple time-series phenotypic traits. IMAP1 (Eqn 2) is based on an enhanced biological foundation (Berthelot, Bar-Hen, et al., 2019). The formula of IMAP1 is:

$$\text{Eqn 2 : } P(t) = a \cdot \frac{b}{c} (1 - e^{-ct}) \cdot (1 - e^{d(t-f)})$$

P represents the performance according to t (the time), a and b are two growth parameters, c, d and f are decay parameters. In order to find optimal parameters, we used the method of least squares to employ a method of parameter optimization under constraint. Parameters a, b and c were forced to be higher than 0 and parameter f was forced to be between 90 and 120. For each event, we calculated the estimated age of peak performance (EAPP) that corresponds to the maximal estimated performance by age. The quality of each fit was estimated with the coefficient of determination, R^2 .

Statistical analysis. We conducted statistical tests to compare the performance indicators within each sample and therefore, test the effect of the observed factor: the VI origin.

- To test for performance difference according to each impairment origin group, a Kruskal Wallis test with a pairwise Wilcoxon test with Bonferroni adjustment was performed in order to control the multiple tests effects and reduce the probability of type I errors. Data were reported as mean $\pm$ standard deviation of RP.
- To test the age performance relationship difference according to impairment origin group we computed and compared mean EAPP for all events with a Wilcoxon test. Data were reported as mean $\pm$ standard deviation of EAPP.
- For the imputation method, we performed we used a Wilcoxon test to compare the performance level in the 1000 datasets for each event according to each impairment origin group. Data were reported as in mean $\pm$ standard deviation (in percentage) of each dataset that didn't allow us to reject the null hypothesis.

For all statistical analysis, the significance level was set at $\alpha = 0.05$. Data processing, graphical visualization and statistical analyses were conducted in R (version 4.0.3; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

Results

The Para swimming dataset contained 10619 event times: 6380 events from 408 males; 4239 events from 227 females. The Para athletics dataset contained 10942 event times: 7658 events from 1031 males; 3284 events from 447 females (**Table 2**).

Class 11	<i>Para swimming</i>			<i>Para athletics</i>		
	Male	Female	Total	Male	Female	Total
Congenital impairment	554	633	1187	367	222	589
Acquired impairment	1016	507	1523	1114	610	1724
Missing information	626	189	815	794	395	1189
Class 12						
Congenital impairment	503	526	1029	530	370	900
Acquired impairment	573	336	909	750	394	1144
Missing information	926	403	1329	1311	471	1782
Class 13						
Congenital impairment	609	737	1346	472	259	731
Acquired impairment	566	428	994	1152	273	1425
Missing information	1007	480	1487	1168	290	1458
TOTAL						
Congenital impairment	1666	1896	3562	1369	851	2220
Acquired impairment	2155	1271	3426	3016	1277	4293
Missing information	2559	1072	3631	3273	1156	4429

Table 2: Number of races by impairment sport classes and impairment origin groups among Para swimmers and Para athletes male and female

Relative performance. The relative performance analysis showed a statistically significant difference between CI, AI and MI groups ($p < 0.05$) in each sport class in para swimming and para athletics. The RP were lower in each sport class for the MI group for men and women in Para swimming and Para athletics (**Figure 1**). Post-hoc tests showed statistically significant differences for MI group with the CI and AI groups ($p < 0.05$). Between CI and AI groups, the post-hoc tests showed no statistical differences for men and women in Para swimming and Para athletics ($p > 0.05$).

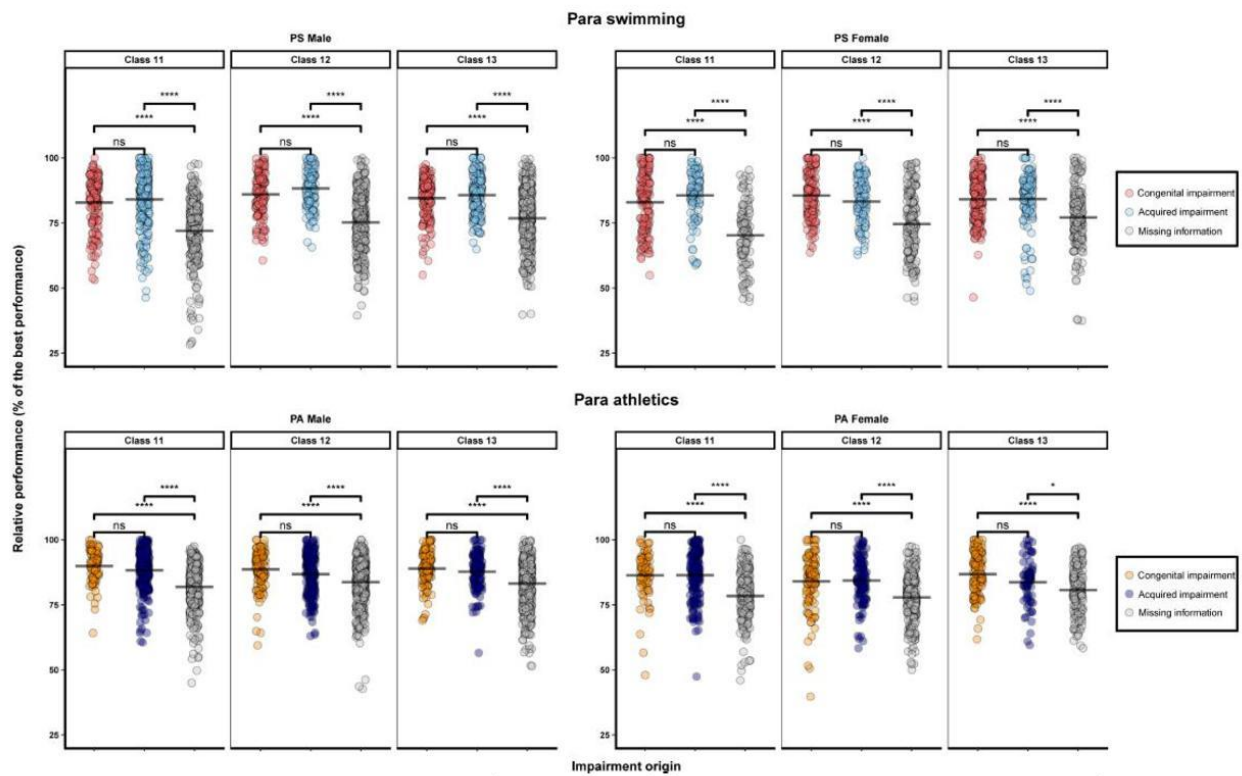


FIGURE 1: Relative performance (in percentage (%)) of the best performance for each event in Congenital impairment, Acquired impairment and Missing information groups for each sport class in Para swimming and Para athletics events. *: Indicate a significant mean relative performance difference ($p < 0,05$) with the two others groups

****: Indicate a significant mean relative performance difference ($p < 0,001$) with the two others groups

Missing data imputation. In each sport class, the missing data imputation method also highlighted a similar performance level in both disciplines between CI and AI groups with the MI group individuals randomly distributed (**Table 3**). In Para swimming, for the 400 m freestyle, 76.60 % of the thousand datasets created in this event didn't allow us to reject the null hypothesis, which is different from our study sample where we have shown a statistically significant performance level difference. In Para athletics, for the 400 m, in class 13, 77.70 % of the thousand datasets created in this event didn't allow us to reject the null hypothesis, which is different from our study sample where we have shown a statistically significant performance level difference. Also, for the 5000 m and the marathon in class 12, respectively 73.60 % and 85.10 % of the thousand datasets created in these two events didn't allow us to reject the null hypothesis, which is different from our study sample where we have showed statistically significant performance level differences.

	Para swimming						Para athletics					
	Females			Males			Females			Males		
	Class 11	Class 12	Class 13	Class 11	Class 12	Class 13	Class 11	Class 12	Class 13	Class 11	Class 12	Class 13
Events							Events					
50m Freestyle	97.4	99.4	99.8	99.6	98.0	95.8	100m	99.0	93.6	97.1	98.7	98.9
100m Freestyle	99.8	99.2	99.8	99.7	99.0	98.5	400m	98.5	94.1	77.7	99.1	95.8
400m Freestyle	70.7	99.7	76.6	100.0	98.3	99.1	800m	98.4	99.7	99.3	94.3	89.7
100m Butterfly	85.2	97.5	99.9	100.0	97.4	99.3	1500m	99.0	99.4	91.5	97.1	82.1
100m Backstroke	100.0	96.5	99.2	100.0	91.8	93.6	5000m	99.5	95.1	96.7	97.3	73.6
100m Breaststroke	100.0	98.4	98.7	99.3	94.1	99.0	Marathon	97.3	100.0	NA	96.5	85.1
200m Medley	97.6	96.4	98.8	98.7	99.1	99.2	Long Jump	99.6	99.7	NA	94.7	98.4

Table 3: Mean (%) of the thousand datasets (created for the missing data imputation method) with similar performance level between Congenital impairment and Acquired impairment groups in Para swimming and Para athletics ($p > 0.05$)

Performance level

Para swimming

The performance level analysis for men showed no statistical differences between PSCI and PSAI in mean performance among all sport classes in each event. (**Figure 2**). The performance level analysis for women showed no statistical differences between PSCI and PSAI in mean performance in 20 of 21 events (**Figure 2**). A statistically significant difference was found for class 13 in the 400 m freestyle. In this event, the performance level was significantly higher for PSAI ($p < 0.04$). Mean speed was $1.29 \pm 0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PSCI and $1.36 \pm 0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PSAI.

Para athletics

The performance level analysis for men showed no statistical differences between PACI and PAAI in mean performance in 19 of 21 events (**Figure 2**). A statistically significant difference was found for class 12 in the 5000 m. In this event, the performance level was significantly higher for PACI ($p < 0.03$). Mean speed was $5.40 \pm 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PACI and $5.03 \pm 0.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PAAI. A statistically significant difference was also found for class 12 in the marathon. In this event, the performance level was significantly higher for PACI ($p < 0.04$). Mean speed was $4.65 \pm 0.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PACI and $4.32 \pm 0.037 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PAAI.

The performance level analysis for women showed no statistical differences between PACI and PAAI in mean performance in 20 of 21 events (**Figure 2**). A statistically significant difference was found for class 13 in the 400 m. In this event, the performance level was significantly higher for PACI ($p < 0.04$). Mean speed was $6.43 \pm 0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PACI and $5.92 \pm 0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for PAAI.

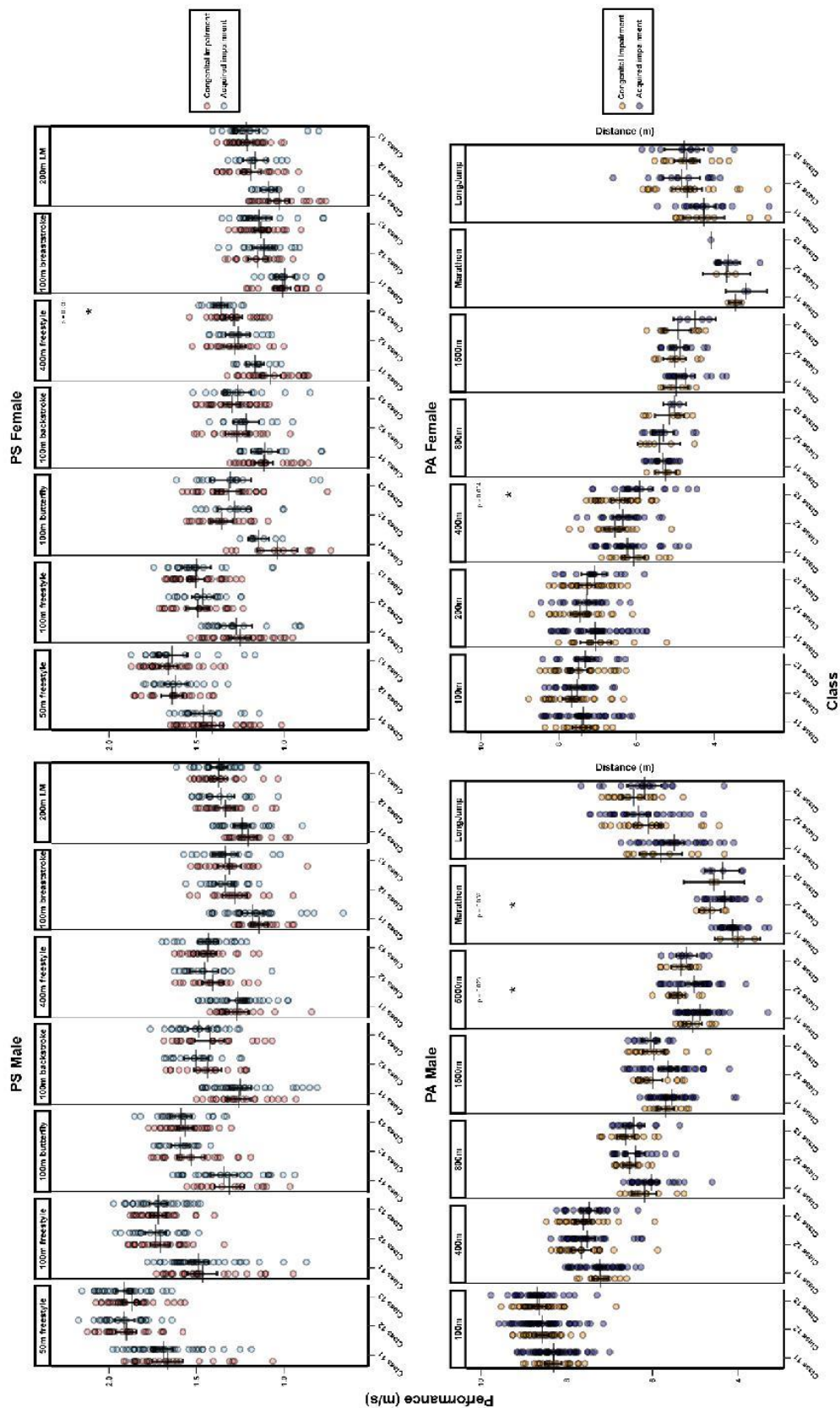


FIGURE 2: Performance level (mean $\pm$ sd) in each event for each sport class in Para swimming and Para athletics. Performance is expressed as speed (m.s^{-1}) or distance (m) for long jump.

*: Indicate a significant mean performance difference between Congenital Impairment and Acquired Impairment ($p < 0.05$)

Age related performance. In each event, the age-performance relationship displayed a similar pattern between the CI and AI groups in Para swimming and Para athletics. Performance increased progressively up to a peak and then decreased gradually. Based on the event, the EAPP were different between impairment classes and VI origin. The modelling parameters (a , b , c , d , f), EAPP, R^2 and the observed age at peak performance are available in *Table 1 – Supplementary Material*.

Para swimming

The age-performance relationship analysis for females showed a statistically significant difference in mean EAPP for class 11 and 12 between PSCI and PSAI (**Figure 3**). For class 11, the mean EAPP were 18.08 ± 0.50 years for PSCI and 23.05 ± 1.36 years for PSAI ($p < 0.01$). For class 12, the mean EAPP were 18.19 ± 0.52 years for PSCI and 21.20 ± 3.11 years for PSAI ($p < 0.03$).

The age-performance relationship analysis for males showed a statistically significant difference in mean EAPP for class 11 and 12 between PSCI and PSAI (**Figure 3**). For class 11, the mean EAPP were 20.51 ± 2.45 years for PSCI and 23.77 ± 1.46 years for PSAI ($p < 0.03$). For class 12, the mean EAPP were 22.62 ± 2.80 years for PSCI and 26.04 ± 1.57 years for PSAI ($p < 0.05$).

In class 13 for both genders, the age-performance relationship analysis showed no statistical differences between in mean EAPP for PSCI and PSAI ($p > 0.05$).

Para athletics

The age-performance relationship analysis for males and females showed no statistical differences ($p > 0.05$) in mean EAPP for PACI and PAAI in each sport class. (**Figure 4**).

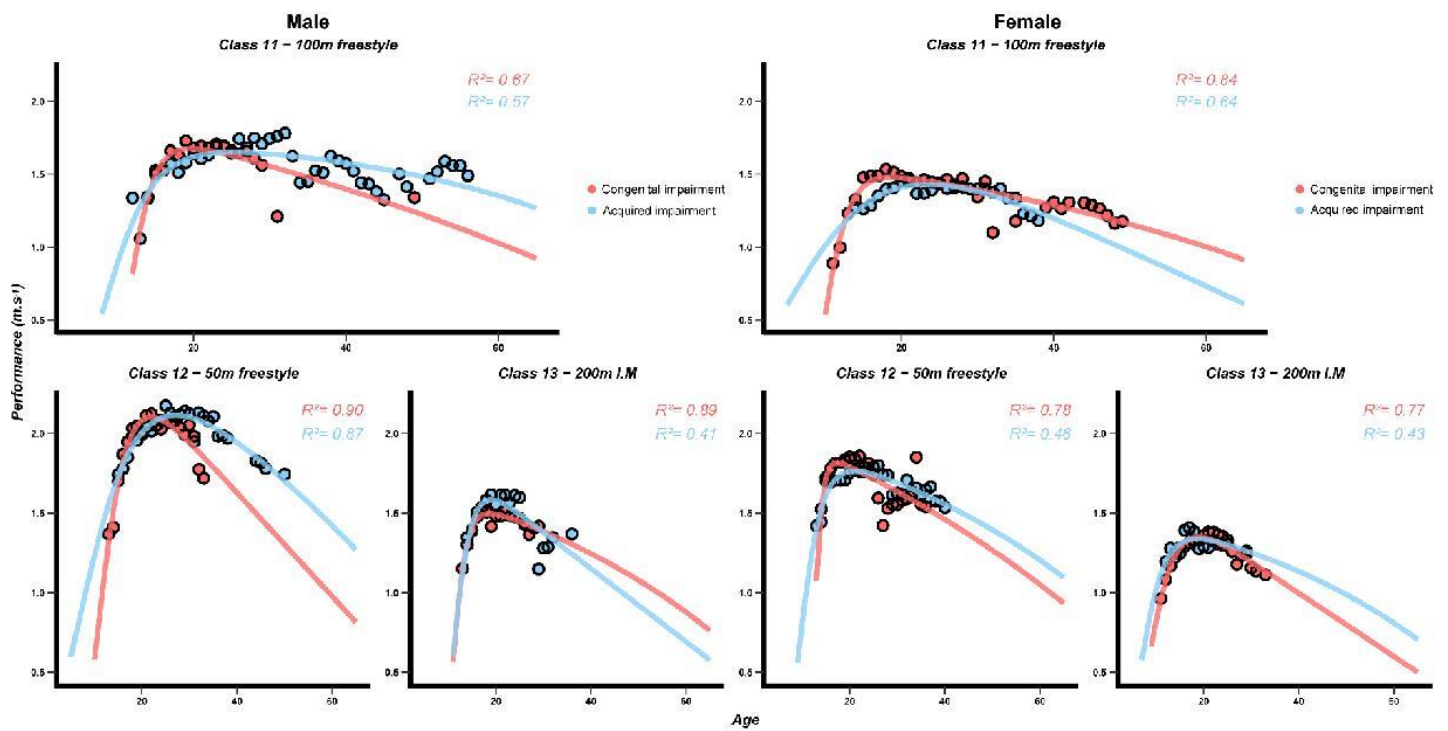


FIGURE 3: Age related performance modelling in Para swimming by visual impairment origin (Congenital impairment and Acquired impairment) in 100 m freestyle - class 11, 50 m freestyle - class 12 and 200 m Individual Medley (I.M) - class 13.

