

École de kinésiologie et des
sciences de l'activité physique
Faculté de médecine

Université 
de Montréal

Adaptations chroniques au pédalage excentrique et ses impacts sur la performance dans le sport : une revue de portée

par
Marc-Étienne Villeneuve

École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique
Faculté de médecine

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès sciences en sciences de l'activité physique

Décembre 2021

© Marc-Étienne Villeneuve, 2021

Université de Montréal

École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique, Faculté de médecine

Ce mémoire (ou cette thèse) intitulé(e)

Adaptations chroniques au pédalage excentrique et ses impacts sur la performance dans le sport : une revue de portée

Présenté par

Marc-Étienne Villeneuve

A été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes

Jason Neva

Président-rapporteur

Jonathan Tremblay

Directeur de recherche

Daniel Gagnon

Membre du jury

RÉSUMÉ

Le pédalage excentrique a été introduit dans la littérature scientifique au début des années 1950. De nombreuses études ont rapporté les adaptations aiguës au pédalage excentrique, tant d'un point de vue cardio-respiratoire, neuromusculaire et structurel pouvant mener à des gains fonctionnels chez une variété de populations. Cependant, très peu de chercheurs se sont intéressés aux effets chroniques du pédalage excentrique, particulièrement avec des populations entraînées visant à améliorer leur performance. L'intérêt grandissant pour le sujet et des résultats récents laissent toutefois croire que ce mode d'exercice permettrait d'améliorer plusieurs qualités physiques déterminantes pour la performance dans les sports d'endurance, telle que la puissance maximale, l'économie de mouvement et la force maximale. Cependant, l'hétérogénéité dans les méthodes utilisées complique l'interprétation des résultats disponibles. Une étude de portée respectant les 20 éléments essentiels des lignes directrices de PRISMA pour les études de portée (PRISMA-ScR) a donc été menée. Une recherche exhaustive dans Medline, SPORTDiscus, Embase, Clarivate et ProQuest a été effectuée afin de colliger les articles et les écrits pertinents. Au total, 1117 textes ont été récupérés et cinq se retrouvent dans l'étude de portée. L'étude avait pour but de rapporter les connaissances actuelles et d'identifier les lacunes au niveau de littérature sur les effets chroniques au pédalage excentrique. Pour l'instant, les évidences permettant de suggérer les bienfaits du pédalage excentrique sur la performance en endurance sont faibles, mais plusieurs questions demeurent en suspens. Le pédalage excentrique semble principalement influencer les propriétés neuromusculaires et la force maximale chez les participants entraînés. Aucun des protocoles retenus dans cette étude n'a établi les paramètres d'entraînement en fonction d'un effort maximal excentrique. Le faible nombre d'études, des échantillons et l'hétérogénéité des méthodes employées rendent difficile la formulation de recommandations. Davantage de travaux devront être effectués pour valider certaines des pistes soulevées dans les études disponibles à ce jour.

MOTS-CLÉS :

pédalage arrière, travail négatif, ergométrie excentrique, performance sportive, rendement mécanique

ABSTRACT

Eccentric pedaling was introduced into the scientific literature in the early 1950s. Numerous studies have reported acute adaptations to eccentric pedaling from a cardiorespiratory, neuromuscular, and structural perspective that can lead to functional gains in a variety of populations. However, very few researchers have focused on the chronic effects of eccentric pedaling, particularly with trained populations aiming to improve their performance. However, growing interest and recent results suggest that eccentric pedaling may improve several physical qualities that are critical to performance in endurance sports, such as maximal power, economy of motion and maximal strength. However, the heterogeneity in the methods used complicates the interpretation of the available results. Therefore, a scoping review following the 20 essential elements of the PRISMA guidelines for scoping reviews (PRISMA-ScR) was conducted. A comprehensive search of Medline, SPORTDiscus, Embase, Clarivate, and ProQuest was conducted to identify the relevant articles and literature. A total of 1117 texts were retrieved and five were included in the scoping review. The purpose of the review was to report current knowledge and identify gaps in the literature on the chronic effects of eccentric pedaling. At present, evidence to suggest benefits of eccentric pedaling on endurance performance is lacking, but several questions remain. Eccentric cycling seems to mostly benefit neuromuscular properties and maximal strength when performed by trained participants. None of the studies assessed the maximal eccentric power of their participants prior to intervention. The small number of studies, the small sample sizes, and the heterogeneity of the methods used make it difficult to make recommendations. More work needs to be done to validate some of the clues present in the studies available to date.