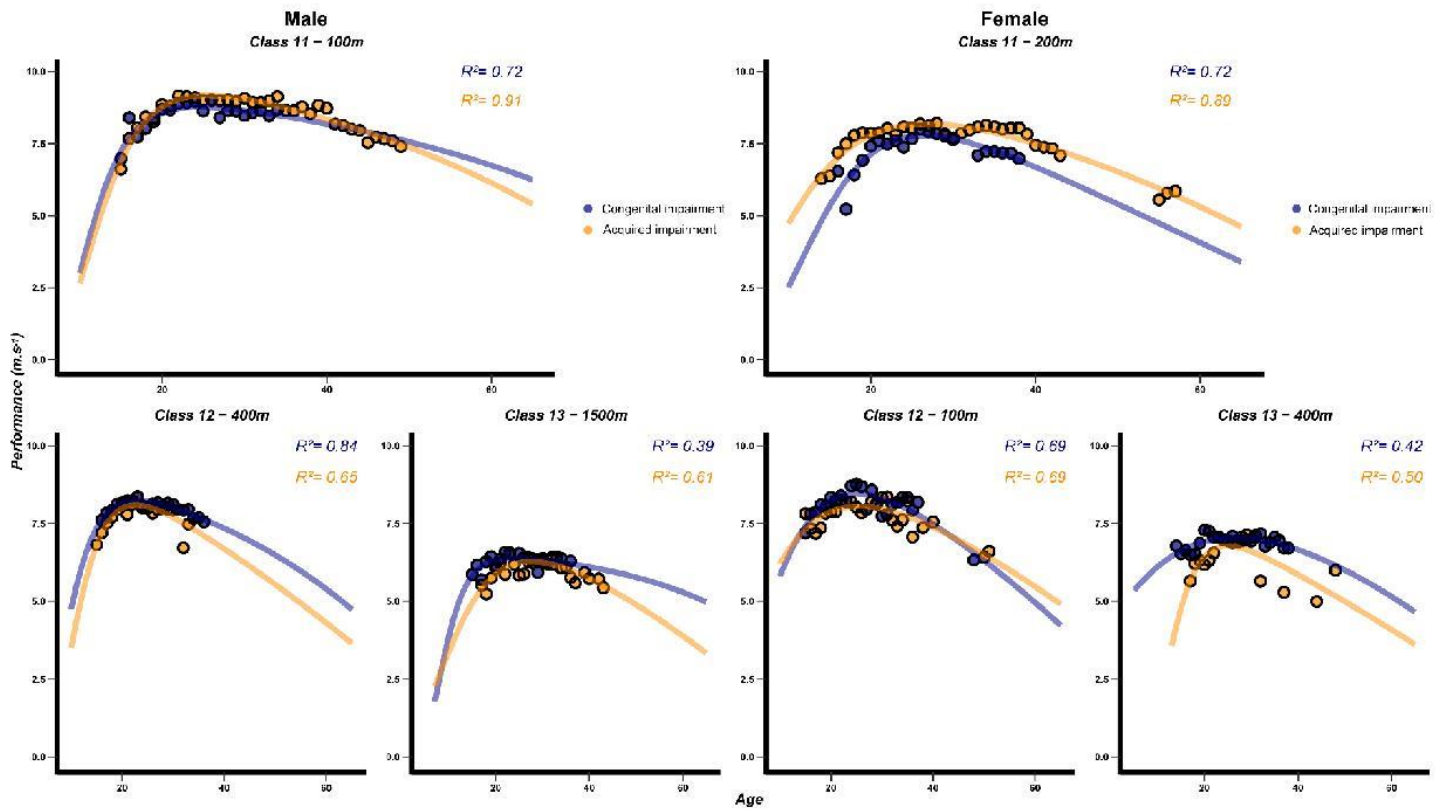


FIGURE 4: Age related performance modelling in Para athletics by visual impairment origin (Congenital impairment and Acquired impairment) in 100 m (male) and 200 m (female) - class 11, 400 m (male) and 100 m (female) - class 12, 1500 m (male) and 400 m (female) - class 13

Discussion

This study is the first to provide an initial investigation into the relationship between the origin of the impairment and performance in Paralympic disciplines. Based on international performances data since 2009, it aimed to determine if the origin of VI was a performance factor in Para swimming and Para athletics. The main findings showed that: 1) Performance level is similar among all impairment classes in both disciplines (**Figure 1 & 2**). 2) Age at peak performance is reached at any earlier age for male and female PSCI in class 11 and 12 in almost all events (**Figure 3**). The findings of this study through the quantitative analysis of performance in visual impaired PS and PA provides an initial response to the expert panel's queries in both disciplines(Allen et al., 2020; Ravensbergen et al., 2018).

Performance level. The first finding of this study was the similar performance level between CI and AI groups in both Para swimming and Para athletics. Based on our data, the VI origin does not induce a difference in race performance between swimmers and track and field athletes with a congenital VI and an acquired VI. This result rejects our initial hypothesis that swimmer and track and field athlete with acquired VI would perform better than swimmer and track and field athlete with congenital VI.

Para-swimming expert panel unanimously stated that a swimmer with a congenital impairment would be at a significant disadvantage against another swimmer with acquired impairment if the two swimmers had the same level of visual impairment. Main hypothesis was that having good vision in the early years of learning would allow the acquisition of general motor skills and would favour the learning of specific swimming techniques(Ravensbergen et al., 2018). Results of this study showed that, regardless of the impairment origin, Para swimmers did not show significantly different mean performances. Para Athletics expert panel noted that performance in running events would be impacted by age at onset of impairment, whether for athletes with partial or total blindness. Without reaching consensus, several scenarios emerged: i) athletes with a congenital impairment would already be adapted to their condition, which would give them an advantage over an athlete with an acquired impairment; ii) athletes with an acquired impairment might have had a better chance of acquiring fundamental motor skills at an early age; iii) if two athletes with a different origin of impairment had a different sporting background, they would not

have an advantage(Allen et al., 2020). Based on our study, mean performance was not significantly different according to the impairment origin.

Performance in swimming and athletics is related to a multitude of physiological, psychological, biomechanical and environmental parameters. It is well known that technical skills are important performance related factors, especially in swimming(Koopmann et al., 2020). As mention in introduction, athletes with AI could beneficiate from learning specific skills before acquiring a VI and also could be able to transfer general cognitive skills acquired in early sport experience(Dehghansai et al., 2017). However, an athlete who has been visually impaired since birth is likely to develop adaptations by compensatory mechanisms in visuospatial processes(Monegato et al., 2007) and also somatosensory and vestibular systems(Schwesig et al., 2011). To reach a same level of performance, it could take more times for an athlete with CI to develop specific technical skills compared to an athlete with AI.

Age related performance. The interest in understanding if the VI origin is a performance related factor led to us studying the pathways of performance. This is of interest as the developmental models of athletes with impairments could be different according to the age at which they acquire their impairment (Dehghansai & Baker, 2020). Based on international performance data since 2009, this study showed that PSCI reach their peak performance at a younger age than PSAl in classes 11 and 12. This result is in accordance with the research of Dehghansai & al. They found that Canadian wheelchair basketball players with acquired disabilities reached a majority of milestones career at later ages with also more variability than players with congenital disabilities(Dehghansai et al., 2017).

The observed pattern for the age-performance relationship was similar between PA and PS. It also followed a similar trend to previous studies on wheelchair athletes in both PA (Schipman et al., 2019) and PS (Hogarth et al., 2020). The estimated age at peak performance varied depending on the discipline, impairment classification, event, sex, and especially VI origin. Age-related changes in performance are partly due to both physical and psychological changes. Moreover, differences in the age of peak performance could be influenced by the psycho-physiological demand of the discipline, the specific event (e.g., the distance)(Mcgregor et al., 2014; Schipman et al., 2019), and the impairment severity(Burkett et al., 2018; Hogarth et al., 2020; Schipman et al., 2019).

The scientific literature on performance pathways in Paralympic disciplines is limited. Impairment type and classification are initial factors to consider in talent identification. But several socio-environmental, demographical, physiological, psychological and political variables will also influence the developmental process of each Paralympic athlete (Dehghansai et al., 2021). Our result showed that impairment origin is also an important factor that have to be incorporated into a para-sport development model. Understanding the similarities and differences between VI origins, such as the age at peak performance, would allow a better individualization of swimmers' training plans and goals. It could also provide additional information on athletes' potentials and support in detection of young athletes. We found no difference in class 13 for both male and female PS. Further, there was no difference in estimated age at peak performance between individuals with a CI or an AI in Para athletics in any impairment class. A statistical fluctuation due to limited data and the age distribution could explain these results. Indeed, the age distribution of our sample was highly variable by impairment classes and gender in each discipline (*Figure 1 and 2 – Supplementary Material*). However, they could also be explained by the specific requirements of Para athletics compared to Para swimming. Para swimming is consider as an good activity for people with VI because of its few barriers and the possibility to move freely without obstacles (Lieberman, 2002) and because it is considered to have a low injury risk (Silva et al., 2013). It could be hypothesized that people with a CI are more likely to practice swimming from a young age, which could lead them towards a Para swimming career. Further, in Para athletics, VI athletes in class 11 and 12 have to/can be assisted by a guide. If young athletes struggle to find guide, it could limit their participation. These differences between Para swimming and Para athletics highlight the need for more research in this area to develop a classification system that is specific to the considered discipline.

Furthermore, our performance level analysis in Para swimming and Para athletics also allows us to observe a similar performance level between class 12 and 13 (**Figure 2**) and affirm the findings from previous studies that demonstrated a similar performance level between the two classes for some events (Chun et al., 2019; Daly et al., 2009; Malone et al., 2001). These results highlight the need for research in this area and for a discussion on the effectiveness of the classification system for PS and PA with a VI in class 12 and 13.

Limits. There are several limitations in this work that need to be acknowledged. The first limit was the amount of data available. Only data between 2009 and 2019 was included. A larger sample with a greater number of events would have allowed us to be more conclusive in our results. Additionally, a significant proportion of data on swimmers' impairment origins was missing. This information is a matter of data protection and is therefore difficult to acquire for all athletes. However, we tested the robustness of our study sample against missing data using data imputation methods. Indeed, analysing the performance level between the CI and AI groups with the MI group randomly distributed didn't change the results as a similar performance level was noted between the CI and AI groups. It should be noted that the decision to compare performance on each event and in each class could induce a type 1 error in which the null hypothesis is incorrectly rejected. Finally, the lack of data ($n < 10$) after 30 years for PACI and PAAI didn't allow us to model the age-performance relationship in 100m breaststroke (class 12) in Para swimming and in marathon (class 11,12,13), 800m (class 12,13), 1500m (class 12,13) and long jump (class 11,13) in para athletics.

Perspectives. Further research into the influence of VI origin on Paralympic performance should be conducted. It would be interesting to focus on individual performance rather than performance level. Understanding the differences between the progression of eyesight loss (immediate or gradual) for athletes with an AI athlete would also be valuable. Expanding this study to other sport classes and other Paralympic disciplines will provide additional information in the investigation of differences between athletes with CI and AD.

Conclusion

This study revealed that VI origin can influence the progression pathway. PS with congenital VI reach an earlier age at peak performance in class 11 and 12. A similar performance level was highlighted in both disciplines for each sport class. These results could allow a better individualization of athlete support and provide additional information about each swimmer's potential. Further studies should be conducted to corroborate these observations and questions the necessity to add the impairment origin in the classification system.

Conflicts of interest statement. The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Availability of data and materials

Available on request.

References

- Allen, P. M., Dolan, R., Croxall, H., Ravensbergen, R. H. J. C., Brooks, A., Zenk, F., & Mann, D. L. (2020). Evidence-based Classification in Track Athletics for Athletes with a Vision Impairment: A Delphi Study. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 97(11), 984–994.
<https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001600>
- Ashford, D., Bennett, S., & Davids, K. (2006). Observational Modeling Effects for Movement Dynamics and Movement Outcome Measures Across Differing Task Constraints: A Meta-Analysis. *Journal of Motor Behavior*, 38, 185–205.
<https://doi.org/10.3200/JMBR.38.3.185-205>
- Berthelot, G., Bar-Hen, A., Marck, A., Foulonneau, V., Douady, S., Noirez, P., Zablocki-Thomas, P., Antero, J., Carter, P., Meglio, J.-M., & Toussaint, J.-F. (2019). An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36707-3>
- Berthelot, G., Johnson, S., Noirez, P., Antero, J., Marck, A., Desgorces, F.-D., Pifferi, F., Carter, P. A., Spedding, M., Manoux, A. S., & Toussaint, J.-F. (2019). The age-performance relationship in the general population and strategies to delay age related decline in performance. *Archives of Public Health*, 77(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s13690-019-0375-8>
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., Guillaume, M., Vollmer, J.-C., Gager, B., Quinquis, L., Marc, A., & Toussaint, J.-F. (2012). Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human

- species. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 34(4), 1001–1009.
- <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9274-9>
- Bouchard, D., & Tetreault, S. (2000). The Motor Development of Sighted Children and Children with Moderate Low Vision Aged 8-13. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 94(9), 564–573.
- Burkett, B., Payton, C., Van de Vliet, P., Jarvis, H., Daly, D., Mehrkuehler, C., Kilian, M., & Hogarth, L. (2018). Performance Characteristics of Para Swimmers: How Effective Is the Swimming Classification System? *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 29, 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2018.01.011>
- Chun, R., Massof, R. W., Bradley, C., Allen, P., Ravensbergen, R., & Mann, D. (2019). Effects of visual acuity loss on running performance among visually impaired Paralympic athletes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 60(9), 1043–1043.
- Daly, D., Malone, L., Burkett, B., Gabrys, T., & Satkunsienė, D. (2009). Is sight the main deterrent to race performance in visually impaired competitive swimmers? *Facta Universitatis - Series: Physical Education and Sport* 1451-740X, 7, 1–15.
- Dehghansai, N., & Baker, J. (2020). Searching for Paralympians: Characteristics of Participants Attending “Search” Events. *Adapted Physical Activity Quarterly: APAQ*, 37(1), 129–138. <https://doi.org/10.1123/apaq.2019-0071>
- Dehghansai, N., Lemez, S., Wattie, N., & Baker, J. (2017). Training and development of Canadian wheelchair basketball players. *European Journal of Sport Science*, 17. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1276636>
- Dehghansai, N., Pinder, R., & Baker, J. (2021). “Looking for a Golden Needle in the Haystack”: Perspectives on Talent Identification and Development in Paralympic

- Sport. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2021.635977>
- Hodges, N., & Williams, A. (2007). Current status of observational learning research and the role of demonstrations in sport. *Journal of Sports Sciences*, 25, 495–496.
<https://doi.org/10.1080/02640410600946753>
- Hogarth, L., Nicholson, V., Payton, C., & Burkett, B. (2020). Modelling the age-related trajectory of performance in Para swimmers with physical, vision and intellectual impairment. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*.
<https://doi.org/10.1111/sms.13910>
- Koopmann, T., Faber, I., Baker, J., & Schorer, J. (2020). Assessing Technical Skills in Talented Youth Athletes: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 50.
<https://doi.org/10.1007/s40279-020-01299-4>
- Lieberman, L. (2002). Fitness for Individuals Who Are Visually Impaired or Deafblind. *Rehabilitation and Education for Blindness and Visual Impairment*.
- Malone, L. A., Sanders, R. H., Schiltz, J. H., & Steadward, R. D. (2001). Effects of visual impairment on stroke parameters in Paralympic swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12), 2098–2103. <https://doi.org/10.1097/00005768-200112000-00019>
- Mann, D. L., & Ravensbergen, H. J. C. (2018). International Paralympic Committee (IPC) and International Blind Sports Federation (IBSA) Joint Position Stand on the Sport-Specific Classification of Athletes with Vision Impairment. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, 48(9), 2011–2023. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0949-6>

- Marc, A., Sedeaud, A., Schipman, J., Saulière, G., & Toussaint, J.-F. (2018). Age and Performance from 10 Seconds to a 6-Days Race. *Journal of Athletic Enhancement*, 07. <https://doi.org/10.4172/2324-9080.1000298>
- Mcgregor, R., Cameron-Smith, D., & Poppitt, S. (2014). It is not just muscle mass: A review of muscle quality, composition and metabolism during ageing as determinants of muscle function and mobility in later life. *Longevity & Healthspan*, 3, 9. <https://doi.org/10.1186/2046-2395-3-9>
- Monegato, M., Cattaneo, Z., Pece, A., & Vecchi, T. (2007). Comparing the Effects of Congenital and Late Visual Impairments on Visuospatial Mental Abilities. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 101, 278–295. <https://doi.org/10.1177/0145482X0710100503>
- Patatas, J., Bosscher, V., & Legg, D. (2018). Understanding parasport: An analysis of the differences between able-bodied and parasport from a sport policy perspective. *International Journal of Sport Policy*, 10, 235–254. <https://doi.org/10.1080/19406940.2017.1359649>
- Ravensbergen, H. J. C., Genée, A. D., & Mann, D. L. (2018). Expert Consensus to Guide the Classification of Paralympic Swimmers With Vision Impairment: A Delphi Study. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01756>
- Ravensbergen, Mann, & Kamper. (2016). Expert consensus statement to guide the evidence-based classification of Paralympic athletes with vision impairment: A Delphi study. *British Journal of Sports Medicine*, 50(7), 386–391. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095434>

- Schipman, J., Gallo, P., Marc, A., Antero, J., Toussaint, J.-F., Sedeaud, A., & Marck, A. (2019). Age-Related Changes in Para and Wheelchair Racing Athlete's Performances. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00256>
- Schwesig, R., Goldich, Y., Hahn, A., Müller, A., Kohen-Raz, R., Kluttig, A., & Morad, Y. (2011). Postural control in subjects with visual impairment. *European Journal of Ophthalmology*, 21(3), 303–309. <https://doi.org/10.5301/EJO.2010.5504>
- Silva, M. M. e, Bilzon, J., Duarte, E., Gorla, J., & Vital, R. (2013). Sport Injuries in Elite Paralympic Swimmers With Visual Impairment. *Journal of Athletic Training*, 48(4), 493–498. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-48.4.07>
- Skaggs, S., & Hopper, C. (1996). Individuals with Visual Impairments: A Review of Psychomotor Behavior. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 13(1), 16–26. <https://doi.org/10.1123/apaq.13.1.16>
- Tweedy, S., Mann, D., & Vanlandewijck, Y. (2016). Research needs for the development of evidence-based systems of classification for physical, vision, and intellectual impairments: Handbook of Sports Medicine and Science. In *Handbook of Sports Medicine and Science: Training and Coaching the Paralympic Athlete* (pp. 122–149). <https://doi.org/10.1002/9781119045144.ch7>
- Weiss, M. R., McCullagh, P., Smith, A. L., & Berlant, A. R. (1998). Observational learning and the fearful child: Influence of peer models on swimming skill performance and psychological responses. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69(4), 380–394. <https://doi.org/10.1080/02701367.1998.10607712>
- Wesch, N., Law, B., & Hall, C. (2007). The Use of Observational Learning by Athletes. *Journal of Sport Behavior*, 30, 219–231.

World Health Organization. (2019). *ICD-11: International Classification of Diseases 11th Revision*.

World Para Athletics. (2018). *World Para Athletics—Classification Rules and Regulations*.

World Para Swimming. (2018). *World Para Swimming—Rules and regulations 2018*.

Lien entre les études précédentes et l'étude 4

Au regard des analyses réalisées en para natation et des résultats observés en compétition, une participation des nageuses et nageurs dans de nombreuses épreuves a été observée alors que ce constat est peu fréquent chez les valides.

Afin d'objectiver ce constat, nous avons étudié la participation des nageuses et nageurs dans différentes épreuves ainsi que l'association potentielle de cette participation avec le niveau de performance atteint dans ces épreuves.

5.4. Etude 4

Résumé

Au niveau international, les sportifs les plus médaillés aux JOP sont les nageuses Paralympiques. Ces performances de très haut niveau sur des durées de carrière importantes ont été réalisées sur des épreuves avec un profil de nage bien différent et tenant compte du niveau de classification du handicap. L'objectif de cette étude est d'analyser les spécificités des 100 meilleurs para nageuses et nageurs.