KEYWORDS :

Backward pedaling, endurance performance, negative work, eccentric ergometry, mechanical efficiency

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| RÉSUMÉ..... | 3 |
| MOTS-CLÉS :..... | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| KEYWORDS : | 4 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 7 |
| LISTE DES FIGURES..... | 8 |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | 9 |
| INTRODUCTION | 10 |
| 2. REVUE DE LA LITTÉRATURE..... | 12 |
| 2.1. TYPES DE CONTRACTIONS MUSCULAIRES | 12 |
| 2.2. CARACTÉRISTIQUES PROPRES À L'EXCENTRIQUE | 12 |
| 2.3. MÉTHODES D'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE | 14 |
| 2.4. L'ENTRAÎNEMENT AVEC EXCENTRIQUE LENT | 15 |
| 2.5. L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE ACCENTUÉ | 17 |
| 2.6. L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE ACCENTUÉ ISO-INERTIEL | 21 |
| 2.7. PLIOMÉTRIE | 23 |
| 2.8. PÉDALAGE EXCENTRIQUE | 24 |
| 2.9. ADAPTATIONS CHRONIQUES À L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE | 30 |
| 2.9.1. Adaptations structurelles | 30 |
| 2.9.2. Adaptations neuromusculaires | 34 |
| 2.9.3. Adaptations musculaires | 35 |
| 2.9.4. Adaptations dans le contrôle moteur..... | 37 |
| 2.9.5. Adaptations métaboliques | 38 |
| 2.10. PRESCRIPTION D'ENTRAÎNEMENT..... | 39 |
| 2.11. DÉTERMINANTS DE LA PERFORMANCE..... | 40 |
| 2.11.1. Consommation maximale d'oxygène ou VO ₂ max | 41 |
| 2.11.2. Endurance..... | 43 |
| 2.11.2. Efficacité/rendement énergétique..... | 44 |
| CHRONIC ADAPTATIONS FROM ECCENTRIC CYCLING AND PERFORMANCE IN SPORTS: A SCOPING REVIEW | 45 |
| 1. INTRODUCTION | 45 |
| 2. METHODS..... | 47 |
| Research Question | 47 |
| Protocol & Registration..... | 47 |
| Search Strategy | 47 |

| | |
|---|-----------|
| Evidence Screening and Selection | 48 |
| Inclusion Criteria | 49 |
| 3. RESULTS..... | 50 |
| Neuromuscular Adaptations | 51 |
| Strength Adaptations | 52 |
| Endurance Performance Adaptations..... | 52 |
| 4. DISCUSSION | 53 |
| Neuromuscular and Strength Adaptations | 54 |
| Endurance Performance Adaptations..... | 56 |
| Time-Efficiency..... | 57 |
| LIMITATIONS..... | 57 |
| 5. CONCLUSION | 58 |
| AUTHOR CONTRIBUTIONS | 58 |
| 4. DISCUSSION..... | 67 |
| 4.1. PERFORMANCE EN ENDURANCE..... | 67 |
| 4.2. ADAPTATIONS NEUROMUSCULAIRES ET IMPACT SUR LA FORCE MUSCULAIRE..... | 69 |
| 5. CONCLUSION | 74 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 75 |
| ANNEXES..... | 95 |
| ANNEXE 1 - Ovid MEDLINE(R) ALL | 95 |
| ANNEXE 2 - Scoping review - Protocol Registration (OSF)..... | 96 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|------------|---|----|
| TABLE 1. – | CARACTÉRISTIQUES DES ÉTUDES AVEC SURCHARGE EXCENTRIQUE ACCENTUÉE | 20 |
| TABLE 2. – | CARACTÉRISTIQUES DES ÉTUDES SUR L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE ACCENTUÉE ISO-INTERTIEL..... | 22 |
| TABLE 1. – | SUMMARY OF THE PARTICIPANTS CHARACTERISTICS IN THE SELECTED PUBLISHED ARTICLES AND PHD THESIS FOR THE SCOPING REVIEW..... | 59 |
| TABLE 2. – | OVERVIEW OF THE PROTOCOL CHARACTERISTICS IN THE SELECTED PUBLISHED ARTICLES AND PHD THESIS FOR THE SCOPING REVIEW | 60 |

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. – RELATION ENTRE LA FORCE MUSCULAIRE ET VITESSE DE CONTRACTION. FORCE MUSCULAIRE (% 1RM) EN FONCTION DE LA VITESSE DE CONTRACTION (%VMAX). ON REMARQUE QUE LA VITESSE DE CONTRACTION A UN IMPACT POSITIF SUR LE POTENTIEL DE FORCE MUSCULAIRE EXCENTRIQUE. AU CONTRAIRE, IL Y A UNE CORRÉLATION NÉGATIVE DE LA VITESSE DE CONTRACTION AVEC LA FORCE MUSCULAIRE CONCENTRIQUE. MVIC : CONTRACTION MAXIMALE VOLONTAIRE ISOMÉTRIQUE ADAPTÉE DE TINWALA ET AL. 2017. 14

FIGURE 2. – ÉQUIPEMENT PERMETTANT D’IMPOSER UNE SURCHARGE MÉCANIQUE LORS DE L’ACTION MUSCULAIRE EXCENTRIQUE. **A** – TITAN FITNESS. *CROCHETS EXCENTRIQUES - DISPOSITIF MÉCANIQUE PERMETTANT DE SURCHARGER LA CONTRACTION MUSCULAIRE EXCENTRIQUE. LES CROCHETS SE DÉCROCHENT AUTOMATIQUÉMENT À LA FIN DE L’ACTION MUSCULAIRE EXCENTRIQUE, RETIRANT LA CHARGE ADDITIONNELLE. LA CHARGE SOULEVÉE LORS DE L’ACTION CONCENTRIQUE EST DONC INFÉRIEURE À CELLE QUI EST CONTRÔLÉE LORS DE LA DESCENTE.* [IMAGE]. [HTTPS://WWW.TITAN.FITNESS/STRENGTH/SPECIALTY-MACHINES/ACCESSORIES/ECCENTRIC-HOOKS/420015.HTML](https://www.titan.fitness/strength/specialty-machines/accessories/eccentric-hooks/420015.html) **B** – SÜSS MED. (2018). *SYSTÈME INFORMATISÉ DE MODULATION DE LA CHARGE QUI PERMET DE CONTRÔLER PRÉCISÉMENT LA CHARGE IMPOSÉE LORS DES DIFFÉRENTES ACTIONS MUSCULAIRES.* [MODELISATION 3D]. [HTTPS://WWW.SUESSMED.COM/KRAFTMESSUNG/](https://www.suessmed.com/kraftmessung/)18

FIGURE 3. – ABBOTT, BIGLAND ET RITCHIE, 1952 - ERGOCYCLE EXCENTRIQUE ORIGINAL. DEUX VÉLOS PLACÉS DOS À DOS RELIÉS PAR UNE SEULE CHAÎNE AU NIVEAU DES PÉDALIERS ET SÉPARÉS PAR UN SYSTÈME TAMPON MUNI D’UNE JAUGE DE FORCE.25

FIGURE 4. – **A** – TIRÉ DE L’ÉTUDE D’ABBOTT, BIGLAND ET RITCHIE (1952) - CONSOMMATION D’OXYGÈNE EN FONCTION DE LA CADENCE DE PÉDALAGE. PLUS LA CADENCE DE PÉDALAGE AUGMENTE, PLUS L’ÉCART DANS LA CONSOMMATION D’OXYGÈNE S’ACCENTUE ENTRE LE PÉDALAGE EXCENTRIQUE ET LE PÉDALAGE CONCENTRIQUE. **B** - COMPARAISON DE LA CONSOMMATION D’OXYGÈNE EN FONCTION DE LA PUISSANCE DE TRAVAIL EFFECTUÉ PAR MINUTE ENTRE PÉDALAGE CONCENTRIQUE ET EXCENTRIQUE. L’AUGMENTATION DE LA CONSOMMATION EN OXYGÈNE EST MOINS ÉLEVÉE POUR LE PÉDALAGE EXCENTRIQUE COMPARATIVEMENT AU PÉDALAGE CONCENTRIQUE.27

FIGURE 5. – PÉDALAGE EXCENTRIQUE EN POSITION SEMI-ALLONGÉE AVEC SUPPORT LOMBAIRE PERMETTANT UNE PLUS GRANDE STABILISATION DU TRONC.....28

FIGURE 6. – DEUX MODÈLES COMMERCIAUX D’ERGOCYCLES EXCENTRIQUES EN POSITION DEBOUT (DROITE) ET SEMI-ALLONGÉE (GAUCHE) (CYCLUS 2, LEIPZIG, ALLEMAGNE).....29