Les données collectées représentaient les performances des 100 nageuses et nageurs Paralympiques et valides les plus rapides dans 11 épreuves et 4 types de nages entre 2009 et 2019 représentant 4400 performances. Les temps de course ont été convertis en vitesse ($m.s^{-1}$) et normalisés en %. L'âge et la distribution des nageurs selon les classifications ont été étudiés. La multi-participation a été calculée en cumulant le nombre de fois où une nageuse et nageur sont apparus dans une épreuve et quantifiée par une matrice d'adjacence (exprimée en % du nombre de nageuses et nageurs commun entre 2 épreuves). Pour établir une association potentielle entre la performance et le nombre de participations, les nageuses et nageurs ont été regroupés par niveau de participation et la performance exprimée en % de la meilleure performance de l'épreuve.

Les principaux résultats permettent d'observer : i) une représentation plus importante des para nageurs dans toutes les nages et distances, en particulier chez les para nageuses, ii) des % de participation plus importants dans un même style de nage (ex : 50m et 100 nage libre), iii) un niveau de performance qui augmente selon le nombre d'épreuves auxquels ont participé les para nageurs et particulièrement les nageuses, iv) que les 100 nageuses et nageurs les plus rapides ont des handicaps moteurs légers, un handicap visuel faible et un handicap intellectuel, v) des para nageuses plus jeunes que les nageuses valides.

Ces résultats pourraient s'expliquer par une plus faible densité de para nageuses et para nageurs selon leur classification, un nombre plus faible de pratiquants, de compétiteurs concomitants au mouvement Paralympique plus récent. Cependant, les para nageuses et para nageurs semblent développer de nombreuses compétences techniques pour participer à de nombreuses épreuves tout en restant très compétitifs au regard de leur handicap.



Involvement in Multiple Race Events Among International Para and Non-disabled Swimmers

Julien Schipman^{1,2*}, Guillaume Saulière^{1,2}, Bryan Le Toquin^{1,2}, Andy Marc¹, Nicolas Forstmann¹, Jean-François Toussaint^{1,2,3} and Adrien Sedeaud^{1,2}

¹ Institut de Recherche Bio-Médicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES), EA 7329, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP), Paris, France, ² Institut de Recherche Bio-Médicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES), Université de Paris, Paris, France, ³ Centre d'Investigations en Médecine du Sport (CIMS), Hôtel-Dieu, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Paris, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Ricardo J. Fernandes,
University of Porto, Portugal

Reviewed by:

Jorge E. Morais,
Polytechnic Institute of Bragança
(IPB), Portugal
Carl Jefferson Payton,
Manchester Metropolitan University,
United Kingdom

*Correspondence:

Julien Schipman
julien.schipman@insep.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Elite Sports and Performance
Enhancement,
a section of the journal
Frontiers in Sports and Active Living

Received: 21 September 2020

Accepted: 22 December 2020

Published: 28 January 2021

Citation:

Schipman J, Saulière G, Le Toquin B, Marc A, Forstmann N, Toussaint J-F and Sedeaud A (2021) Involvement in Multiple Race Events Among International Para and Non-disabled Swimmers. *Front. Sports Act. Living* 2:608777. doi: 10.3389/fspor.2020.608777

International elite Para swimmers form a large portion of the overall multi-medalist winning population. For the highest performing Para swimmers, world class performances were achieved across different strokes. The aim of this study was to quantify the level of involvement across different events and to examine this in relation to the level of performance. The performances in swimming speed of the top 100 females and males for both Para- and non-disabled swimmers were collected in 11 race events between 2009 and 2019 (4,400 performances for 307 Para females and 365 Para males, 605 non-disabled females, and 715 non-disabled males). We tallied the number of events in which each swimmer was involved. Swimmers were grouped according to the total number of race events in which they participated. Then the association between involvement and level of performance was investigated. Para swimmers with impairment from classes seven to 14 were involved in a range of race events across different strokes. The most common combination for both Para and non-disabled athletes was over similarly distanced races of the same stroke (50 and 100 m freestyle). The more race events in which Para swimmers involved, the higher the level of performance that was achieved. This trend can partially be explained by the less concentrated competition pool for Para swimmers compared to able-bodied swimmers. Para swimmers with minimal and no physical impairment perform in multiple race events more often than able-bodied swimmers. Fewer Para swimmers at the international level and a less concentrated competition pool could explain these differences.

Keywords: Paralympic swimmers, impairment classification, disabled athletes, network analysis, specialization, age

INTRODUCTION

Para swimming was first introduced into the Paralympics Games in Rome in 1960. It has one of the highest medal counts at the Paralympics Games alongside track and field and cycling (Tweedy and Howe, 2010). As a result of public support, geopolitical issues, and the increasing media coverage of the Paralympic Games, the Para athletes' performances have strongly evolved in recent years and are consistently improving (Fulton et al., 2009; Lepers et al., 2012; Grobler et al., 2015; Burkett et al., 2018) in comparison to non-disabled athletes who are reaching their performance limits in many sports (Berthelot et al., 2015; Marck et al., 2017, 2019). Consequently, Paralympic swimming

performances have progressed more than Olympic swimming performances over the past two decades for the majority of impairment classifications (Burkett et al., 2018).

Another feature of Para swimming race events is that they seem to provide an opportunity for Para swimmers (PS) to win across several distances and strokes despite a fewer race events available compared to non-disabled swimmer (NDS). The Para swimming race events includes four different strokes (freestyle, butterfly, backstroke, and breaststroke) swum over only four distances (50, 100, 200, and 400 m) with 14 impairment classifications. Trischa Zorn is the world's most successful female Paralympic swimmer, winning 37 gold medals for a total of 55 medals between 1980 and 2004 over all types of stroke styles from 50 to 400 m. She is followed by Beatrice Hess who won 20 gold medals between 1984 and 2004 in freestyle, butterfly, backstroke, the individual medley (IM) over several distances from 50 to 200 m. In contrast, among NDS, the best multi-medalist (Michael Phelps) won 23 gold medals between 2004 and 2016 in freestyle, butterfly, the IM, and relays on several distances from 100 to 400 m. From the junior national level (Stewart and Hopkins, 2000) to sub-elite level (Dormehl and Williams, 2016), high level non-disabled swimmers tend to perform in one or two race events with the most common overlap in races consisting of the 50 and 100 m freestyle.

It is well-known that performance level is strongly related to age, which varies according to sport, event, and sex among non-disabled (Berthelot et al., 2012) and Para athletes. Differences also exist between impairment type (Schipman et al., 2019). In swimming, non-disabled male athletes reach their performance peak between 20 and 24 years old, varying based on distance. Female non-disabled athletes usually reach this peak 2 years younger (Allen and Hopkins, 2015; Knechtle et al., 2016; Berthelot et al., 2019). The difference between sexes could be explained by the earlier onset of puberty in females compared to males (Baxter-Jones and Maffulli, 2002). Among international PS, age has not been studied and should be considered in order to be quantified and optimized.

The main differences between PS and NDS are the impairment classification based on disability (Burkett et al., 2018) and the maximum swimming distance of only 400 m for PS. In Para swimming, there is a wide classification range of physical (classes from 1 to 10), visual (11 to 13) and intellectual impairments (14) (World Para Swimming, 2017; World Para Swimming classification rules and regulations. Bonn: International Paralympic Committee). Among the physical and visual classifications, greater values mean less impairment. The PS with minimal or motor impairments (10), slight visual impairments (12–13) and intellectual disabilities (14) tend to be the fastest, partially due to better propulsion and also to lower active drag in the water than others classes (Burkett et al., 2018; Payton et al., 2020).

The long careers of Para swimmer (PS) multi-medalists as Trisha Zorn or Beatrice Hess over several stroke styles and distances and the various classes of impairment have led to questions regarding multi-race event involvement at a high-performance level. No previous study has been addressed on this aspect of Para swimming competition.

The aim of this study was to investigate the specificities of the international Para- and non-disabled swimmers according to their involvement in multiple race events, performance level, impairment class among Para swimmers, and age. Para swimmers may be involved in a more diverse set of race events than NDS. Indeed, the fewer concentration of PS in each race event and the large number of impairment classifications might increase the opportunity to win more in the few events that are available. In comparison, the NDS who would be more numerous with more races available leading to a specialization on a race event in order to be able to reach an international podium.

METHODS

Data Collection

The performances of the top 100 Para- (PS) and non-disabled (NDS) swimmers were collected from 2009 to 2019 from all International Paralympic Committee (IPC) competitions and International Swimming Federation (FINA) competitions, totaling 44 race events. Data were collected from publicly available, official swimming websites: www.ipc.org for PS and www.fina.org for NDS. Before 2009, data were unavailable on the IPC website. The long course race events (50 m swimming pool) collected were the 50, 100, 200, and 400 m freestyle; the 50 and 100 m butterfly; the 50 and 100 m backstroke; the 50 and 100 m breaststroke; and the 200 m IM. The short course race events (25 m swimming pool) were excluded. A total of 4,400 swimming performances were extracted for 307 Para females and 365 Para males, 605 non-disabled females and 715 non-disabled males. Names, stroke, age, sex, and impairment classification were also collected.

Performance levels were derived from the race times by converting them into average speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Speeds were normalized and calculated as a percentage (%) of the fastest speed by type of event and sex for both PS and NDS.

Concentration of Competitors

In order to quantify the mean performance level and the gap to the best performance of each PS and NDS, we pooled all race events of the same stroke and calculated the difference between the mean performance compared with the best performance for each swimmer by stroke. Additionally, we created a category that included all strokes and calculated the mean performance level. The mean level of performance was plotted by sex and stroke for PS and NDS (Figure 3).

Involvement in Multiple Race Events

To quantify the involvement of athletes in multiple race events, we recorded the number of events in which the swimmer took part across the study period. A bipartite network with two sets of nodes: (i) swimming race events (11 nodes) and (ii) swimmers (1,992 nodes) was created. Only links between different sets were allowed. Four representations of the network are illustrated in Figure 2, drawn using the Kamada Kamai algorithm (Kamada and Kawai, 1989), stratified by sex for both PS and NDS. From these networks, Table 1 reports the adjacency matrix for the percentage of swimmers who participated in each combination

TABLE 1 | Percentage (%) of female (A) and male (B) swimmers who perform each combination of two race events related to the total number of swimmers in these two events.

	Freestyle				Butterfly		Backstroke		Breaststroke		Individual Medley	
	50	100	200	400	50	100	50	100	50	100	200	
%												
Non-disabled												
(A) FEMALE												
Freestyle	50	/	10.5	2.6	22.7	13.6	8.1	6.4	1	0.5	3.6	Non-disabled
	100	57.5	28.2	5.3	21.2	16.3	8.1	9.9	1	1.6	8.1	
	200	22	/	25.8	6.4	8.1	3.1	5.3	0	1	9.9	
	400	31.6	43.9	39.9	/	2	1	2	0	0.5	4.2	
Butterfly	50	37	19.1	24.2	/	41.8	7.5	3.6	0.5	0	3.1	Non-disabled
	100	35.1	32.5	36.1	39.9	/	4.2	3.6	0	0.5	6.4	
	50	29	13.6	21.2	39.9	22	/	44.9	0.5	0	4.2	
	100	34.2	30.7	33.3	21.2	30.7	29.9	/	0.5	0	5.8	
Backstroke	50	22	16.3	13	28.2	17	23.5	8.7	/	41.6	2.6	Non-disabled
	100	25.8	17.7	16.3	16.3	26.6	14.3	17	35.1	/	6	
	50	48.2	37.9	39.9	28.2	50.4	22.7	37	24.2	42.9	/	
	200	33.3				Para						
(B) MALE												
Freestyle	50	/	2.6	0	16.3	2.6	3.6	0.5	1	0.5	0.5	Non-disabled
	100	55	17.9	2.6	13.8	8.2	3.7	3.1	0.5	0	2.1	
	200	14.9	/	23.5	0	0.5	0.5	4.2	0	0	8.1	
	400	29	42.9	32.5	/	0	0.5	1	0	0	4.2	
Butterfly	50	36.1	11.1	18.3	/	27.4	4.7	5.3	1.5	1	2.6	Non-disabled
	100	35.1	24.2	30.7	29.9	/	3.6	4.7	0.5	1	6.4	
	50	27.4	8.1	14.9	29	16.3	/	34.2	1.5	0.5	3.1	
	100	30.7	22	25	18.3	37	29	/	1.5	0.5	7	
Backstroke	50	27.4	8.1	14.9	29	16.3	/	34.2	1.5	0.5	3.1	Non-disabled
	100	30.7	22	25	18.3	37	29	5.8	/	36.1	0.5	
	50	15.6	4.2	5.3	19.1	7	13	11.1	30.7	/	3.6	
	100	14.9	14.3	9.3	10.5	15.6	7.5	40.9	12.4	26.6	/	
Individual Medley	200	30.7	36.1	34.2	15.6	37.9	17.7	40.9	12.4	26.6	/	

The left diagonal corresponds to the Para swimmers and the right diagonal to the non-disabled swimmers. The color gradient depicts the strength of the overlap between the two events: Navy blue (very low), Red (high).

TABLE 2 | Number of performances by stroke style (all distances combined) and involvements in group events for Para and non-disabled female's and male's swimmers.

	Para				Non-disabled		
	[1,2]	[2,3]	[3,5]	[5,11]	[1,2]	[2,3]	[3,8]
Female							
All	93	86	171	382	331	242	202
Freestyle	18	25	53	91	107	74	76
Butterfly	10	19	29	85	45	41	55
Backstroke	26	18	37	73	54	52	32
Breaststroke	39	23	27	59	71	57	11
Individual Medley	0	1	25	74	54	18	28
Male							
All	140	93	192	343	427	266	143
Freestyle	36	26	55	89	141	90	52
Butterfly	18	16	40	80	61	56	40
Backstroke	36	14	36	69	75	48	26
Breaststroke	50	31	33	39	86	56	5
Individual Medley	0	6	28	66	64	16	20

of two race events. An analysis was performed depending on the stroke, regardless of the distance.

In order to investigate a potential association between the performances of swimmers and their involvement in multiple race events, we grouped swimmers based on the number of nodes from set (i), where they had a link. Balanced groups are illustrated in **Table 2** and were obtained by splitting the distribution of the number of race events in which swimmers competed. For Para swimmer, we split the distribution into five groups: swimmers involved in only one race event [1,2], swimmers involved in two race events [2,3], swimmers involved in three to four race events [3,5], and swimmers involved in five to 11 race events [5,11]. As the distribution for swimmers involved in multiple race events was different among NDS, only three groups were established: [1,2], [2,3], and [3,8]. In order to investigate the relation with the performance levels and the gap to best performance, we calculated the mean performance levels of each swimmer by stroke according to their involvement group. Once again, we created a category that included all strokes together.

Statistical Analysis

Data were reported as mean $\pm$ standard deviation. A one-way ANOVA with a Tukey *post-hoc* test was performed to test for performance differences between groups according their involvement in multiple race events (based on the splitting method described above). Age differences between PS and NDS according to sex, stroke, and distance were also tested with a one-way ANOVA and Tukey *post-hoc* test. In addition, the distribution of impairment types according to sex, stroke, and distance was analyzed. All statistical analyses were performed using R (version 3.6.2; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria). Results are considered significant at an alpha of 0.05.

RESULTS

Descriptive Results

Swimmers' impairment classifications, according to stroke and sex, are illustrated in **Figure 1**. For both sexes, they ranged

from classifications 7–14. Para swimmers from classifications 1–6 were not represented. When all strokes and distances were combined, the most common impairment classification among the top 100 female swimmers was Class 10 = 23.4%. This was followed by Class 9 = 21.2%, Class 13 = 20.5%, and Class 14 = 16.6%. The top classes among males were Class 10 = 25.1%, Class 14 = 21.5%, Class 13 = 20.3%, Class 12 = 14.5% (**Figure 1**).

Female PS were significantly younger than their NDS counterparts in nine race events (**Table 3**). Male PS were significantly younger than their NDS counterparts in only the 200 m freestyle (21.0 ± 3.5 vs. 22.7 ± 3.0), the 50 m breaststroke (22.9 ± 5.4 vs. 24.2 ± 3.1), and the 200 m IM (21.7 ± 3.5 vs. 22.6 ± 2.5) (**Table 3**).

Involvement in Multiple Race Events

Female PS swam on average 3.5 ± 2.6 race events and NDS swam 1.7 ± 1.1 race events. Male PS swam 3.0 ± 2.2 race events while NDS swam 1.5 ± 0.8 race events (**Figure 2**).

The race events with the greatest overlap of swimmers were the 50 and the 100 m freestyle, where 57.5% of female PS and 55.0% of the male PS participated in both compared with 39.9% for female NDS and 32.0% for male NDS (**Table 1**). For both male and female PS, breaststroke had the least overlap with other strokes. The majority of NDS involved in breaststroke swam it exclusively (**Figure 2** and **Table 1**).

Regarding the PS in the 200 m IM, 50.4% of women also swam the 100 m butterfly and 48.2% the 100 m freestyle (**Table 1**); 44.9% of men also swam the 100 m freestyle and 40.9% the 100 m backstroke (**Table 1**). For NDS in the IM, 8.1% of women also swam the 100 m freestyle and 9.9% the 200 m freestyle; 2.1% of men also swam the 100 m freestyle and 8.1% the 200 m freestyle (**Table 1**).

Performance Level

For female PS, the mean performance level for all strokes was $87.8 \pm 3.6\%$ when compared with the best performances. The stroke where the mean level had the smallest difference compared with the best performance was freestyle with a performance

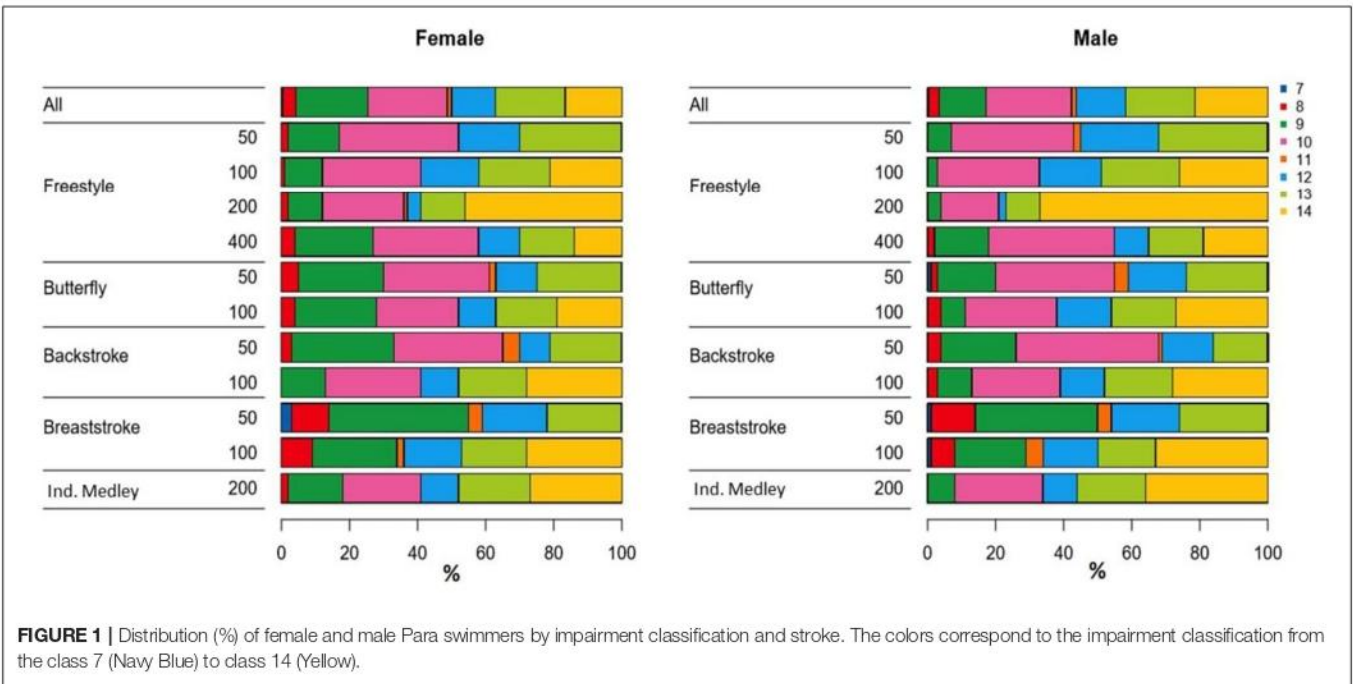


TABLE 3 | Mean age ($\pm$ SD) of the Top 100 swimmers by event for Para and Non-disabled females and males.