FIGURE 7. – CHANGEMENT DANS L’ANGLE ARTICULAIRE (CHEVILLE ET GENOU) PENDANT L’ACTION MUSCULAIRE EXCENTRIQUE DURANT UN SAUT EN PROFONDEUR CHEZ DES SUJETS ADULTES ACTIFS DE FAÇON RÉCRÉATIVE (PARTICIPANTS : 19 HOMMES, ÂGE: 21.3 ± 0.9 ANS, DURÉE DU PROTOCOLE : 8 SEMAINES, FRÉQUENCE : 2X/SEMAINE, VOLUME D’ENTRAÎNEMENT : 3-6 SÉRIES DE 5-10 RÉPÉTITIONS, INTENSITÉ : 70-90% DE 1RM EXCENTRIQUE SUR APPAREIL ISOCINÉTIQUE). ADAPTÉE DE PAPADOPOULOS ET AL. (2014) 32

FIGURE 1. – *PRISMA-SCR FLOW CHART OF THE STUDY SELECTION PROCESS, ACCORDING TO TRICCO ET AL. (2018).*49

FIGURE 2. – SEARCH RESULTS FROM QUERYING ‘ECCENTRIC CYCLING’ OR ‘BACKWARD PEDALING’ IN PUBMED SINCE 2000.51

FIGURE 8. – PLAGES D’INTENSITÉ DE TRAVAIL UTILISÉES PAR LES AUTEURS DES ARTICLES SÉLECTIONNÉS EN FONCTION DU MODÈLE DE PUISSANCE EXCENTRIQUE MAXIMALE DE WALSH ET AL. (2021). ON REMARQUE L’ABSENCE D’INTENSITÉ DE TRAVAIL SUPÉRIEURES À 50.3%. 71

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AEL : surcharge excentrique accentuée

CMJ : saut en contrebas

CSA : surface en coupe transversale

EEA : entraînement excentrique accentuée

EAAll : entraînement excentrique accentué iso-inertielle

EEL : entraînement avec phase excentrique lente

EMG : électromyographie de surface

EO : surcharge excentrique

FCmax : fréquence cardiaque maximale

HIIT : entraînement par intervalles à très haute intensité

PAM : puissance aérobie maximale

PETP : potentiel de force excentrique maximal

SSC : cycle étirement-raccourcissement

MVIC : contraction maximale volontaire isométrique

RM : répétitions maximales

Vmax : vitesse maximale

VO₂ : consommation en oxygène

INTRODUCTION

La pandémie du COVID-19 a obligé la très grande majorité des individus de la classe ouvrière des pays développés à remodeler plusieurs aspects de leur vie quotidienne, autant professionnelle que personnelle. À l'image de plusieurs autres étudiants, mes vingt-deux derniers mois ont été parsemés de défis et de contraintes au niveau académique. Le travail qui suit n'en fait pas exception. Le projet de recherche sur lequel devait initialement porter mon travail de maîtrise a dû être abandonné quelque part entre la deuxième et troisième vague de la pandémie. C'est ainsi que mon projet de recherche sur les adaptations chroniques au pédalage excentrique chez les athlètes d'endurance en cyclisme et en course à pied s'est métamorphosé en étude de portée sur les adaptations chroniques au pédalage excentrique et ses impacts sur la performance dans le sport.

Le pédalage excentrique s'effectue typiquement sur un ergocycle excentrique moderne qui est muni d'un moteur relié au pédalier et qui le fait tourner à sens inverse. Cette forme de pédalage exige que le participant freine l'action du pédalier tout en maintenant une cadence prédéterminée. Pour réaliser cette action, les muscles du participant sont principalement sollicités dans leur phase d'allongement ce qui se traduit par un travail musculaire excentrique. Comparativement au pédalage conventionnel, le pédalage excentrique permet la prescription d'intensités de travail beaucoup plus élevées tout en étant associé à une réponse cardiorespiratoire beaucoup plus faible. Outre le pédalage excentrique, le mode excentrique est aussi utilisé dans différentes formes de renforcement musculaire employées en préparation physique, telles que : les mouvements excentriques lents, accentués (avec ou sans poulie iso-inertielle) et pliométriques. Ces méthodes d'entraînement ont bénéficié d'une hausse de popularité dans les travaux de recherche sur le développement des aptitudes athlétiques, mais le pédalage excentrique demeure peu répandu. Il est principalement utilisé dans les laboratoires et en clinique. Les paramètres d'entraînement et les mécanismes physiologiques expliquant les adaptations fonctionnelles suivant une exposition prolongée à l'entraînement au pédalage excentrique ne sont pas encore entièrement élucidés.

Une revue de portée est un type de revue considérée idéale lorsque la littérature scientifique portant sur un sujet spécifique n'est pas abondante et lorsque les méthodes de recherches utilisées dans le passé sont hétérogènes, ce qui rend impossible la faisabilité d'une revue systématique et la réalisation d'une méta-analyse. Les objectifs principaux de ce travail consistent donc à :

- I. Explorer les évidences scientifiques actuelles sur les adaptations chroniques au pédalage excentrique.
- II. Élaborer une synthèse des bénéfices potentiels du pédalage excentrique sur les déterminants des performances en endurance.
- III. Identifier les lacunes actuelles au niveau de la connaissance sur le pédalage excentrique dans la littérature scientifique afin d'offrir des pistes de recherches potentielles.

Ce projet de recherche a été abordé avec une attention particulière portée aux athlètes d'endurance, qu'ils soient entraînés ou très entraînés (McKay et al. 2022), ainsi qu'aux athlètes pratiquant des sports collectifs, qui doivent répéter des efforts pendant un match/entraînement ou une série de matchs/entraînements. Contrairement aux sujets non-entraînés, l'amélioration de la performance chez des athlètes déjà entraînés requiert une planification d'entraînement beaucoup plus spécifique qui est adaptée aux exigences et au niveau de la discipline pratiquée (Häkkinen et al. 1987; Williams et al. 2017; Wetmore et al. 2020)

La première partie de ce travail consiste en une revue de la littérature sur l'entraînement excentrique ainsi que sur les principaux déterminants de la performance dans les sports d'endurance et dans les sports collectifs. Cette première partie sert donc d'introduction aux concepts généraux et aux particularités spécifiques de l'action musculaire excentrique et des méthodes d'entraînement spécifiques à ce mode de contraction musculaire. Les adaptations physiologiques observées à la suite d'une exposition chronique à l'entraînement en résistance excentrique et au pédalage excentrique seront également abordées. Ensuite, un résumé des principaux déterminants de la performance chez les athlètes d'endurance est présenté afin d'améliorer la compréhension du lecteur sur les adaptations chroniques ciblées par l'entraînement au pédalage excentrique et ainsi mettre la table pour la revue de portée.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1. TYPES DE CONTRACTIONS MUSCULAIRES

Les contractions musculaires sont généralement catégorisées en trois types : statique (isométrique), dynamique concentrique et dynamique excentrique. Elles sont définies en fonction du mouvement actif des segments et des mécanismes de production de force dans les sarcomères. La contraction musculaire isométrique est caractérisée par une absence de mouvement au niveau des fibres musculaires malgré la tension générée, puisque la force déployée est équivalente à la force résistante (D. Green 2018; W. Herzog et al. 2016). La contraction musculaire concentrique est caractérisée par un raccourcissement des fibres musculaires quand la force générée par le muscle est supérieure aux forces résistantes (mouvement « positif »), tandis que la contraction musculaire excentrique est caractérisée par un allongement des fibres musculaires en réponse à une force externe supérieure à celle qui est générée par ce même muscle (Douglas 2018) (menant à un mouvement « négatif »). C'est grâce aux contractions musculaires excentriques que nous pouvons freiner nos actions lorsque l'on descend un escalier ou encore une pente à la marche ou à la course (W. Herzog et al. 2016). Il est important de souligner que différents types de contractions musculaires entraînent des réponses physiologiques et des adaptations neuromusculaires à l'entraînement chronique qui sont distinctes (B. J. Schoenfeld et al. 2017; Roig et al. 2009).

2.2. CARACTÉRISTIQUES PROPRES À L'EXCENTRIQUE

Plusieurs caractéristiques spécifiques à la contraction musculaire excentrique témoignent de la particularité de ce mode de contraction. Les principales rapportées sont :

- I. Le muscle a la capacité de produire une tension musculaire bien supérieure (~20-60%) pendant la phase excentrique comparativement à celles observées lors des contractions musculaires concentriques et isométriques (Douglas 2018; Suchomel et al. 2019; Hollander et al. 2007).
- II. On observe une facilitation de la production de force lors de la contraction musculaire isométrique suivant une contraction musculaire excentrique appelée « augmentation de

la force résiduelle » (Edman, Elzinga, and Noble 1982; W. Herzog and Leonard 2002; Abbott and Aubert 1952; Lee and Herzog 2002; Walter Herzog 2014).