		Female			Male		
		Para	Non-disabled	<i>p</i>	Para	Non-disabled	<i>p</i>
Freestyle	50	21.3 $\pm$ 3.9	23.8 $\pm$ 4.4	*	23.3 $\pm$ 3.7	23.9 $\pm$ 3.3	
	100	20.7 $\pm$ 3.5	22.5 $\pm$ 3.7	*	22.7 $\pm$ 3.9	23.4 $\pm$ 2.9	
	200	20 $\pm$ 3.3	21.2 $\pm$ 3.1	*	21 $\pm$ 3.5	22.7 $\pm$ 3	*
	400	20.6 $\pm$ 4.7	20.8 $\pm$ 3.5		21.5 $\pm$ 3.8	22.1 $\pm$ 3	
Butterfly	50	20.6 $\pm$ 3.8	22.9 $\pm$ 4	*	23.2 $\pm$ 4.3	23.6 $\pm$ 3.7	
	100	20.6 $\pm$ 3.8	22.3 $\pm$ 3.8	*	22.5 $\pm$ 3.7	23.4 $\pm$ 3.3	
Backstroke	50	19.7 $\pm$ 4.1	22.1 $\pm$ 4.3	*	22.9 $\pm$ 5.4	23.3 $\pm$ 3	
	100	20.2 $\pm$ 3.6	21.7 $\pm$ 3.9	*	22.8 $\pm$ 4.5	22.9 $\pm$ 3.4	
Breaststroke	50	20.3 $\pm$ 4.3	21.7 $\pm$ 3.9	*	22.9 $\pm$ 5.2	24.2 $\pm$ 3.1	*
	100	20.3 $\pm$ 3.9	22 $\pm$ 3.7	*	23.4 $\pm$ 4.6	23.8 $\pm$ 3.2	
Individual medley	200	20.2 $\pm$ 3.5	20.8 $\pm$ 3.1		21.7 $\pm$ 3.5	22.6 $\pm$ 2.5	*

*Indicates a significant age difference ($p \leq 0.05$) between Para and Non-disabled swimmers for female and male.

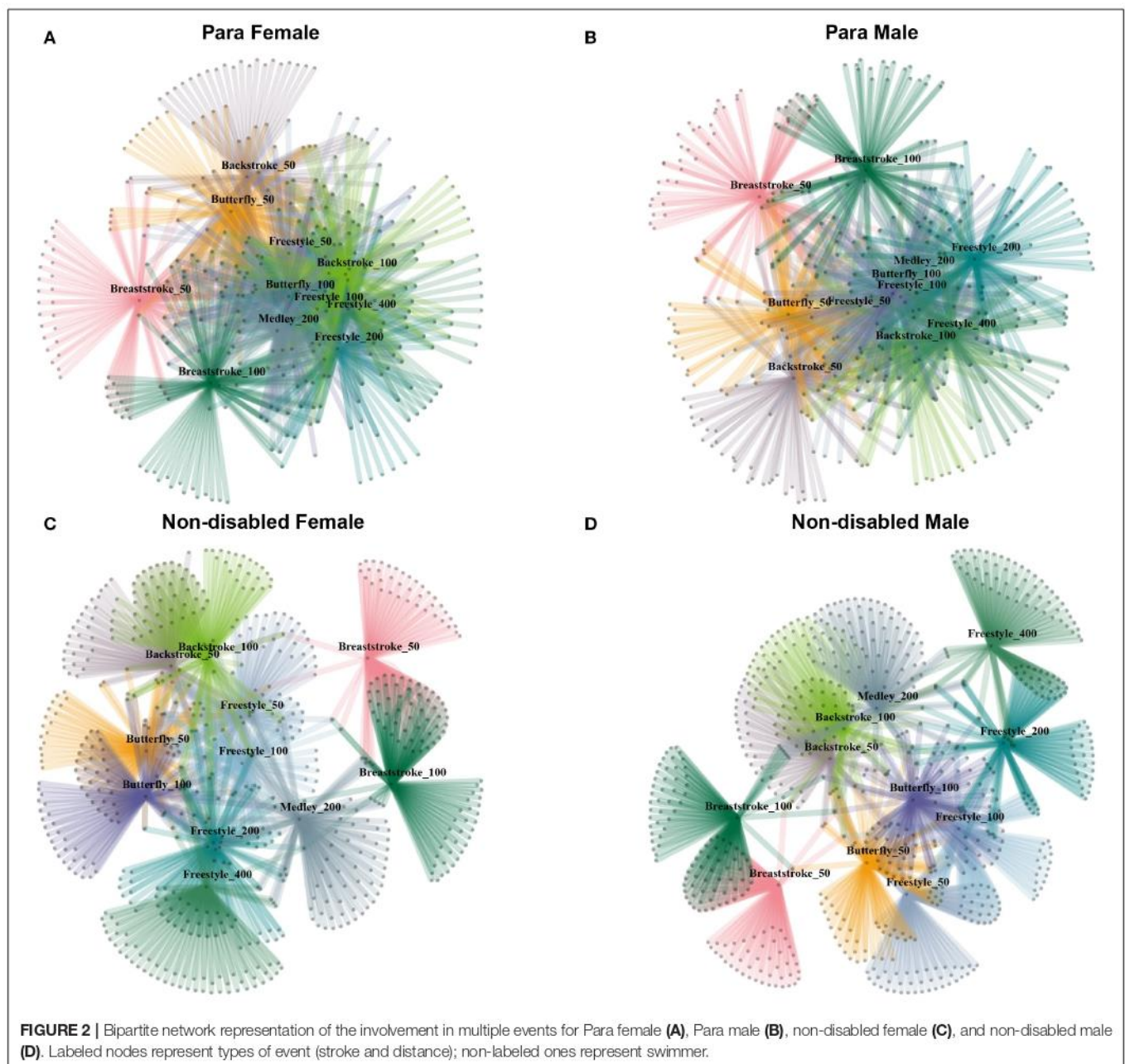
level of $90.7 \pm 2.7\%$. For female NDS, the performance level for all strokes was at $96 \pm 1.1\%$ when compared with the best performances. The smallest difference between the mean and best performances was for backstroke with a performance level of $96.6 \pm 1\%$ (Figure 3).

For male PS, the performance level for all strokes was $89.5 \pm 3.3\%$ when compared with the best performances. The smallest difference between the mean and best performances was for the IM with a performance level of $91.8 \pm 2.4\%$. For male NDS, the performance level for all strokes was $96.2 \pm 1.1\%$ when compared with the best performances. The smallest difference between the mean and best performances was for backstroke with a performance level of $96.7 \pm 1.0\%$ (Figure 3).

When all events were combined, we found that participating in more race events was significantly associated with higher

performance levels for female PS (Figure 4A). There was a significant increase in performance levels between the group that swam one race event ([1,2]: $85 \pm 3.2\%$), two race events ([2,3]: $86.7 \pm 2.5\%$), three or four race events ([3,5]: $88.8 \pm 2.5\%$), and more than five race events ([5,11]: $90.6 \pm 2.5\%$). For the male PS (Figure 4B), the performance levels for the different groups of race event numbers were: $87.7 \pm 3.4\%$ for [1,2], $89.3 \pm 3.4\%$ for [2,3], $90.3 \pm 2.0\%$ for [3,5], and $92.2 \pm 2.1\%$ for [5,11] with no significant difference between group [2,3] and group [3,5].

When all race events were combined for female and male NDS (Figures 4C,D), they had significantly higher performance levels when they were involved in two or more race events. The performance levels for female NDS in the different event groups were $95.6 \pm 1.0\%$ for [1,2], $96.1 \pm 1.2\%$ for [2,3], and $96.5 \pm 1.0\%$

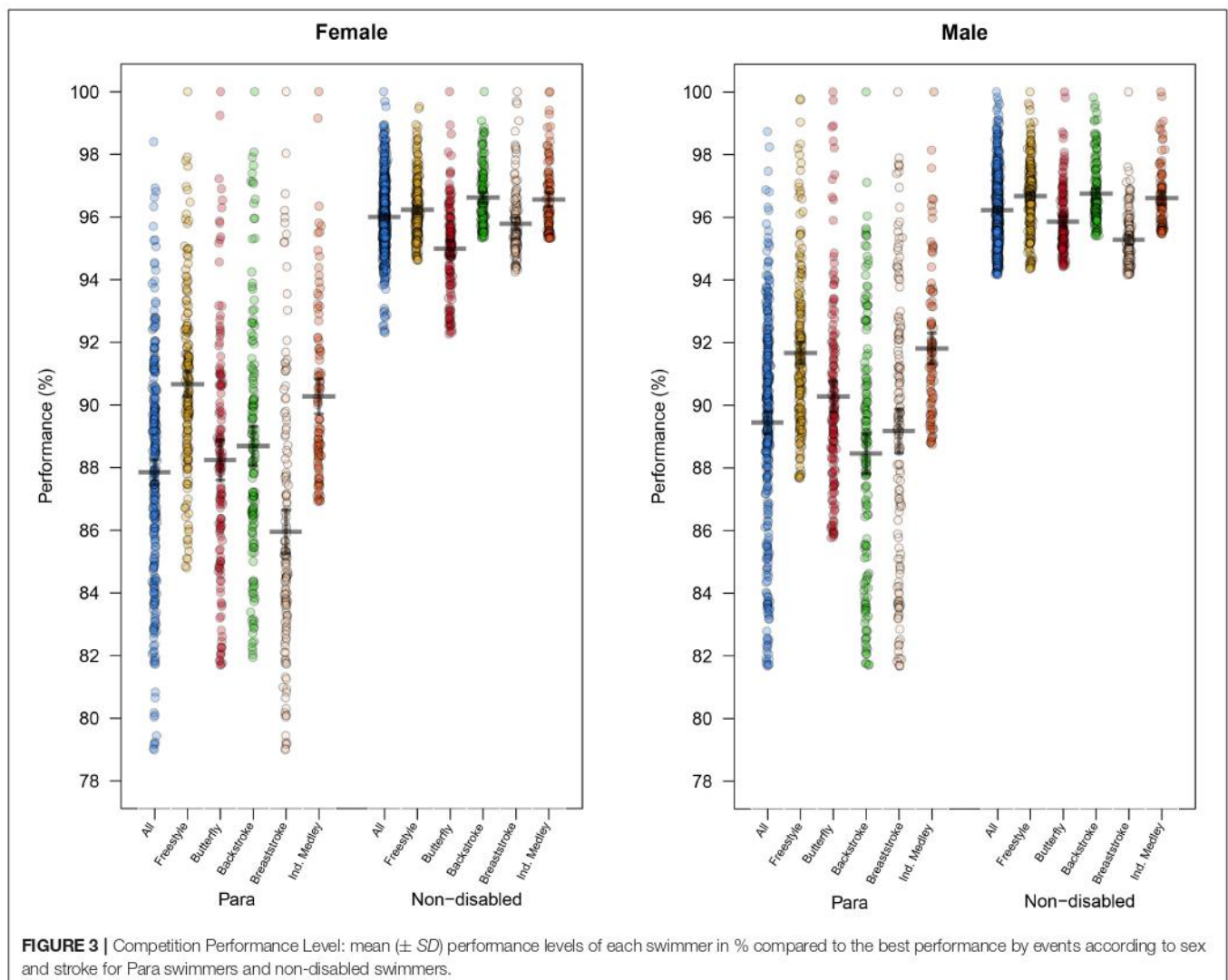


for [3,8] (Figure 4C) with a significant increase present between [1,2) and [2,3). For male NDS, the performances significantly increased between the event groups, with performance levels of $96.0 \pm 1.1\%$ for [1,2), $96.5 \pm 1\%$ for [2,3), and $97.0 \pm 0.9\%$ for [3,8] (Figure 4D).

DISCUSSION

This study was the first to quantify the involvement across multiple race events for the female and male international PS and NDS. The main findings of the present study show that:

- As a consequence of the sampling method, this study focused on the less impaired PS. The majority of the Top 100 PS were with intellectual, no or minimal motor, or slight visual disabilities with 65% of the females were from the classifications 9,10, and 13 and 70% of the males were from the classifications 10,13, and 14;
- Para swimmers with minimal or no motor impairment were involved in a wider range of race events (strokes and distances) compared to NDS, with the most common combinations found across the same stroke and similar distances;
- There is a less concentrated competition field for PS; as shown in Figure 3, the mean performance gap to the faster PS is



greater on all race events compared to the NDS which are highly concentrated near to the best performance;

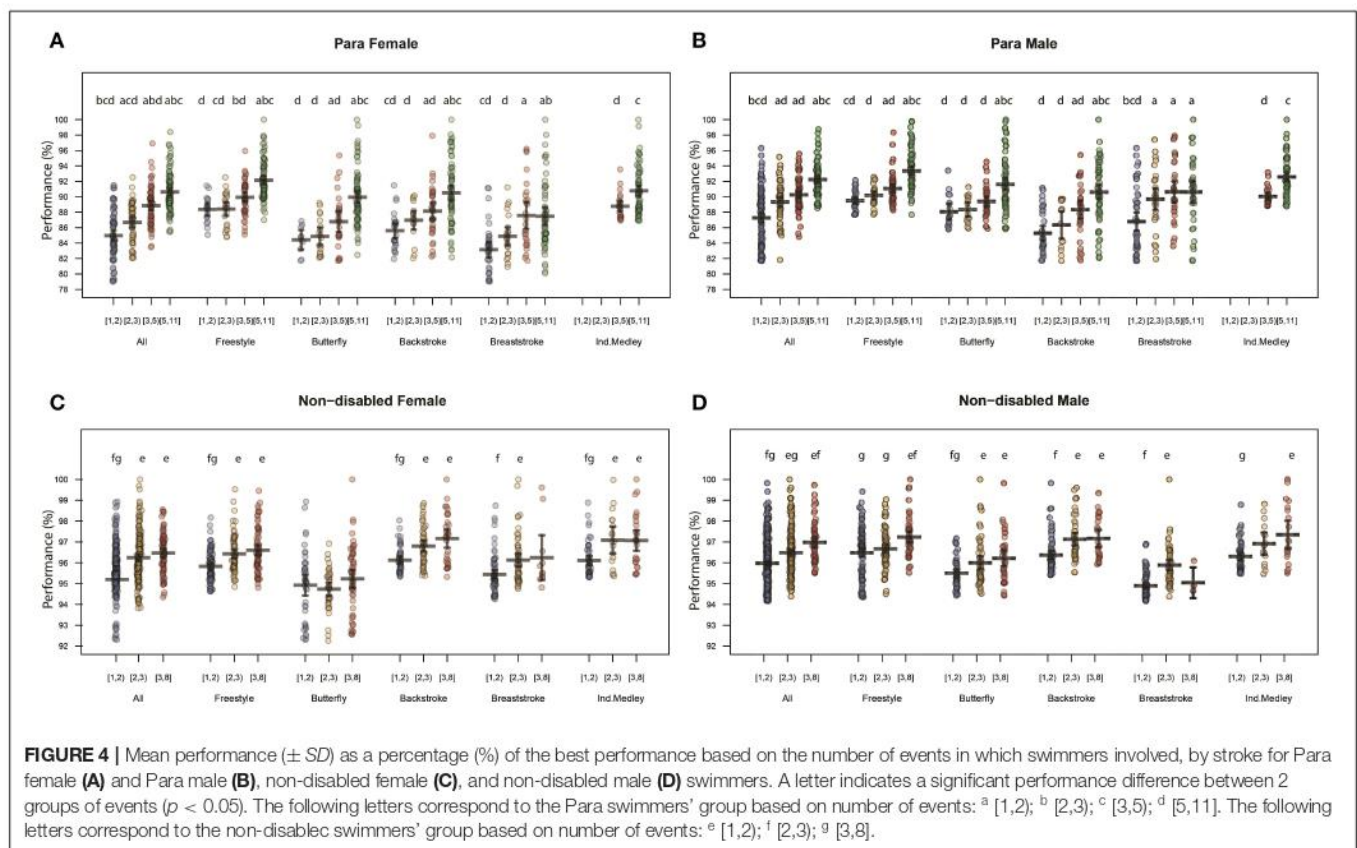
- Higher performance levels were present for PS with minimal or no motor impairment who took part in more race events, especially among females;
- In the majority of the race events analyzed, female PS were younger than female NDS.

Multiple Race Event Involvement and Competition Concentration

The first finding of this study was that PS were involved in more race events than NDS. Additionally, compared to NDS, there were fewer (1/2 the competitors) PS entered in race events. Overall, females were entered in more race events than males. The majority of PS participated in more than 5 race events while NDS participated in only one or two race events, which is in accordance with the previous research on NDS (Dormehl and Williams, 2016).

Para swimmers competed in events across different strokes, which require different technical and biomechanical capabilities (Pyne and Sharp, 2014; Mooney et al., 2015). In general, swimming is characterized by a sequence of coordinated actions of the trunk and limbs. Arm movement during each of the four competitive swimming strokes comprises specific phases including various sweeps, specific to each stroke (Mooney et al., 2015). Breaststroke and butterfly have more complex arm movements and kicks than backstroke or freestyle (Bartolomeu et al., 2018), but cannot be reduced to these characteristics alone as coordination, breathing, and other movements need to be considered as well (Seifert et al., 2014).

The network analysis visualization allows a good understanding of the combinations between PS and NDS. Based on the results, NDS appeared to be stroke specialists (Stewart and Hopkins, 2000; Dormehl and Williams, 2016) while this observation seemed less prevalent among PS. However, the race events with the most overlap between swimmers were race events of the same stroke (e.g., 50 and 100 m freestyle), which



were also the most common combinations among able-bodied swimmers (Dormehl and Williams, 2016). Breaststroke was least frequently swum in combination with other strokes. This suggests that breaststroke swimmers are very specialized, especially for NDS, which could be due to a specialization acquired at an early age (Dormehl and Williams, 2016). The most frequent combinations for PS in breaststroke remain with the same distance for different stroke styles (e.g., 50 m) and could mean that despite their impairment, PS choose a race event based on the distance and stroke characteristics if the event is available for the impairment classification.

Regarding the IM, female and male PS had overlap with a variety of strokes (freestyle, breaststroke, and backstroke), all at the same 100 m distance. For NDS, the 200 m freestyle was the most commonly combined race event with the IM, which is consistent with previous findings that show NDS opting to swim this event in addition to their specialty (Dormehl and Williams, 2016).

These differences in race event involvement between PS and NDS could be due to several factors. Mainly, there are fewer swimmers in the PS race events and a fewer race events available to each of the PS classes leading to less concentrated competitions than there are in NDS competitions. The consequence of this low competition is that PS could be involved in different stroke style race events to reach a podium even if it is not their specialization. For the same number of performances, PS swimmers are half the number of NDS swimmers. Additionally, it could be due to the use of classifications, which aim to enable fairness between

swimmers (Wu and Williams, 1999; Burkett et al., 2018; Payton et al., 2020) but also lead to a reduced number of swimmers in each race event. For example, in the international para competitions, the low numbers of swimmers in some race events means that there are not enough competitors to warrant heats and therefore swimmers often advance directly to finals (Fulton et al., 2009) and possibly reach the podium.