- III. Pour une charge de travail équivalente, la contraction musculaire excentrique requiert un coût métabolique beaucoup moins élevé (~3-5x) que lors de contractions concentriques (Suchomel et al. 2019; Abbott, Bigland, and Ritchie 1952; Peñailillo, Blazeovich, and Nosaka 2017; Perrey et al. 2001).
- IV. Une augmentation de la vitesse de contraction musculaire lors de la phase excentrique n'est pas associée à une diminution du potentiel de force maximal. Au contraire, on remarque une élévation puis une stabilisation du potentiel de force avec l'augmentation de la vitesse de contraction (Figure 1) (Komi 1973; Alcazar et al. 2019).

La théorie des filaments glissants et celle du cycle des ponts d'union permettent d'expliquer les mécanismes d'action des contractions musculaires concentriques et isométriques (W. Herzog et al. 2016; D. Green 2018). Cependant, ces modèles classiques en physiologie s'avèrent limités pour bien illustrer les principales caractéristiques spécifiques aux contractions musculaires excentriques (Suchomel et al. 2019; D. Green 2018). L'augmentation de la force résiduelle serait causée par les propriétés élastiques d'un troisième filament : la titine (Hessel, Lindstedt, and Nishikawa 2017; W. Herzog et al. 2016; Walter Herzog 2014). Cette protéine élastique est attachée à la myosine et serait activée suite à la combinaison de l'influx de Ca^{2+} et l'effet de l'allongement du muscle sous tension sur les cycles des ponts d'unions (Hessel, Lindstedt, and Nishikawa 2017). Le filament de titine deviendrait alors de plus en plus rigide avec l'allongement des sarcomères et contribuerait ainsi de plus en plus à l'augmentation de la force suivant la contraction excentrique (Hessel, Lindstedt, and Nishikawa 2017; Walter Herzog 2014). Cette augmentation de la rigidité de la titine permettant d'augmenter l'accumulation d'énergie lors de la phase d'allongement serait réalisée à un coût métabolique nul (Walter Herzog 2014). C'est ce qui expliquerait la plus grande efficacité énergétique des contractions musculaires excentriques.

De plus, des différences au niveau de la régulation neuromusculaire des contractions excentriques ont également été observées. Pour une même tension musculaire, en comparaison avec les contractions concentriques, on observe :

- I. Une activité électrique plus faible (~2-25% membres inférieurs, ~50% membres supérieurs) des unités motrices enregistrées par électromyographie de surface (EMG) (Grabiner and Owings 2002; Fang et al. 2001; Bigland and Lippold 1954).
- II. Une fréquence de décharge des unités motrices moins élevées (~25% - différence augmente selon l'intensité de la contraction)(Duchateau and Enoka 2016; Del Valle and Thomas 2005).
- III. L'activation d'une région distincte et plus grande dans le cortex moteur (~56% et ~30% au niveau des potentiels évoqués corticaux moyens et pics respectivement)(Fang et al. 2001).

Ces différences à l'endroit des mécanismes spécifiques aux contractions musculaires excentriques et les caractéristiques qui les distinguent des autres contractions musculaires permettent d'expliquer les réponses et adaptations caractéristiques observées avec l'exercice excentrique.