The Performance Levels and the Impairment Distributions

Another important finding of this study was that the high-performance levels were associated with PS who were involved in multiple race events. Firstly, the difference between the mean performance level and the best performance level was greater and had a wider standard deviation for PS compared to NDS, demonstrating a less competitive field overall with a wider range of capabilities for PS. Between sexes, the difference between the mean and best performances was larger for female PS compared with male PS, reflecting a more competitive field among males. This difference between sexes was less pronounced for the NDS. These two findings may indicate a distinction: NDS are specialized in a swim stroke, distance, or race event based on their characteristics; The PS, despite their stroke characteristics, are willing to participate in secondary events because the low number of swimmers could allow to succeed in an event in which they are not specialized if the race is available to their impairment class.

Para swimmers follow traditional periodized patterns of variable training volume before important competitions similar

to those observed in competitive swimmers competing at the Olympic level (Fulton et al., 2010) and the staff, coaches and athletes are more and more in a process of professionalization (Fulton et al., 2010). However, due in large part to the impact of impairment, performance levels between PS and NDS do not seem to be comparable. This is true across several sports (Grobler et al., 2015; Burkett et al., 2018; Schipman et al., 2019). In swimming, PS with minimal impairments still have performance detriments in comparison with their NDS counterparts (Taylor et al., 2016). This difference can be found right from the swim-start (Dingley et al., 2014).

Overall, PS involved in one race event showed no significant performance difference compared to swimmers involved in two race events. This shows that the best performances were achieved by swimmers who swam in several race events. Indeed, PS who performed in more than five race events had a significantly higher performance level than others. Specifically, for the freestyle race events, the difference between the mean performance and best performance was smaller and could be explained by a higher competition concentration of PS. For both male and female PS in breaststroke and male PS in backstroke, the difference between the mean and best performances was larger, showing a more heterogeneous level across the competitors. The Para swimmers who swam breaststroke were the least likely to be involved in more than five race events and who did not perform better for those who did more than five race events., highlighting the increased specificity for this stroke. This could be explained by the technical specificity of breaststroke (Mooney et al., 2015) and a greater number of swimmers from impairment classifications 7, 8, and 9.

The majority of NDS swam between 1 and 2 race events, which resulted in the highest level of performance. Except for men's freestyle and the category where we combined all strokes, swimmers who swam in two race events and more performed significantly better than those who have been involved in one race event. Specialization (Yustres et al., 2019; Staub et al., 2020) among NDS at an early age, which can optimize morphological characteristics (Pla et al., 2019), could explain the differences. However, this is still strongly debated. For the IM, similar trends were observed with higher performance levels existing based on the number of events. Moreover, none of the PS participated exclusively in this event, showing no specialization for this race event.

The impact of impairment on swimming performance is well-demonstrated (Wu and Williams, 1999; Burkett et al., 2018) and appears to be consistent with the impairment classification distribution of the top 100 swimmers per event in this study. By selecting the top 100 Para swimmers, the lower classes 1–6 were inevitably excluded from the analysis whereas the classes 9, 10, 13, and 14 were the most represented. Indeed, PS from the classifications 9–14 experience the lowest passive drag (Oh et al., 2013), a greater functional ability despite activity limitations for swimmers with limb deficiencies (Hogarth et al., 2018), fewer musculoskeletal limitations, and also benefit more substantially from traditional strength and conditioning sets, skill drills, and pacing strategies (Fulton et al., 2009). In the swim-start phases, swimmers with no physical

disabilities were significantly faster compared to swimmers with physical disabilities (Dingley et al., 2014), which were well-represented in this study by swimmers in the classifications 13 and 14. Para swimmers may improve more through training optimization that is developed for their impairment level and targeted at developing muscle mass and upper-body power (Dingley et al., 2015).

Age

The results showed that female PS were generally younger than female NDS, while there were few significant differences observed among males. The mean age of the top 100 NDS were consistent with previous studies on age-related swimming performance and relatively young compared to other sports which is confirmed by the scientific literature (Allen and Hopkins, 2015; Knechtel et al., 2016; Marck et al., 2019). However, this study didn't analyze the age-peak performance.

However, for PS, these findings should be considered according to the impairment type, the origin and development of the disability, either born with it or acquired later in life. Indeed, most of the swimmers in the study have slight disabilities. It would be interesting to have this information in order to study the time required to reach the maximal potential capacity and understand the mean age of the PS.

Study Limitations

Not all race events were swum by all swimmers, which did not allow us to analyze the performance level by specific race event and instead we were limited to the cumulative events across a stroke. Due to a lack of data and the sampling method, only the PS with no or light impairment were represented in the top 100 and as a consequence, swimmers with a high degree of impairment (1–6) were not represented whether over half of the sports classes. Furthermore, the longest distance swum by the PS was the 400 m, so it is difficult to conclude if specialization occurs by distance.

Perspectives

It would be interesting to further these analyses to all swimmers who participate in the Paralympic Games. However, the amount of data available is currently insufficient.

The results may also highlight the fact that it could be necessary to participate in several race events to increase the chances of victory depending on the level of competition in any specific race event. Indeed, it may be useful to analyze the level of competition in certain events to try to compete even if it is not the swimmer's specialty.

CONCLUSION

Para swimmers showed a higher involvement in multiple race events compared to NDS. The PS competed across all race events while the NDS appeared to be more specialized in 1 or 2 strokes over several distances. The more race events in which PS took part, the higher the mean level of performance compared with the top performer. The greatest difference between the mean performance and the best performance

among PS was seen when there was a less competitive field, which was linked to a lower number of international PS. The lower number of competitors could be explained by fewer people practicing and competing due to a variety of difficulties that come with swimming. In this context, PS are capable of competing in many race events, while impairment classifications allow the race event to remain competitive with regard to swimmers' disabilities.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

Publicly available datasets were analyzed in this study. This data can be found at: https://drive.google.com/file/d/1LZem2o74dWRQKTHHDDP9uw_3wbeNw996/view?usp=sharing.

ETHICS STATEMENT

This study was designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport) scientific committee. It used a research protocol classified as non-interventional, in which all acts are performed in a normal manner, without any supplemental or unusual procedure of

diagnosis or monitoring. (Article L1121-1 of the French Public Health Code).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

JS, GS, BL, AM, NF, J-FT, and AS conceived and designed the research. JS, GS, BL, AM, J-FT, and AS performed and analyzed the research. JS and GS wrote the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

FUNDING

This work was supported by the Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Stephanie Duncombe for proofreading the manuscript. They thank the INSEP teams, the French National Sport Agency (ANS), the French disabled sports federation (FFH), and the French Paralympic and Sports Committee (CPSF) for their full support. In addition, the authors thank all the curators of the IPC and FINA websites.

REFERENCES

- Allen, S. V., and Hopkins, W. G. (2015). Age of peak competitive performance of elite athletes: a systematic review. *Sports Med. Auckl. NZ* 45, 1431–1441. doi: 10.1007/s40279-015-0354-3
- Bartolomeu, R. F., Costa, M. J., and Barbosa, T. M. (2018). Contribution of limbs' actions to the four competitive swimming strokes: a nonlinear approach. *J. Sports Sci.* 36, 1836–1845. doi: 10.1080/02640414.2018.1423608
- Baxter-Jones, A. D. G., and Maffulli, N. (2002). Intensive training in elite young female athletes. Effects of intensive training on growth and maturation are not established. *Br. J. Sports Med.* 36, 13–15. doi: 10.1136/bjsm.36.1.13
- Berthelot, G., Bar-Hen, A., Marck, A., Foulonneau, V., Douady, S., Noirez, P., et al. (2019). An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Sci. Rep.* 9:418. doi: 10.1038/s41598-018-36707-3
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., Guillaume, M., Vollmer, J.-C., et al. (2012). Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *AGE* 34, 1001–1009. doi: 10.1007/s11357-011-9274-9
- Berthelot, G., Sedeaud, A., Marck, A., Antero-Jacquemin, J., Schipman, J., Saulière, G., et al. (2015). Has athletic performance reached its peak? *Sports Med. Auckl. NZ* 45, 1263–1271. doi: 10.1007/s40279-015-0347-2
- Burkett, B., Payton, C., Van de Vliet, P., Jarvis, H., Daly, D., Mehrkuehler, C., et al. (2018). Performance characteristics of para swimmers: how effective is the swimming classification system? *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 29, 333–346. doi: 10.1016/j.pmr.2018.01.011
- Dingley, A., Pyne, D. B., and Burkett, B. (2014). Phases of the swim-start in Paralympic swimmers are influenced by severity and type of disability. *J. Appl. Biomech.* 30, 643–648. doi: 10.1123/jab.2013-0321
- Dingley, A. A., Pyne, D. B., and Burkett, B. (2015). Relationships between propulsion and anthropometry in paralympic swimmers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 10, 978–985. doi: 10.1123/ijsp.2014-0186
- Dormehl, J. S., and Williams, A. C. (2016). Stability of within-sport specialisation in competitive adolescent sub-elite swimmers. *Int. J. Perform. Anal. Sport.* 16, 12–28. doi: 10.1080/24748668.2016.11868867
- Fulton, S. K., Pyne, D., Hopkins, W., and Burkett, B. (2009). Variability and progression in competitive performance of paralympic swimmers. *J. Sports Sci.* 27, 535–539. doi: 10.1080/02640410802641418
- Fulton, S. K., Pyne, D. B., Hopkins, W. G., and Burkett, B. (2010). Training characteristics of paralympic swimmers. *J. Strength Cond. Res.* 24, 471–478. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181c09a9e
- Grobler, L., Ferreira, S., and Terblanche, E. (2015). Paralympic sprint performance between 1992 and 2012. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 10, 1052–1054. doi: 10.1123/ijsp.2014-0560
- Hogarth, L., Payton, C., Van de Vliet, P., Connick, M., and Burkett, B. (2018). A novel method to guide classification of para swimmers with limb deficiency. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 28, 2397–2406. doi: 10.1111/sms.13229
- Kamada, T., and Kawai, S. (1989). An algorithm for drawing general undirected graphs. *Inf. Process. Lett.* 31, 7–15. doi: 10.1016/0020-0190(89)90102-6
- Knechtle, B., Bragazzi, N. L., König, S., Nikolaidis, P. T., Wild, S., Rosemann, T., et al. (2016). The age in swimming of champions in world championships (1994–2013) and olympic games (1992–2012): a cross-sectional data analysis. *Sports Basel Switz.* 4:17. doi: 10.3390/sports4010017
- Lepers, R., Stapley, P. J., and Knechtle, B. (2012). Gender differences in wheelchair marathon performance - oita international wheelchair marathon from 1983 to 2011. *Open Access J. Sports Med.* 3, 169–174. doi: 10.2147/OAJSM.S37819
- Marck, A., Antero, J., Berthelot, G., Johnson, S., Sedeaud, A., Leroy, A., et al. (2019). Age-related upper limits in physical performances. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 74, 591–599. doi: 10.1093/gerona/gly165
- Marck, A., Antero, J., Berthelot, G., Saulière, G., Jancovici, J.-M., Masson-Delmotte, V., et al. (2017). Are we reaching the limits of homo sapiens? *Front. Physiol.* 8:812. doi: 10.3389/fphys.2017.00812
- Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Quinlan, L. R., and ÓLaighin, G. (2015). Inertial sensor technology for elite swimming performance analysis: a systematic review. *Sensors* 16:18. doi: 10.3390/s16010018
- Oh, Y.-T., Burkett, B., Osborough, C., Formosa, D., and Payton, C. (2013). London 2012 Paralympic swimming: passive drag and the classification system. *Br. J. Sports Med.* 47, 838–843. doi: 10.1136/bjsports-2013-092192
- Payton, C., Hogarth, L., Burkett, B., Van de Vliet, P., Lewis, S., and Oh, Y.-T. (2020). Active drag as a criterion for evidence-based classification in para swimming. *Med. Sci. Sports Exerc.* doi: 10.1249/MSS.0000000000002281

- Pla, R., Leroy, A., Massal, R., Bellami, M., Kaillani, F., Hellard, P., et al. (2019). Bayesian approach to quantify morphological impact on performance in international elite freestyle swimming. *BMJ Open Sport Exerc. Med.* 5:e000543. doi: 10.1136/bmjsem-2019-000543
- Pyne, D. B., and Sharp, R. L. (2014). Physical and energy requirements of competitive swimming events. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 24, 351–359. doi: 10.1123/ijsnem.2014-0047
- Schipman, J., Gallo, P., Marc, A., Antero, J., Toussaint, J.-F., Sedeaud, A., et al. (2019). Age-related changes in para and wheelchair racing athlete's performances. *Front. Physiol.* 10:256. doi: 10.3389/fphys.2019.00256
- Seifert, L., Komar, J., Barbosa, T., Toussaint, H., Millet, G., and Davids, K. (2014). Coordination pattern variability provides functional adaptations to constraints in swimming performance. *Sports Med.* 44, 1333–1345. doi: 10.1007/s40279-014-0210-x
- Staub, I., Zinner, C., Bieder, A., and Vogt, T. (2020). Within-sport specialisation and entry age as predictors of success among age group swimmers. *Eur. J. Sport Sci.* 20, 1160–7. doi: 10.1080/17461391.2019.1702107
- Stewart, A. M., and Hopkins, W. G. (2000). Consistency of swimming performance within and between competitions. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32, 997–1001. doi: 10.1097/00005768-200005000-00018
- Taylor, J. B., Santi, G., and Mellalieu, S. D. (2016). Freestyle race pacing strategies (400 m) of elite able-bodied swimmers and swimmers with disability at major international championships. *J. Sports Sci.* 34, 1913–1920. doi: 10.1080/02640414.2016.1142108
- Tweedy, S., and Howe, P. D. (2010). "Introduction to the Paralympic Movement," in *The Paralympic Athlete*, eds Y.C. Vanlandewijck and W.R. Thompson (John Wiley & Sons, Ltd), 1–30. d
- World Para Swimming (2017). *World Para Swimming Classification Rules and Regulations*. Bonn: International Paralympic Committee.
- Wu, S. K., and Williams, T. (1999). Paralympic swimming performance, impairment, and the functional classification system. *Adapt. Phys. Act. Q.* 16, 251–270. doi: 10.1123/apaq.16.3.251
- Yustres, I., Santos Del Cerro, J., Martín, R., González-Mohino, F., Logan, O., and González-Ravé, J. M. (2019). Influence of early specialization in world-ranked swimmers and general patterns to success. *PLoS ONE* 14:e0218601. doi: 10.1371/journal.pone.0218601

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2021 Schipman, Saulière, Le Toquin, Marc, Forstmann, Toussaint and Sedeaud. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

6. Discussion générale

L'évolution des meilleures performances en para athlétisme et para natation, ainsi que les facteurs de la performance, tels que l'âge, l'origine du handicap et la capacité des para nageuses et para nageurs de haut niveau à participer à plusieurs épreuves dans des distances et styles différents ont été étudiés dans cette thèse.

Les objectifs principaux de ce travail étaient :

- 1) d'observer l'évolution des meilleures performances en compétitions en para athlétisme et en para natation ;
- 2) de modéliser l'effet de l'âge sur les performances maximales chez les para athlètes et d'étudier l'impact de l'origine du handicap visuel sur l'âge au pic de performance et le niveau atteint en athlétisme et natation ;
- 3) d'analyser la participation des para nageuses et nageurs à plusieurs épreuves et ses implications en comparaison à leurs homologues valides.

Entre 2010 et 2019, les meilleures performances en para athlétisme et para natation toutes épreuves confondues ont progressé, contrairement aux performances réalisées par les sportifs valides qui ont stagné ou progressé modestement. L'année 2020 a été marquée par un recul important des performances, causé par la pandémie de Covid-19 (Etude 1).

Dans la pluralité des facteurs de la performance, l'âge des sportifs est identifié comme un paramètre prépondérant. Les trajectoires de performance maximale selon l'âge suivent une relation biphasique similaire à celle des athlètes valides ; elles sont observées chez les para athlètes évoluant debout comme en fauteuil (Etude 2). Estimé avec l'équation de Moore, l'âge au pic de performance varie en fonction du sexe, du type de handicap et de l'épreuve. Chez les para nageurs avec un handicap visuel important et sévère, les trajectoires de performances fluctuent selon l'origine innée ou acquise du handicap (Etude 3). Pour autant, le niveau moyen de performance maximal atteint n'est pas différent.

En natation, la participation à un plus grand nombre d'épreuves des para nageuses et nageurs, avec une sévérité du handicap modérée à légère, par rapport aux nageuses et nageurs valides a été mise en exergue (Etude 4). Cette multi-participation ne se fait pas au détriment des

performances, en particulier chez les para nageuses et suggère que les para nageuses et nageurs les plus rapides ne se limitent pas à leur nage de préférence.

A travers cette thèse, les résultats de l'étude 1 permettent de comprendre où se situent actuellement les para sportives et para sportifs en termes d'évolution des performances dans deux sports Paralympiques majeurs. Ces performances traduisent les investissements humains, économiques et technologiques, l'optimisation des programmes d'entraînement et la prise en charge médicale. Les études 2, 3 et 4 permettent de nous éclairer sur des facteurs de performance jusqu'ici non étudiés dans la littérature scientifique propre au champ Paralympique, avec une approche centrée sur les performances réalisées en compétition. Ces études et leurs constats amènent à des compréhensions et perspectives nouvelles.

Apports et limites

Etude 1

Apports

L'étude 1 confirme l'hypothèse préalablement posée et montre ainsi que les performances en para athlétisme et en para natation réalisées entre 2010 et 2019 par les 10 meilleurs performeurs annuels ont progressé significativement dans différentes disciplines et classifications éligibles aux JP. En ce qui concerne les performances des sportifs valides, cette étude confirme la plupart des stagnations ou faibles progressions déjà observées dans des études précédentes (6,7).

Dans la littérature scientifique, cette étude est la première à considérer les performances dans l'ensemble des épreuves concernées en para athlétisme et para natation chez les femmes et les hommes. Ces progressions, propres au champ Paralympique, peuvent s'expliquer en partie par des progrès technologiques, un important investissement humain, l'optimisation des programmes d'entraînements spécifiques, une très bonne prise en charge médicale associée à de meilleures modalités de récupération.

Pour arriver à ces résultats, l'étude des moyennes mobiles permet de tenir compte, non seulement de la variabilité des performances mais aussi des cyclicités Paralympique et Olympique. Le calcul des pentes de progression sur moyenne mobile fournit une mesure de la progression année après année sur l'ensemble de la période étudiée. Dans la littérature, les principales études ont fait une analyse descriptive des évolutions annuelles (11,71,72,76) ou ont employé des régressions linéaires (12). En appliquant un tel modèle sur des performances réalisées par des athlètes en fauteuil ayant participé à une compétition référencée au CIP entre 2009 et 2019, les auteurs n'ont pas pris en compte les variabilités intra- et interindividuelles des performances ni leur cyclicité annuelle. Par ailleurs, ils ont conclu que dans certaines épreuves, les performances ne se sont pas améliorées sur la période étudiée (49), ce qui ne correspond pas à la réalité pour une majorité d'épreuves.

Les performances réalisées durant l'année 2020 ont également été étudiées afin de quantifier l'impact de la pandémie de Covid 19 chez les meilleurs para sportifs et valides. Les résultats montrent que la baisse des performances en 2020 est plus importante pour les para sportifs que pour leurs homologues valides. Cette différence pourrait être due à une plus faible densité d'athlètes, à une plus grande variabilité des performances au sein et entre chaque classe de

handicap mais également à un accès aux compétitions plus restreint pour les sportifs en situation de handicap durant cette année.

Afin de mieux comprendre cette baisse transitoire des performances, l'identité des sportifs constituant le top 10 a été étudiée chaque année depuis 2010, afin de calculer le taux de stabilité par rapport aux années précédentes. En 2020, le taux de stabilité a été deux fois plus faible que celui observé lors des années post JP/JO (années où le renouvellement au sein du top 10 est historiquement le plus important), témoignant d'un renouvellement inhabituel. Enfin, la cyclicité des performances sur 4 ans, bien établie dans la littérature, se reflète ici aussi dans l'augmentation des taux de stabilité jusqu'en 2012 puis sur le nouveau cycle jusqu'en 2016.