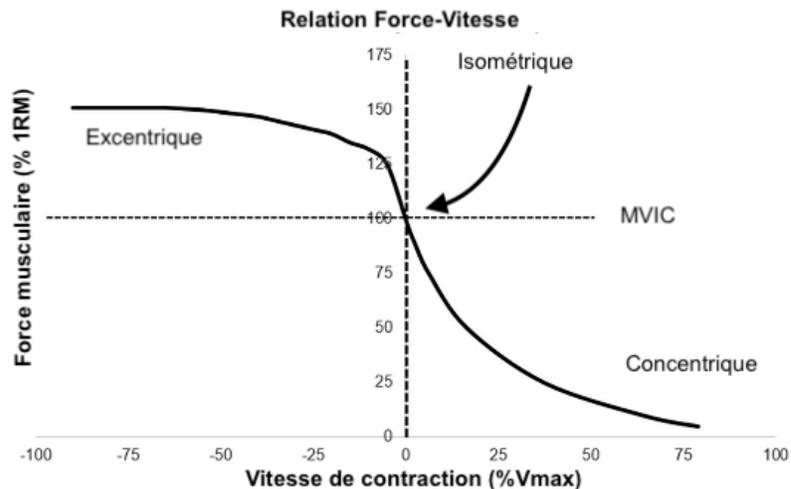


Figure 1. – Relation entre la force musculaire et vitesse de contraction. Force musculaire (% 1RM) en fonction de la vitesse de contraction (%Vmax). On remarque que la vitesse de contraction a un impact positif sur le potentiel de force musculaire excentrique. Au contraire, il y a une corrélation négative de la vitesse de contraction avec la force musculaire concentrique. MVIC : Contraction maximale volontaire isométrique Adaptée de Tinwala et al. 2017.

2.3. MÉTHODES D'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE

Plusieurs méthodes d'entraînement en résistance ciblant la portion excentrique de la contraction musculaire sont utilisées dans les salles d'entraînement. Ces méthodes d'entraînement excentrique varient soit le stimulus musculaire par le biais d'une modification du temps sous

tension, de l'application d'une plus grande surcharge mécanique lors de l'allongement du muscle ou encore d'une combinaison des deux afin de générer les adaptations désirées (Suchomel et al. 2019; McNeill et al. 2019).

Les méthodes de renforcement musculaire dites «excentrique» peuvent être placées dans deux catégories : i) surcharge excentrique (EO, sous-maximale) et ii) surcharge excentrique accentuée (AEL, supra-maximale) (McNeill et al. 2019; Wagle et al. 2017). Les principales méthodes d'entraînement excentrique sont : l'entraînement avec phase excentrique lente (EO), l'entraînement excentrique accentuée (AEL), l'entraînement excentrique iso-inertielle (EO, AEL), la pliométrie (EO, AEL) et le pédalage excentrique (EO, AEL). Ces méthodes permettent de contourner les barrières imposées par la force musculaire concentrique dans l'exécution de l'entraînement en résistance traditionnel (Suchomel et al. 2019; Douglas 2018). De nombreuses évidences scientifiques suggèrent que l'utilisation de méthodes d'entraînement excentrique peut contribuer à rehausser les adaptations fonctionnelles servant à améliorer les performances athlétiques (Douglas 2018; McNeill et al. 2019).

2.4. L'ENTRAÎNEMENT AVEC EXCENTRIQUE LENT

La méthode d'entraînement avec phase excentrique lente (EEL) (ou « tempo training ») est probablement celle qui est la plus couramment utilisée dans la préparation physique des athlètes et chez les adeptes d'entraînement physique à travers le monde. La popularité de cette méthode est expliquée par sa très grande accessibilité, car elle ne nécessite aucun équipement spécialisé (Shibata et al. 2021). L'EEL est une vieille méthode d'entraînement récemment revue par Shibata et al. (2021) et qui consiste à prolonger la portion excentrique d'un mouvement de manière à accentuer le temps sous tension de l'action musculaire excentrique (Carzoli et al. 2019; Mike et al. 2017). L'EEL ne permet pas d'augmenter la tension appliquée sur le muscle lors de la portion excentrique du mouvement, mais plutôt de prolonger le temps sous tension excentrique. Cette caractéristique expliquerait en très grande partie les résultats contradictoires associés à cette méthode d'entraînement (B. J. Schoenfeld, Ogborn, and Krieger 2015).

L'augmentation du temps sous tension lors de l'EEL est limitée par la force musculaire concentrique des participants puisque l'atteinte de l'échec musculaire concentrique survient bien avant l'incapacité à poursuivre l'action musculaire excentrique (Shibata et al. 2021; Brandenburg and Docherty 2002). L'incapacité à produire la force musculaire concentrique nécessaire à la complétion de répétitions supplémentaires provoque la fin de la série de travail. C'est pourquoi des charges de travail moins élevées sont employées avec l'EEL afin de maintenir un volume d'entraînement adéquat. La prescription des charges d'entraînement est ainsi dictée par la force musculaire concentrique au détriment du stimulus appliqué lors de la phase excentrique (Douglas 2018).