Limites

Une des limites majeures de l'étude 1 est la variabilité des données disponibles en para athlétisme et para natation, ce qui restreint le champ des fonctions mathématiques applicables. Ajuster des modèles non linéaires adaptés aux séries temporelles, telles que des données de performances sportives, permettrait comme pour les performances des sportifs valides, d'étudier les fonctions évolutives et de potentielles asymptotes selon les épreuves (8,51). Pour pallier les manques de données et démontrer la significativité des progressions ou stagnations, un test de Wilcoxon et un test post-hoc avec correction de Bonferroni ont été effectués pour vérifier si les pentes de progressions (tangentes aux moyennes mobiles) différaient de 0. Les performances des sportifs valides progressent très faiblement, de façon significative.

L'échantillon étudié, composé des 10 meilleurs performeurs par épreuve, a pu introduire un biais de sélection. Cet échantillon peut en effet ne pas être représentatif de la population d'intérêt et ainsi biaiser l'interprétation de la dynamique du « vivier », c'est-à-dire à l'ensemble des sportifs. De plus, afin d'obtenir des résultats plus robustes et réduire la variabilité au sein de chaque classe, des regroupements par type et sévérité de handicap ainsi qu'une restitution des résultats par discipline ont été réalisés, pouvant aboutir à un lissage des relations observées.

Perspectives

L'année 2020 restera unique dans l'histoire du sport comme elle l'a été pour l'ensemble des activités humaines. Son impact sur les performances des meilleurs sportifs internationaux a été considérable. Afin d'évaluer la hauteur de cette atypicité et vérifier qu'elle n'impactera pas la dynamique des performances observées jusqu'en 2019, il sera nécessaire de continuer à étayer ces données en compétition afin d'étudier jusqu'où pourraient éventuellement progresser les sportives et sportifs Paralympiques. Pour compléter et confirmer les résultats observés, il faudrait également analyser l'évolution annuelle des records du monde, dans un premier temps, en para natation et para athlétisme depuis que le nombre de classifications éligibles aux JP est stable, et dans un second temps, dans d'autres sports Paralympiques, tels que le cyclisme sur piste et l'haltérophilie, où la performance est également quantifiable.

Etude 2

Apports

L'étude 2 a, pour la première fois, caractérisé la relation âge-performance chez des sportifs Paralympiques. Les trajectoires de performance, modélisées avec l'équation de Moore, conduisent à un niveau supplémentaire de démonstration de cette relation confirmant l'hypothèse préalablement posée pour le sport Paralympique. Largement investie dans la littérature, la relation âge-performance chez les sportifs valides a démontré des patterns similaires avec des âges au pic de performance des meilleurs athlètes et nageurs mondiaux, respectivement de 26 ans et 21 ans (14). En tennis, l'âge au pic de performance des 10 meilleurs joueurs et joueuses mondiales est respectivement de 24,1 ans et 21,5 ans (18). Ce pattern se décompose en 3 phases : une première phase de progression qui reflète le développement, une deuxième phase qui correspond aux performances optimales incluant le pic de performance, et une troisième phase de régression au cours de laquelle les performances diminuent.

Le pattern illustré sur la figure 21 est similaire pour tous les sportifs, valides ou en situation de handicap. Cependant ces derniers expriment leurs capacités maximales avec, selon le type de handicap, un écart de performance spécifique.

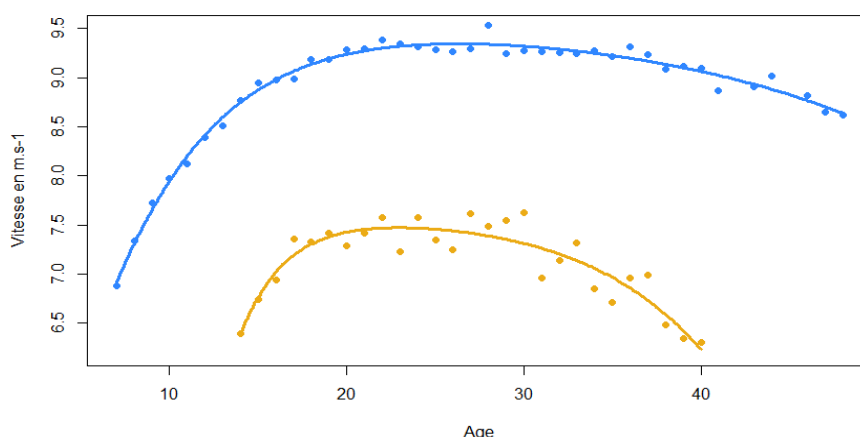


Figure 21 : Performance maximale (en m/s^{-1}) selon l'âge, au 100 m féminin valide (courbe bleue) et au 100 m féminin T37 (paralysie cérébrale) (courbe jaune).

Suite à la publication de l'étude 2, la relation âge-performance a été étudiée par l'équipe de Hogarth et coll. (34) en para natation à travers l'utilisation d'un modèle linéaire mixte à effets fixes. Cette étude a établi une relation similaire à celle observée chez les para athlètes avec des pics de performance situés entre 20 et 21 ans correspondant à ceux des meilleurs nageurs valides (14). Cependant, les auteurs ont exclu des analyses toutes les performances réalisées à des âges supérieurs à 35 ans afin de stabiliser les régressions et éviter une trop grande variabilité. L'étude 2 porte quant à elle sur l'exhaustivité des données disponibles de performances réalisées en compétition.

L'étude 2 a également mis en avant une augmentation de l'âge au pic avec l'augmentation de la distance dans des épreuves de courses pour les athlètes évoluant debout et en fauteuil. Ce résultat se retrouve dans la littérature (17) et représente un second niveau de démonstration de la robustesse du modèle de Moore.

Dans ce cadre, la relation qui lie la performance et l'âge permet d'ajouter des éléments précieux dans la compréhension du développement des athlètes et l'identification des talents, domaines du champ Paralympique encore trop peu investis (181).

Limites

Pour établir la relation âge-performance, deux groupes ont été créés (« debout » et « fauteuil »). Dans ces 2 groupes, les athlètes les plus performants, c'est-à-dire les moins impactés par leur handicap, sont principalement représentés. La modélisation de ces trajectoires par classification et sévérité de handicap n'a pu être réalisée en raison d'un manque de données dans certaines classifications.

Cette étude présente également les 100 meilleures performances pour les para athlètes évoluant debout et en fauteuil, selon l'âge et le type de handicap. Ici aussi, le manque de données n'a pas permis d'établir de distinction entre classifications. Cette méthode implique par ailleurs la possibilité qu'un para sportif soit représenté plusieurs fois. Sélectionner les 100 meilleurs performeurs aurait permis d'éviter ce biais de sélection, mais aurait accentué le biais lié au manque de données.

Enfin, prendre en compte la relation âge-performance et la cinétique de dégradation de capacités (dans les cas de maladies dégénératives) dans le système de classification actuel n'est pas aujourd'hui envisagée par les instances internationales. La classification est un processus complexe qui prend en compte une multitude de facteurs.

Perspectives

Afin de caractériser davantage la relation âge-performance, les trajectoires de performances dans plusieurs sports Paralympiques sont actuellement étudiées. C'est en effet l'objectif de l'un des trois lots de travail de PARAPERF, projet retenu dans le cadre du Programme Prioritaire de Recherche – Sport de très haute performance ayant pour objectif d'aider à optimiser la performance des athlètes Paralympiques français lors des prochains JP à Paris en 2024. Cette étude a permis de consolider la validité scientifique de l'utilisation des couloirs de performance comme outil d'aide à la décision, afin de situer les performances d'un para sportif selon son âge et son contexte concurrentiel.

L'illustration de ces performances maximales dans cette étude est le résultat de la sélection des meilleures performances individuelles par âge. Pour autant, ces trajectoires peuvent être asynchrones selon le moment de survenue du handicap (à la naissance ou au cours de la vie). L'évolution des performances avec l'âge peut varier, aussi bien chez des athlètes évoluant debout

qu'en fauteuil. Suite à cette étude, nos recherches portent désormais sur l'analyse des performances maximales en fonction de l'origine du handicap pour l'ensemble des athlètes participant aux JP en athlétisme, en s'appuyant sur l'utilisation du modèle IMAP.

Enfin, les données de performance collectées ont été réalisées entre 2009 et 2017. Si les performances continuent de progresser comme cela a été démontré dans l'étude 1, il serait intéressant d'actualiser ces modélisations sur une nouvelle période de temps afin de regarder si les performances selon l'âge augmentent, pouvant ainsi témoigner d'une expansion phénotypique des performances en para athlétisme selon l'âge, à l'instar des sportifs valides pendant le siècle dernier (182).

Etude 3

Apports

Cette étude est la première à analyser les performances réalisées en compétition selon l'origine innée ou acquise du handicap chez des sportifs de haut niveau en situation de handicap visuel, en natation et athlétisme. Les principaux résultats de l'étude 3 permettent d'apporter des éléments de réponse à des questions visant à optimiser le processus de classification des sportifs en situation de handicap visuel.

En natation, les experts (23) ont déclaré à l'unanimité, qu'un nageur ayant un handicap depuis la naissance aurait un désavantage important, dans le cas où deux nageurs auraient le même niveau de handicap visuel, l'un avec un handicap congénital et l'autre acquis à l'âge adulte. La principale hypothèse évoquée était que disposer d'une vision correcte durant les premières années d'apprentissage permettrait d'acquérir des compétences motrices générales et favoriserait l'apprentissage des techniques spécifiques de la natation.

Au regard des résultats de l'étude 3, quelle que soit l'origine du handicap, les para nageuses et nageurs ne présentent pas des performances moyennes significativement différentes rejetant l'hypothèse initiale selon laquelle le niveau de performance était différent selon l'origine du handicap. De plus, les para nageurs avec une cécité congénitale complète (classe 11) et partielle (classe 12) établissent leur performance maximale plus précocement que ceux ayant un handicap

acquis confirmant ainsi l'hypothèse de départ sur les variations de l'âge au pic de performance selon l'origine du handicap.

En athlétisme, selon une majorité d'experts (24), les performances dans les épreuves de course seraient impactées par l'âge au moment de l'apparition du handicap, que ce soit pour les athlètes avec cécité partielle ou totale. Plusieurs scénarii sont ressortis mais sans véritable consensus de la part des experts: i) les athlètes avec un handicap congénital seraient déjà adaptés à leur condition, ce qui leur donnerait un avantage par rapport un athlète avec un handicap acquis ; ii) les athlètes avec un handicap acquis auraient peut-être eu plus de chances d'acquérir, dès leur plus jeune âge, des capacités motrices fondamentales; iii) si deux athlètes, avec une origine de handicap différente, avaient eu des antécédents sportifs, ils ne profiteraient d'aucun avantage. Les résultats de notre étude en para athlétisme montrent qu'aucune différence significative n'a été observée, en termes de niveau de performance moyen comme d'âge au pic de performance et rejettent ainsi l'hypothèse de départ.

Ces éléments confirment les spécificités à prendre en compte en termes de progression et de potentiel maximal chez les nageuses et nageurs avec handicap visuel, selon l'origine du handicap. Pour autant, cela n'impacte pas suffisamment les performances moyennes obtenues - en para natation et para athlétisme – pour reconsidérer l'origine du handicap dans le système de classification actuel. Seules 3 catégories de handicap visuelles ont été considérées, ces conclusions doivent donc être désormais objectivées sur un plus grand nombre de handicaps.

Enfin, l'utilisation de la fonction IMAP pour modéliser la relation âge-performance, selon l'origine du handicap, apporte un niveau de démonstration supplémentaire de l'effet de l'âge sur la performance chez les para sportives et para sportifs.

Limites

Afin de comprendre les tendances globales, le choix a été fait d'analyser les performances moyennes et les trajectoires de performances maximales selon l'âge. Cependant, certaines performances ou trajectoires individuelles peuvent se révéler supérieures chez des sportives et sportifs ayant acquis leur handicap au cours de la vie (comme illustré sur la figure 2 de l'étude 3).

L'utilisation de la fonction IMAP pour caractériser la relation âge-performance requiert une qualité suffisante des données analysées tant cette fonction amène à un degré supplémentaire de

complexité dans l'appréhension de l'interaction des 5 paramètres entre eux. La variance des points, évaluée via le coefficient de détermination R^2 , est plus ou moins importante vis-à-vis de la fonction de Moore utilisée dans l'étude 2, selon les classes de handicap analysées. Le recul des données limité à 2009, le nombre de para sportifs dans l'échantillon étudié ainsi que les informations disponibles à caractère sensible sur l'origine du handicap peuvent expliquer le faible ajustement de la fonction IMAP aux données, en particulier dans la phase décroissante des courbes de performance.

Enfin, le caractère potentiellement évolutif du handicap visuel (maladie dégénérative) et l'âge d'acquisition n'ont pas été pris en considération. Des maladies dites congénitales, telle que la rétinite pigmentaire, qui est une maladie génétique dégénérative, peuvent permettre l'acquisition de compétences visuelles et motrices fondamentales avant d'atteindre le stade de cécité complète. L'acquisition d'un handicap visuel à l'âge de 3 ans n'aura pas le même impact sur la trajectoire de performance que l'acquisition d'un handicap dix années plus tard. Ces éléments n'ont pu être pris en compte dans cette étude car les informations dans les biographies des para sportifs sont parfois restées lacunaires.

Perspectives

Selon George Box, « Tous les modèles sont des approximations, tous sont erronés, mais certains sont utiles » (183) . Dans l'étude 2 et 3, les modèle de Moore et IMAP ont été utilisés pour caractériser la relation âge-performance. Afin d'exploiter le modèle le plus adapté, des mesures de pertinence à travers les critères du maximum de vraisemblance de BIC (Critères d'Information Bayésiens) et AIC (Critères d'Information d'Akaike) pourront permettre de comparer l'ajustement d'un modèle aux données et de sélectionner le modèle le moins erroné.

L'analyse des trajectoires individuelles est actuellement étudiée par le biais de modèles mixtes suite aux résultats observés dans les études 2 et 3. Le modèle mixte est particulièrement adapté à l'étude des données répétées dans le temps afin de suivre l'évolution d'un marqueur tout en tenant compte de la variabilité intra- et interindividuelle. Les estimations des paramètres d'IMAP permettent de reconstruire les trajectoires individuelles et d'estimer un pic de performance théorique selon l'origine du handicap, ce qui n'est pas réalisable à partir de modélisation utilisant

les maxima de performance à chaque âge. L'utilisation d'un modèle mixte va permettre d'obtenir un niveau de démonstration supplémentaire. De plus, l'observation de trajectoires de performance à partir des meilleures performances annuelles pour chacun des para sportifs (Figure 22) devrait permettre de tenir compte de la variabilité individuelle ce qui n'était pas le cas avec la méthode des maxima de performance.

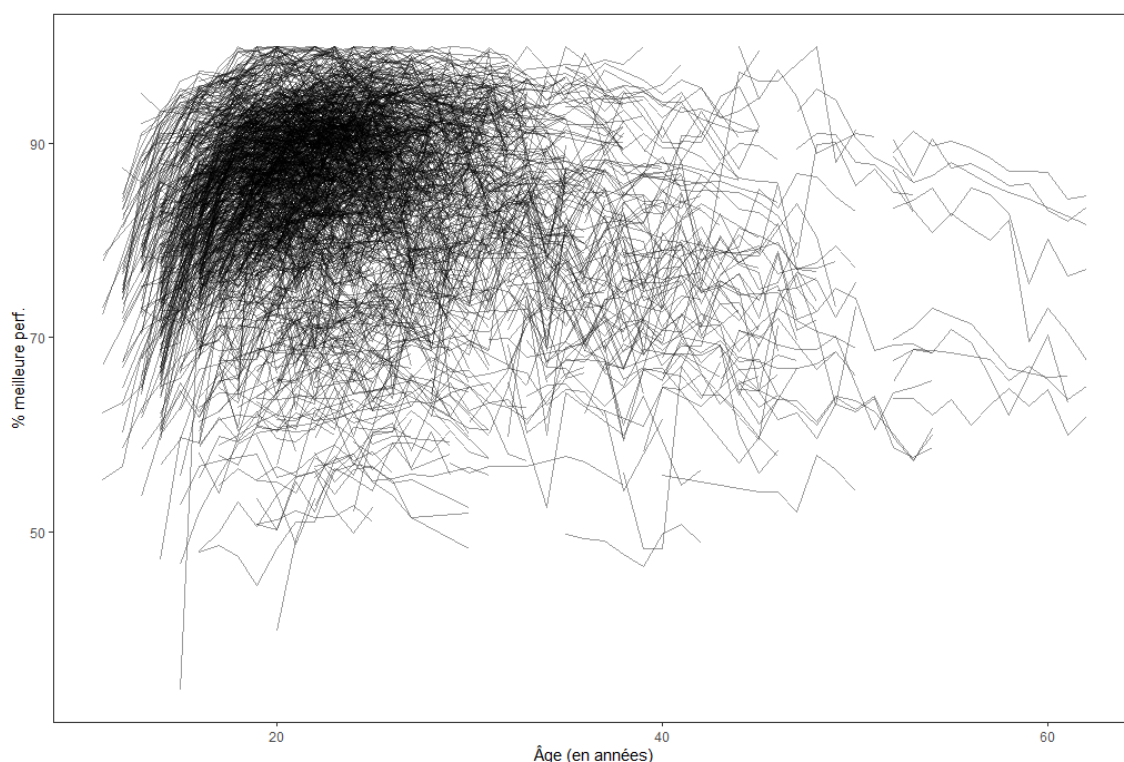


Figure 22 : Trajectoires individuelles de performance selon l'âge en para natation rapportées en pourcentage (%) de la meilleure performance par âge.

Etude 4

Apports

L'étude 4 a quantifié la participation des 100 nageuses et nageurs Paralympiques et valides les plus rapides par épreuve en compétition internationale entre 2009 et 2019. Elle permet d'identifier des critères portant sur les choix de participation pour telle ou telle épreuve et sur les niveaux de performance atteints. Les analyses mettent en lumière une polyvalence des para nageuses et nageurs et une spécialisation de leur homologues valides sur 1 ou 2 épreuves, dans la même nage. Les para nageuses et para nageurs qui participent et s'investissent dans un nombre important

d'épreuves, sont également ceux qui atteignent les niveaux de performance les plus élevés. Une plus grande variabilité des performances réalisées en compétition est également observée chez les para nageuses et para nageurs, soulignant une plus faible concurrence, due principalement à l'hétérogénéité des handicaps entre et au sein des classes.

L'ensemble de ces résultats permet de valider l'hypothèse posée au préalable et démontre ainsi une spécificité du sport Paralympique, en particulier en natation à travers les performances réalisées dans plusieurs épreuves. Ces éléments ont pu être observés lors des derniers JP de Tokyo. Au niveau individuel, le nageur Biélorusse, Ihar Boki, a remporté 5 titres Paralympiques en nage libre, dos, papillon sur différentes distances et l'épreuve du 200 mètres 4 nages, témoignant d'une stratégie d'entraînement optimisée, d'une grande polyvalence et d'une densité de concurrence potentiellement plus faible dans la classification des handicaps visuels minimales (classe 13).

Cette étude souligne également la singularité technique de la brasse et la spécificité de l'épreuve des 4 nages en para natation. En effet, les nageurs performants en brasse ont moins tendance à performer dans les autres styles de nage. A l'inverse, l'épreuve du 200 mètres 4 nages ne montre aucune spécialisation dans le sens où elle n'est pas pratiquée de façon isolée.

Constat majeur, la polyvalence des para nageuses et nageurs mise au regard de la spécialisation de leur homologues valides pourrait s'expliquer par une plus faible densité de concurrence tant en termes de niveau de performance que de nombre de nageurs. Les résultats de l'étude 4 et ceux de la littérature (84) montrent de plus grands écarts aux meilleures performances et un plus faible nombre de para nageuses et para nageurs dans certaines épreuves en compétition. Cela favorise l'accès direct aux phases finales (76) et permet de performer dans des épreuves dont les para nageuses et para nageurs sont moins spécialistes. De plus, le fait d'atteindre directement les finales sans passer par les séries préliminaires, en évitant la fatigue générée par ces dernières, favorise la participation à un plus grand nombre d'épreuves. Ces résultats pourraient donc orienter sur le choix d'investir plusieurs épreuves pour un nageur afin d'augmenter ses chances de victoire. Cependant, ces opportunités dépendent aussi du niveau de performance au sein de la classification et de la compétition.

Enfin, les para nageuses et nageurs des classifications 7 à 14 présentent des moyennes d'âge comprises entre 20 et 23 ans sur l'ensemble des épreuves ce qui correspond au pic de performance estimé avec la fonction de Moore (14) des nageuses et nageurs valides. Ces résultats permettent

de fournir un élément supplémentaire sur le niveau d'optimisation du potentiel physiologique selon l'âge en para natation sur l'échantillon étudié.

Limites

Comme dans les études précédentes, les données disponibles limitent les analyses sur l'ensemble des classifications en natation. En sélectionnant les 100 para nageuses et nageurs les plus rapides par épreuves, indépendamment de la classification, les nageuses et nageurs des classifications 1 à 6 (dont le handicap a des effets majeurs sur les performances) sont exclus de ces analyses. Ne pas prendre en compte la classification de ces para sportifs représente un biais de sélection.

La mise en parallèle des analyses des nageuses et nageurs valides permet d'éclairer les potentielles optimisations dans la mesure où ces performances montrent une forte densité dans un contexte globale de stagnation (50). Pour autant, tenant compte d'une population de para sportifs plus réduite et d'une diversité de handicap importante, l'atteinte de schéma de spécialisation similaire aux nageuses et nageurs valides semble peu probable à moyen terme.

Enfin, l'association entre participation à un nombre important d'épreuves et un niveau de performance supérieur n'apporte que peu d'éléments scientifiques à l'amélioration du système de classification actuel.

Perspectives

L'augmentation des performances observées dans l'étude 1 révèle aussi le contexte d'une professionnalisation et d'un intérêt croissants pour le mouvement Paralympique. Dans ce cadre, l'analyse des écarts aux meilleures performances actualisée par année ou cycle Paralympique pourrait fournir un indicateur intéressant sur l'augmentation éventuelle du niveau global des performances et de la densité. Dans l'hypothèse où la densité augmente, l'analyse des performances par épreuve des para nageuses et para nageurs pourrait montrer des schémas de participation et de niveau de performance différents par rapport à ceux actuellement identifiés et ainsi éclairer l'orientation de la préparation des para sportives et para sportifs.

7. Conclusion générale

Cette thèse apporte des connaissances supplémentaires dans un champ de recherche en plein essor où d'importants besoins existent en matière d'identification et d'optimisation des facteurs de la performance Paralympique. Grâce à des bases de données de performances sportives disponibles et enrichies au fur et à mesure des années, ce travail a analysé les performances réalisées en compétition en para natation et para athlétisme, et identifié des facteurs tels que l'âge, l'origine du handicap ou encore la multiplicité des participations comme des éléments à prendre en compte dans l'optimisation de la performance.

L'analyse des résultats en compétition a permis de quantifier les progressions depuis 2010 et témoigne d'un contexte favorable à l'amélioration des performances des para sportives et sportifs, excepté en 2020.

A travers les modèles utilisés, la relation âge-performance permet de fournir des clés dans l'expression des capacités physiologiques avec le temps. L'observation d'un large spectre des âges parmi les meilleures performances étudiées soulignent par ailleurs la spécificité du Paralympisme, entre optimisations possibles et contraintes particulières.

L'atteinte du potentiel maximal de performance selon l'âge est également influencée par l'origine, innée ou acquise du handicap visuel dans certaines classes. Le prolongement de ces investigations est nécessaire afin de valider ces résultats dans différentes disciplines et types de handicap, tout en tenant compte de la variabilité individuelle.

Enfin, la participation des para nageuses et para nageurs à de nombreuses épreuves, associée à l'augmentation du niveau de performance reflète une caractéristique du sport Paralympique. Elles témoignent d'importantes capacités d'adaptation, d'une grande polyvalence et d'une densité de concurrence différente selon les épreuves.

Avec l'ensemble de ses résultats, ce travail aura contribué à la construction d'outils d'aide à la décision basés sur des concepts scientifiques au service des encadrements et des athlètes français, dont les questions et besoins viennent nourrir de nouvelles réflexions. L'analyse des données de compétition, associée à l'expertise des entraîneurs, fixent le cap à suivre afin d'améliorer leur préparation et de réduire, si possible, les incertitudes en vue des Jeux Paralympiques de Paris 2024.

8. Références

1. IPC Historical Results Archive [Internet]. [cité 11 mai 2021]. Disponible sur: <https://db.ipc-services.org/sdms/hira/web/multi-medallists/type/PG>
2. Tweedy S, Howe PD. Introduction to the Paralympic Movement. In: *The Paralympic Athlete* [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2010 [cité 27 avr 2020]. p. 1-30. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781444328356.ch1>
3. Ferez S, Ruffié S, Joncheray H, Marcellini A, Pappous S, Richard R. Inclusion through Sport: A Critical View on Paralympic Legacy from a Historical Perspective. *Social Inclusion*. 17 août 2020;8(3):224-35.
4. Gold JR, Gold MM. Access for all: the rise of the Paralympic Games. *J R Soc Promot Health*. mai 2007;127(3):133-41.
5. Bundon A. The Professionalisation of Paralympic Sport and Implications for the Retirement Experiences of Paralympians. In: *Athlete Transitions into Retirement*. Routledge; 2021.
6. Marck A, Antero J, Berthelot G, Saulière G, Jancovici J-M, Masson-Delmotte V, et al. Are We Reaching the Limits of Homo sapiens? *Front Physiol*. 2017;8:812.
7. Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, Antero-Jacquemin J, Schipman J, Saulière G, et al. Has Athletic Performance Reached its Peak? *Sports Med*. sept 2015;45(9):1263-71.
8. Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, Jouven X, et al. The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE*. 6 févr 2008;3(2):e1552.
9. Guillaume M, Helou NE, Nassif H, Berthelot G, Len S, Thibault V, et al. Success in developing regions: world records evolution through a geopolitical prism. *PLoS One*. 28 oct 2009;4(10):e7573.
10. Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, Guillaume M, et al. Athlete atypicality on the edge of human achievement: performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE*. 20 janv 2010;5(1):e8800.
11. Lepers R, Stapley PJ, Knechtle B. Analysis of marathon performances of disabled athletes. *Mov Sport Sci/Sci Mot*. 2014;(84):43-50.
12. de Macedo TA, Aguiar S da S, Sousa CV, Barbosa LP, Deus LA, Santos PA, et al. Performance trends in Paralympic athletes in sprint, middle-distance and endurance events. *Sport Sci Health*. 1 sept 2020;16(3):485-90.
13. Burkett B, Payton C, Van de Vliet P, Jarvis H, Daly D, Mehrkuehler C, et al. Performance Characteristics of Para Swimmers: How Effective Is the Swimming Classification System? *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2018;29(2):333-46.
14. Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, Guillaume M, Vollmer J-C, et al. Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age (Dordr)*. août 2012;34(4):1001-9.
15. Marck A, Berthelot G, Foulonneau V, Marc A, Antero-Jacquemin J, Noirez P, et al. Age-Related Changes in Locomotor Performance Reveal a Similar Pattern for *Caenorhabditis elegans*, *Mus domesticus*, *Canis familiaris*, *Equus caballus*, and *Homo sapiens*. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 1 avr 2017;72(4):455-63.
16. Berthelot G, Bar-Hen A, Marck A, Foulonneau V, Douady S, Noirez P, et al. An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Sci Rep*. 23 2019;9(1):418.

17. Marc A, Sedeaud A, Schipman J, Sauliere G, Toussaint JF. Age and Performance from 10 Seconds to a 6-Days Race. *J Athl Enhanc* [Internet]. 2018 [cit  26 janv 2021];07(04). Disponible sur: https://www.scitechnol.com/peer-review/age-and-performance-from-10-seconds-to-a-6days-race-WlCt.php?article_id=8143
18. Guillaume M, Len S, Tafflet M, Quinquis L, Montalvan B, Schaal K, et al. Success and decline: top 10 tennis players follow a biphasic course. *Med Sci Sports Exerc.* nov 2011;43(11):2148-54.
19. Fitzgerald MD, Tanaka H, Tran ZV, Seals DR. Age-related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary women: a meta-analysis. *J Appl Physiol* (1985). juill 1997;83(1):160-5.
20. Faulkner JA, Larkin LM, Claflin DR, Brooks SV. Age-related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clin Exp Pharmacol Physiol.* nov 2007;34(11):1091-6.
21. Baker AB, Tang YQ. Aging performance for masters records in athletics, swimming, rowing, cycling, triathlon, and weightlifting. *Exp Aging Res.* oct 2010;36(4):453-77.
22. Moore DH II. A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature.* janv 1975;253(5489):264-5.
23. Ravensbergen HJC, Genee AD, Mann DL. Expert Consensus to Guide the Classification of Paralympic Swimmers With Vision Impairment: A Delphi Study. *Front Psychol.* 2018;9:1756.
24. Allen PM, Dolan R, Croxall H, Ravensbergen RHJC, Brooks A, Zenk F, et al. Evidence-based Classification in Track Athletics for Athletes with a Vision Impairment: A Delphi Study. *Optom Vis Sci.* nov 2020;97(11):984-94.
25. Howe PD, Jones C. Classification of Disabled Athletes: (Dis)Empowering the Paralympic Practice Community. *Sociology of Sport Journal.* 1 mars 2006;23(1):29-46.
26. Khoo S, Li C, Ansari P. The Top 50 Most Cited Publications in Disability Sport: A Bibliometric Analysis. *Percept Mot Skills.* juin 2018;125(3):525-45.
27. Legg D. An Interview with Dr Robert Steadward, President of the International Paralympic Committee. *International Journal of Sports Marketing and Sponsorship.* 1 janv 2001;3(3):5-14.
28. Mauerberg-deCastro E, Campbell D, Paioli Tavares C. The global reality of the Paralympic Movement: Challenges and opportunities in disability sports. *Motriz: Revista de Educa  o F sica.* 1 sept 2016;22:111-23.
29. Blauwet C, Willick SE. The Paralympic Movement: Using Sports to Promote Health, Disability Rights, and Social Integration for Athletes With Disabilities. *PM&R.* 1 nov 2012;4(11):851-6.
30. IPC Governing Board approves first 16 sports to be included in the Tokyo 2020 Paralympic Games [Internet]. International Paralympic Committee. [cit  12 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.paralympic.org/news/ipc-governing-board-approves-first-16-sports-be-included-tokyo-2020-paralympic-games>
31. Para Swimming (formerly IPC Swimming) - About the Sport [Internet]. International Paralympic Committee. [cit  17 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.paralympic.org/swimming/about>
32. Para Athletics (formerly IPC Athletics) - About the Sport [Internet]. International Paralympic Committee. [cit  17 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.paralympic.org/athletics/about>
33. Patatas JM, Kons RL. Par metros de idades de atletas paral mpicos: uma an lise

- comparativa entre medalhistas e não medalhistas em competições internacionais. Revista da associação brasileira de atividade motora adaptada [internet]. 25 juin 2020 [cité 14 juill 2021];21(1). Disponible sur: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/sobama/article/view/10299>
34. Hogarth L, Nicholson V, Payton C, Burkett B. Modelling the age-related trajectory of performance in Para swimmers with physical, vision and intellectual impairment. *Scand J Med Sci Sports*. 20 déc 2020;
 35. Patatas JM, Bosscher VD, Legg D. Understanding parasport: an analysis of the differences between able-bodied and parasport from a sport policy perspective. *International Journal of Sport Policy and Politics*. 3 avr 2018;10(2):235-54.
 36. Tweedy SM, Beckman EM, Connick MJ. Paralympic classification: conceptual basis, current methods, and research update. *PM R*. août 2014;6(8 Suppl):S11-17.
 37. Tweedy SM, Vanlandewijck YC. International Paralympic Committee position stand--background and scientific principles of classification in Paralympic sport. *Br J Sports Med*. avr 2011;45(4):259-69.
 38. Classification of Sports | International Paralympic Committee [Internet]. International Paralympic Committee. [cité 29 juill 2021]. Disponible sur: <https://www.paralympic.org/classification-by-sport>
 39. World Para athletics. World Para athletics classification rules and regulations. Bonn (Germany): International Paralympic Committee [Internet]. 2017; Disponible sur: https://www.paralympic.org/sites/default/files/document/180305152713114_2017_12_20++WPA+Classification+Rules+and+Regulations_Edition+2018+online+version+.pdf.
 40. World Para Swimming. World Para Swimming classification rules and regulations. Bonn: International Paralympic Committee [Internet]. [cité 27 avr 2020]. Disponible sur: https://www.paralympic.org/sites/default/files/document/180313084120174_2018_03_WPS+Rules+and+Regulations+2018.pdf.
 41. World Health Organization. International statistical classification of diseases and related health problems [Internet]. World Health Organization; 2015 [cité 9 juin 2021]. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/246208>
 42. Hill AV. THE Physiological Basis OF ATHLETIC RECORDS. *The Lancet*. 5 sept 1925;206(5323):481-6.
 43. Kenney WL, Wilmore JH, Costill DL. Physiologie du sport et de l'exercice [Internet]. De Boeck Supérieur. 2021 [cité 8 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807326217-physiologie-du-sport-et-de-l-exercice>
 44. Hawley JA, Hargreaves M, Joyner MJ, Zierath JR. Integrative biology of exercise. *Cell*. 6 nov 2014;159(4):738-49.
 45. Norton K, Olds T. Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med*. 2001;31(11):763-83.
 46. El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, Tolaini J, Marc A, Guillaume M, et al. Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS One*. 2012;7(5):e37407.
 47. Haïda A, Dor F, Guillaume M, Quinquis L, Marc A, Marquet L-A, et al. Environment and scheduling effects on sprint and middle distance running performances. *PLoS ONE*. 2013;8(11):e79548.

48. Nevill AM, Whyte G. Are there limits to running world records? *Med Sci Sports Exerc.* oct 2005;37(10):1785-8.
49. Nevill AM, Whyte GP, Holder RL, Peyrebrune M. Are there limits to swimming world records? *Int J Sports Med.* déc 2007;28(12):1012-7.
50. Berthelot G, Len S, Hellard P, Tafflet M, El Helou N, Escolano S, et al. Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Materials Today.* 1 nov 2010;13(11):46-51.
51. Desgorces F-D, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, Tafflet M, et al. From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS One.* 2008;3(11):e3653.
52. El Helou N, Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Nassif H, Champion F, 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.* mai 2010;28(7):789-96.
53. Kuper GH, Sterken E. Endurance in speed skating: The development of world records. *European Journal of Operational Research.* 16 juill 2003;148(2):293-301.
54. World Athletics [Internet]. [cité 9 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.worldathletics.org/records/by-category/world-records>
55. fina.org | Official FINA Website [Internet]. FINA - Fédération Internationale De Natation. [cité 9 juin 2021]. Disponible sur: www.fina.org/results
56. Blest DC. Lower Bounds for Athletic Performance. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician).* 1996;45(2):243-53.
57. Haugen T, Tønnessen E, Seiler S. 9.58 and 10.49: Nearing the Citius End for 100 m? *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 1 mars 2015;10(2):269-72.
58. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, Helou NE, Schaal K, Quinquis L, et al. Women and Men in Sport Performance: The Gender Gap has not Evolved since 1983. *J Sports Sci Med.* 1 juin 2010;9(2):214-23.
59. Bennett AF. Integrated studies of locomotor performance. *Complex organismal functions: integration and evolution in vertebrates.* 1989;45:191-202.
60. Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* janv 2000;32(1):70-84.
61. 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* (1985). nov 2000;89(5):1991-9.
62. Ferretti G, Bringard A, Perini R. An analysis of performance in human locomotion. *Eur J Appl Physiol.* mars 2011;111(3):391-401.
63. Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, Dorsey M, et al. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLoS One* [Internet]. 25 févr 2014 [cité 14 déc 2017];9(2). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3934974/>
64. Spedding M, Spedding C. Drugs in sport: a scientist-athlete's perspective: from ambition to neurochemistry. *Br J Pharmacol.* juin 2008;154(3):496-501.
65. Franke WW, Berendonk B. Hormonal doping and androgenization of athletes: a secret program of the German Democratic Republic government. *Clin Chem.* juill 1997;43(7):1262-79.
66. Durussel J, Daskalaki E, Anderson M, Chatterji T, Wondimu DH, Padmanabhan N, et al. Haemoglobin Mass and Running Time Trial Performance after Recombinant Human Erythropoietin Administration in Trained Men. *PLOS ONE.* 13 févr 2013;8(2):e56151.

67. Nigg BM, Cigoja S, Nigg SR. Effects of running shoe construction on performance in long distance running. *Footwear Science*. 1 sept 2020;12(3):133-8.
68. Pyne D, Trewin C, Hopkins W. Progression and variability of competitive performance of Olympic swimmers. *J Sports Sci*. juill 2004;22(7):613-20.
69. Costa MJ, Marinho DA, Reis VM, Silva AJ, Marques MC, Bragada JA, et al. Tracking the performance of world-ranked swimmers. *J Sports Sci Med*. 2010;9(3):411-7.
70. Coutts KD, Schutz RW. Analysis of wheelchair track performances. *Med Sci Sports Exerc*. avr 1988;20(2):188-94.
71. Lepers R, Stapley PJ, Knechtle B. Gender differences in wheelchair marathon performance - Oita International Wheelchair Marathon from 1983 to 2011. *Open Access J Sports Med*. 2012;3:169-74.
72. Grobler L, Ferreira S, Terblanche E. Paralympic Sprint Performance Between 1992 and 2012. *Int J Sports Physiol Perform*. nov 2015;10(8):1052-4.
73. Dyer B. The Progression of Male 100 m Sprinting with a Lower-Limb Amputation 1976–2012. *Sports*. mars 2015;3(1):30-9.
74. Fletcher JR, Gallinger T, Prince F. How Can Biomechanics Improve Physical Preparation and Performance in Paralympic Athletes? A Narrative Review. *Sports*. juill 2021;9(7):89.
75. Tuakli-Wosornu YA, Li X, Ayala KEO, Wu Y, Amick M, Frumberg DB. The Impact of Blade Technology on Paralympic Sprint Performance Between 1996 and 2016: Bilateral Amputees' Competitive Advantage. *Adapted Physical Activity Quarterly*. 11 mai 2021;38(3):494-505.
76. Fulton SK, Pyne D, Hopkins W, Burkett B. Variability and progression in competitive performance of Paralympic swimmers. *J Sports Sci*. mars 2009;27(5):535-9.
77. Stephenson BT, Stone B, Mason BS, Goosey-Tolfrey VL. Physiology of handcycling: A current sports perspective. *Scand J Med Sci Sports*. janv 2021;31(1):4-20.
78. Liljedahl JB, Bjerkefors A, Arndt A, Nooijen CFJ. Para-cycling race performance in different sport classes. *Disabil Rehabil*. 14 mars 2020;1-5.
79. Burkett B, McNamee M, Potthast W. Shifting boundaries in sports technology and disability: equal rights or unfair advantage in the case of Oscar Pistorius? *Disability & Society*. 1 août 2011;26(5):643-54.
80. Jones C, Wilson C. Defining advantage and athletic performance: The case of Oscar Pistorius. *European Journal of Sport Science - EUR J SPORT SCI*. 1 mars 2009;9:125-31.
81. Swartz L, Watermeyer B. Cyborg anxiety: Oscar Pistorius and the boundaries of what it means to be human. *Disability & Society*. 1 mars 2008;23(2):187-90.
82. Daly D, Malone L, Burkett B, Gabrys T, Satkunsienė D. Is sight the main deterrent to race performance in visually impaired competitive swimmers? *Facta Universitatis-Series: Physical Education and Sport*. :1451-740X, 7, 1-15.
83. Fisher RA. The causes of human variability. *Eugen Rev*. janv 1919;10(4):213-20.
84. Daly DJ, Vanlandewijck Y. Some Criteria for Evaluating the "Fairness" of Swimming Classification. *Adapted Physical Activity Quarterly*. 1 juill 1999;16(3):271-89.
85. Biesen D, McCulloch K, Vanlandewijck Y. Comparison of shot-put release parameters and consistency in performance between elite throwers with and without intellectual impairment. *International Journal of Sports Science & Coaching*. 2 mai 2017;0:1-9.
86. Larousse É. Définitions : performance - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 14 juin 2021]. Disponible sur:

- <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/performance/59512>
87. Famose J-P, éditeur. Cognition et performance [Internet]. Cognition et performance. Paris: INSEP-Éditions; 2018 [cité 6 mai 2021]. 302 p. (Recherche). Disponible sur: <http://books.openedition.org/insep/1399>
 88. Platonov VN. Teoría general del entrenamiento deportivo olímpico. Editorial Paidotribo; 2001. 675 p.
 89. Weineck J. Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder-und Jugendtrainings, Spitta Verlag GmbH & Co, Ballingen, 2004. Ballingen: Spitta Verlag GmbH & Co; 2004.
 90. Bouchard C, Brunelle J, Godbout P. La Préparation D'un Champion: Un Essai Sur La Préparation a La Performance Sportive [Internet]. Du Pélican. Quebec; 1973 [cité 6 mai 2021]. Disponible sur: <https://www.abebooks.fr/Preparation-Dun-Champion-Essai-Performance-Sportive/1087039229/bd>
 91. Cazorla G, Montpetit R, Prokop P, Cervetti J. De l'évaluation des nageurs de haut niveau... à la détection des jeunes talents. 1984;(7):p.185-208.
 92. Billat V. L'apport de la science dans l'entraînement sportif: l'exemple de la course de fond. Staps. 2001;no 54(1):23-43.
 93. Speed C. High-performance sports medicine. Clin Med (Lond). févr 2013;13(1):47-9.
 94. Sedeaud A, Sène JM, Krantz N, Saulière G, Moussa I, Toussaint JF. L'importance de la quantification de la charge d'entraînement: exemple d'un modèle. Science & Sports. 1 févr 2018;33(1):22-32.
 95. Burke L. Practical issues in nutrition for athletes. Journal of Sports Sciences. 1 juin 1995;13(sup1):S83-90.
 96. Neptune RR, McGowan CP, Fiandt JM. The influence of muscle physiology and advanced technology on sports performance. Annu Rev Biomed Eng. 2009;11:81-107.
 97. Williams AG, Folland JP. Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. J Physiol. 1 janv 2008;586(Pt 1):113-21.
 98. Lippi G, Longo UG, Maffulli N. Genetics and sports. British Medical Bulletin. 1 mars 2010;93(1):27-47.
 99. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, Rizk M, Schipman J, Antero-Jacquemin J, et al. Marathon progress: demography, morphology and environment. J Sports Sci. 2014;32(6):524-32.
 100. Joncheray H, Burlot F, Besombes N, Dalgalarondo S, Desenfant M. Performance Factors and Strategies Favored by French Olympic Athletes. Sociology of Sport Journal. 10 juin 2020;38(1):88-97.
 101. Barbosa TM, Bragada JA, Reis VM, Marinho DA, Carvalho C, Silva AJ. Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: Updating the state of the art. Journal of Science and Medicine in Sport. 1 mars 2010;13(2):262-9.
 102. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. J Physiol. 1 janv 2008;586(Pt 1):35-44.
 103. Lippi G, Favaloro EJ, Guidi GC. The genetic basis of human athletic performance. Why are psychological components so often overlooked? J Physiol. 15 juin 2008;586(12):3017; author reply 3019-3020.
 104. 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. août 2009;10(8):585-96.

105. Grappe F. Cyclisme et optimisation de la performance Optimisation de la performance. 3è édition. 2018. 640 p. (De Boeck Supérieur).
106. Dieffenbach KD, Statler TA. More Similar than Different: The Psychological Environment of Paralympic Sport. *Journal of Sport Psychology in Action*. 1 mai 2012;3(2):109-18.
107. Cregan K, Bloom GA, Reid G. Career Evolution and Knowledge of Elite Coaches of Swimmers With a Physical Disability. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 1 sept 2007;78(4):339-50.
108. Wareham Y, Burkett B, Innes P, Lovell GP. Coaching athletes with disability: preconceptions and reality. *Sport in Society*. 2 sept 2017;20(9):1185-202.
109. Fairhurst KE, Bloom GA, Harvey WJ. The learning and mentoring experiences of Paralympic coaches. *Disabil Health J*. avr 2017;10(2):240-6.
110. Paulson T, Goosey-Tolfrey V. Current Perspectives on Profiling and Enhancing Wheelchair Court Sport Performance. *Int J Sports Physiol Perform*. mars 2017;12(3):275-86.
111. van der Woude LH, de Groot G, Hollander AP, van Ingen Schenau GJ, Rozendal RH. Wheelchair ergonomics and physiological testing of prototypes. *Ergonomics*. déc 1986;29(12):1561-73.
112. Berthelot G, Bar-Hen A, Marck A, Foulonneau V, Douady S, Noirez P, et al. An integrative modeling approach to the age-performance relationship in mammals at the cellular scale. *Sci Rep*. 23 2019;9(1):418.
113. Nassif H, Sedeaud A, Abidh E, Schipman J, Tafflet M, Deschamps T, et al. Monitoring fitness levels and detecting implications for health in a French population: an observational study. *BMJ Open*. 2012;2(5).
114. Allen SV, Hopkins WG. Age of Peak Competitive Performance of Elite Athletes: A Systematic Review. *Sports Med*. oct 2015;45(10):1431-41.
115. Balmer J, Bird S, Davison R. Indoor 16.1-km time-trial performance in cyclists aged 25-63 years. *J Sports Sci*. 1 janv 2008;26(1):57-62.
116. Bradbury JC. Peak athletic performance and ageing: evidence from baseball. *J Sports Sci*. avr 2009;27(6):599-610.
117. Lepers R, Sultana F, Bernard T, Hausswirth C, Brisswalter J. Age-related changes in triathlon performances. *Int J Sports Med*. avr 2010;31(4):251-6.
118. Schulz R, Curnow C. Peak performance and age among superathletes: track and field, swimming, baseball, tennis, and golf. *J Gerontol*. sept 1988;43(5):P113-120.
119. Milevsky MA. Calibrating Gompertz in reverse: What is your longevity-risk-adjusted global age? *Insurance: Mathematics and Economics*. 1 mai 2020;92:147-61.
120. Laird AK. DYNAMICS OF TUMOR GROWTH. *Br J Cancer*. sept 1964;13:490-502.
121. Lee L, Atkinson D, Hirst AG, Cornell SJ. A new framework for growth curve fitting based on the von Bertalanffy Growth Function. *Sci Rep*. 14 mai 2020;10(1):7953.
122. Berthelot G, Johnson S, Noirez P, Antero J, Marck A, Desgorces F-D, et al. The age-performance relationship in the general population and strategies to delay age related decline in performance. *Archives of Public Health*. 9 déc 2019;77(1):51.
123. Lara B, Salinero JJ, Del Coso J. The relationship between age and running time in elite marathoners is U-shaped. *AGE*. 1 avr 2014;36(2):1003-8.
124. Simonton DK. Age and outstanding achievement: what do we know after a century of research? *Psychol Bull*. sept 1988;104(2):251-67.

125. Radtke S, Doll-Tepper G. A cross-cultural comparison of talent identification and development in Paralympic sports. Perceptions and opinions of athletes, coaches and officials. 2014.
126. Leprêtre P-M, Weissland T, Slawinski J, Lopes P. Para-Cycling Performance was Rather Limited by Physiological than Functional Factors. *Front Physiol.* 2012;3:327.
127. Hutzler Y, Ochana S, Bolotin R, Kalina E. Aerobic and anaerobic arm-cranking power outputs of males with lower limb impairments: relationship with sport participation intensity, age, impairment and functional classification. *Spinal Cord.* mars 1998;36(3):205-12.
128. Hogarth L, Payton C, Van De Vliet P, Burkett B. The impact of limb deficiency impairment on Para swimming performance. *J Sports Sci.* 5 mars 2020;1-9.
129. Kirshblum SC, Biering-Sorensen F, Betz R, Burns S, Donovan W, Graves DE, et al. International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury: Cases with classification challenges. *J Spinal Cord Med.* mars 2014;37(2):120-7.
130. Bhambhani Y. Physiology of wheelchair racing in athletes with spinal cord injury. *Sports Med.* 2002;32(1):23-51.
131. Goosey-Tolfrey VL, Leicht CA. Field-based physiological testing of wheelchair athletes. *Sports Med.* févr 2013;43(2):77-91.
132. Baumgart JK, Brurok B, Sandbakk Ø. Peak oxygen uptake in Paralympic sitting sports: A systematic literature review, meta- and pooled-data analysis. *PLoS ONE.* 2018;13(2):e0192903.
133. de Souza H, DA Silva Alves E, Ortega L, Silva A, Esteves AM, Schwingel PA, et al. Incremental exercise test for the evaluation of peak oxygen consumption in paralympic swimmers. *J Sports Med Phys Fitness.* avr 2016;56(4):368-75.
134. Fischer G, Figueiredo P, Ardigò LP. Physiological Performance Determinants of a 22-km Handbiking Time Trial. *Int J Sports Physiol Perform.* nov 2015;10(8):965-71.
135. de Groot S, Hoekstra SP, Grandjean Perrenod Comtesse P, Kouwijzer I, Valent LJ. Relationships between internal and external handcycle training load in people with spinal cord injury training for the handbikebattle. *J Rehabil Med.* 28 févr 2018;50(3):261-8.
136. Umezū Y, Shiba N, Tajima F, Mizushima T, Okawa H, Ogata H, et al. Muscle endurance and power spectrum of the triceps brachii in wheelchair marathon racers with paraplegia. *Spinal Cord.* sept 2003;41(9):511-5.
137. Mitchell WK, Williams J, Atherton P, Larvin M, Lund J, Narici M. Sarcopenia, dynapenia, and the impact of advancing age on human skeletal muscle size and strength; a quantitative review. *Front Physiol.* 2012;3:260.
138. Freund PR, Brengelmann GL, Rowell LB, Halar E. Attenuated skin blood flow response to hyperthermia in paraplegic men. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol.* avr 1984;56(4):1104-9.
139. Sagawa Y, Turcot K, Armand S, Thevenon A, Vuillerme N, Watelain E. Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: a systematic review. *Gait Posture.* avr 2011;33(4):511-26.
140. Sherk VD, Bemben MG, Bemben DA. Interlimb muscle and fat comparisons in persons with lower-limb amputation. *Arch Phys Med Rehabil.* juill 2010;91(7):1077-81.
141. Ostlie K, Franklin RJ, Skjeldal OH, Skrondal A, Magnus P. Musculoskeletal pain and overuse syndromes in adult acquired major upper-limb amputees. *Arch Phys Med Rehabil.* déc 2011;92(12):1967-1973.e1.
142. Blauwet CA, Brook EM, Tenforde AS, Broad E, Hu CH, Abdu-Glass E, et al. Low Energy

- Availability, Menstrual Dysfunction, and Low Bone Mineral Density in Individuals with a Disability: Implications for the Para Athlete Population. *Sports Med.* sept 2017;47(9):1697-708.
143. Ward KH, Meyers MC. Exercise performance of lower-extremity amputees. *Sports Med.* oct 1995;20(4):207-14.
 144. Griggs KE, Stephenson BT, Price MJ, Goosey-Tolfrey VL. Heat-related issues and practical applications for Paralympic athletes at Tokyo 2020. *Temperature (Austin).* 2020;7(1):37-57.
 145. Mengelkoch LJ, Kahle JT, Highsmith MJ. Energy costs and performance of transfemoral amputees and non-amputees during walking and running: A pilot study. *Prosthet Orthot Int.* oct 2017;41(5):484-91.
 146. Brown MB, Millard-Stafford ML, Allison AR. Running-specific prostheses permit energy cost similar to nonamputees. *Med Sci Sports Exerc.* mai 2009;41(5):1080-7.
 147. Wimalasundera N, Stevenson VL. Cerebral palsy. *Pract Neurol.* juin 2016;16(3):184-94.
 148. Runciman P, Tucker R, Ferreira S, Albertus-Kajee Y, Derman W. Paralympic athletes with cerebral palsy display altered pacing strategies in distance-deceived shuttle running trials. *Scand J Med Sci Sports.* oct 2016;26(10):1239-48.
 149. Bax MC. Terminology and classification of cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* Juin 1964;6:295-7.
 150. de Groot S, Dallmeijer AJ, Bessems PJC, Lamberts ML, van der Woude LHV, Janssen TWJ. Comparison of muscle strength, sprint power and aerobic capacity in adults with and without cerebral palsy. *J Rehabil Med.* nov 2012;44(11):932-8.
 151. Beckman EM, Connick MJ, Tweedy SM. How much does lower body strength impact Paralympic running performance? *Eur J Sport Sci.* sept 2016;16(6):669-76.
 152. Runciman P, Derman W, Ferreira S, Albertus-Kajee Y, Tucker R. A descriptive comparison of sprint cycling performance and neuromuscular characteristics in able-bodied athletes and paralympic athletes with cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil.* janv 2015;94(1):28-37.
 153. Theodorou A, Skordilis E, Plainis S, Panoutsakopoulos V, Panteli F. Influence of visual impairment level on the regulatory mechanism used during the approach phase of a long jump. *Percept Mot Skills.* août 2013;117(1):1073-87.
 154. Bakke HA, Cavalcante WA, de Oliveira IS, Sarinho SW, Cattuzzo MT. Assessment of Motor Skills in Children With Visual Impairment: A Systematic and Integrative Review. *Clin Med Insights Pediatr.* 6 mai 2019;13:1179556519838287.
 155. Hodges NJ, Williams AM. Current status of observational learning research and the role of demonstrations in sport. *J Sports Sci.* mars 2007;25(5):495-6.
 156. Weiss MR, McCullagh P, Smith AL, Berlant AR. Observational learning and the fearful child: influence of peer models on swimming skill performance and psychological responses. *Res Q Exerc Sport.* déc 1998;69(4):380-94.
 157. Ravensbergen HJCR, Mann DL, Kamper SJ. Expert consensus statement to guide the evidence-based classification of Paralympic athletes with vision impairment: a Delphi study. *Br J Sports Med.* avr 2016;50(7):386-91.
 158. Theodorou A, Skordilis E. Evaluating the approach run of class F11 visually impaired athletes in triple and long jumps. *Percept Mot Skills.* avr 2012;114(2):595-609.
 159. Taylor JB, Santi G, Mellalieu SD. Freestyle race pacing strategies (400 m) of elite able-bodied swimmers and swimmers with disability at major international championships. *J Sports Sci.* oct 2016;34(20):1913-20.

160. Malwina KA, Krzysztof M, Piotr Z. Visual Impairment does not Limit Training Effects in Development of Aerobic and Anaerobic Capacity in Tandem Cyclists. *J Hum Kinet.* 22 nov 2015;48:87-97.
161. Déficiences intellectuelles [Internet]. Inserm - La science pour la santé. [cité 9 juill 2021]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
162. Andrews B, Goosey-Tolfrey V, Bressan E. The classification of sprinters with intellectual impairments: A preliminary analysis. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation.* 29 sept 2009;17.
163. VAN Biesen D, Hettinga FJ, McCulloch K, Vanlandewijck YC. Pacing Ability in Elite Runners with Intellectual Impairment. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49(3):588-94.
164. Van Biesen D, Hettinga FJ, McCulloch K, Vanlandewijck Y. Pacing Profiles in Competitive Track Races: Regulation of Exercise Intensity Is Related to Cognitive Ability. *Front Physiol.* 2016;7:624.
165. van de Vliet P, Rintala P, Fröjd K, Verellen J, van Houtte S, Daly DJ, et al. Physical fitness profile of elite athletes with intellectual disability. *Scand J Med Sci Sports.* déc 2006;16(6):417-25.
166. International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) [Internet]. [cité 20 janv 2021]. Disponible sur: <https://www.who.int/standards/classifications/international-classification-of-functioning-disability-and-health>
167. Ravaud J-F. Définition, classification et épidémiologie du handicap : Handicap. Définition, classification et épidémiologie du handicap : Handicap. 2009;
168. Delcey M. Déficiences motrices et situations de handicaps. Introduction aux causes de déficiences motrices [Internet]. APF. 2002. Disponible sur: https://www.apf-francehandicap.org/sites/default/files/intr_o_causes_defmot.pdf
169. Bogart KR. The role of disability self-concept in adaptation to congenital or acquired disability. *Rehabil Psychol.* févr 2014;59(1):107-15.
170. Dehghansai N, Pinder RA, Baker J. "Looking for a Golden Needle in the Haystack": Perspectives on Talent Identification and Development in Paralympic Sport. *Front Sports Act Living* [Internet]. 2021 [cité 29 juill 2021];0. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2021.635977/full>
171. Baker J, Young B. Baker, J., & Young, B.W. (2014). 20 years later: Deliberate practice and the development of expertise in sport. *International Review of Sport & Exercise Psychology*, 7(1), 135-157. *International Review of Sport and Exercise Psychology.* 1 janv 2014;7:135-57.
172. Patatas JM, De Rycke J, De Bosscher V, Kons RL. It's a Long Way to the Top: Determinants of Developmental Pathways in Paralympic Sport. *Adapt Phys Activ Q.* 17 août 2021;1-21.
173. Campbell E. Psychological well-being of participants in wheelchair sports: comparison of individuals with congenital and acquired disabilities. *Percept Mot Skills.* oct 1995;81(2):563-8.
174. Dehghansai N, Lemez S, Wattie N, Baker J. Training and development of Canadian wheelchair basketball players. *Eur J Sport Sci.* juin 2017;17(5):511-8.
175. Bouchard D, Tétreault S. The motor development of sighted children and children with moderate low vision. *Journal of Visual Impairment and Blindness.* 1 sept 2000;94:564-73.
176. Skaggs S, Hopper C. Individuals with Visual Impairments: A Review of Psychomotor

Behavior. Adapted Physical Activity Quarterly. 1 janv 1996;13(1):16-26.

177. Wesch MR, Law B, Hall C. The Use of Observational Learning by Athletes. Journal of Sport Behavior. 2007;30:219-31.
178. Mann DL, Ravensbergen HJC. International Paralympic Committee (IPC) and International Blind Sports Federation (IBSA) Joint Position Stand on the Sport-Specific Classification of Athletes with Vision Impairment. Sports Med. sept 2018;48(9):2011-23.
179. Monegato M, Cattaneo Z, Pece A, Vecchi T. Comparing the Effects of Congenital and Late Visual Impairments on Visuospatial Mental Abilities. Journal of Visual Impairment & Blindness. 1 mai 2007;101(5):278-95.
180. Schwesig R, Goldich Y, Hahn A, Müller A, Kohen-Raz R, Kluttig A, et al. Postural control in subjects with visual impairment. Eur J Ophthalmol. juin 2011;21(3):303-9.
181. Dehghansai N, Lemez S, Wattie N, Pinder RA, Baker J. Understanding the Development of Elite Paraspport Athletes Using a Constraint-Led Approach: Considerations for Coaches and Practitioners. Front Psychol [Internet]. 2020 [cité 11 janv 2021];11. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.502981/full#B40>
182. Marck A, Antero J, Berthelot G, Johnson S, Sedeaud A, Leroy A, et al. Age-Related Upper Limits in Physical Performances. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 23 2019;74(5):591-9.
183. Box GEP, Draper NR. Empirical model-building and response surfaces. Oxford, England: John Wiley & Sons; 1987. xiv, 669 p. (Empirical model-building and response surfaces).