Les fondements physiologiques de cette méthode d'entraînement reposent en totalité sur le temps sous tension au détriment de l'intensité ou du volume d'entraînement (B. J. Schoenfeld, Ogborn, and Krieger 2015). La majorité des études suggèrent que cette méthode apporte peu ou pas d'adaptations physiologiques significatives au niveau de la force et de l'hypertrophie en comparaison avec l'entraînement traditionnel sans ralentissement de l'action excentrique (B. J. Schoenfeld et al., 2015; Suchomel et al., 2019). Par exemple une étude récente comparant l'impact de deux «tempo» excentrique différents (2 secondes vs 4 secondes) sur la force maximale au squat 1RM suggère que le ralentissement de la phase excentrique n'est pas optimal (2sec: 18.5 ± 15.4 %, 4sec: 10.5 ± 14.1 %; Shibata et al., 2021). Certaines études suggèrent cependant que le ralentissement de l'action musculaire excentrique permettrait d'augmenter l'activation musculaire (mesuré par EMG) lors de l'action musculaire concentrique, la surface en coupe transversale (hypertrophie musculaire), la concentration de lactate musculaire et la force musculaire (Martins-Costa et al. 2016; Pereira et al. 2016). Par exemple, Pereira et al. (2016) suggère que l'entraînement excentrique lent est bénéfique aux adaptations en force maximale (4 secondes : ~ 32 % ; 2 secondes : ~ 19 %) et en hypertrophie (4 secondes : ~ 17 % ; 2 secondes : ~ 6 %) suivant un protocole d'entraînement de 12 semaines à 2 entraînements par semaine avec une charge de 8RM pour les fléchisseurs du coude. D'autres auteurs soulignent qu'il n'y a pas de différences significatives entre l'utilisation de différentes vitesses d'actions musculaires excentriques (2 et 4 secondes) (Shibata et al. 2021; Azevedo, Oliveira, and Schoenfeld 2022). Ces

résultats hétérogènes pourraient être expliqués par l'incapacité des charges sous-maximales utilisées avec l'EEL de fournir un stimulus assez élevé permettant de recruter les unités motrices à haut seuil d'activation ou encore par la différence dans le temps total sous tension qui peut influencer la synthèse de protéines musculaires (B. J. Schoenfeld, Ogborn, and Krieger 2015; Tanimoto and Ishii 2006; Burd et al. 2012).

Des recherches sont nécessaires afin de déterminer si l'utilisation de l'EEL peut s'avérer efficace lorsque placée stratégiquement dans le calendrier d'entraînement d'un athlète (Suchomel et al. 2019). Pour l'instant, la littérature suggère que l'EEL est une technique d'entraînement qui est non optimale puisqu'elle limite la possibilité d'utiliser des charges de travail lourdes. L'utilisation de cette méthode au sein d'une population d'athlètes entraînés désirant maximiser leurs performances demeure difficile à justifier avec l'état des connaissances.

2.5. L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE ACCENTUÉ

L'entraînement excentrique accentué (EEA) profite du plus grand potentiel de production de force du muscle squelettique dans sa phase d'allongement. Le muscle est capable de produire jusqu'à 60% plus de force lors de la contraction musculaire excentrique comparativement au mode concentrique (Wagle et al. 2017; Hollander et al. 2007). L'EEA a comme principale caractéristique d'imposer une surcharge mécanique lors de l'action excentrique qui est supérieure à celle présente lors de l'action concentrique sans toutefois perturber la mécanique du mouvement (Suchomel et al. 2019; Wagle et al. 2017). La stratégie la plus couramment utilisée implique l'utilisation de charges supérieures au 1RM concentrique, mais elle est aussi parfois utilisée avec des charges sous-maximales avec des sujets moins entraînés (Wagle et al. 2017). L'EEA requiert des instruments (ex. : crochets excentriques, voir Figure 2.A) permettant d'alléger la charge appliquée lors de la fin de l'action excentrique ou de l'équipement sophistiqué permettant de moduler la résistance à l'aide de systèmes robotiques informatisés (exemple à la Figure 2.B). L'utilisation des crochets excentriques peut être contraignante car ils doivent systématiquement être replacés sur la barre entre chaque répétition, ce qui nécessite une supervision constante (Krzysztofik et al. 2019). Cette caractéristique limite l'enchaînement de

nombreuses répétitions de façon consécutive lors des séries de travail ou impose des courtes périodes de repos entre les répétitions. Les outils utilisant des systèmes informatisés de modulation de la charge sont souvent réservés à l'élite, aux fortunés, à certains laboratoires ou aux centres de performance spécialisés en raison du prix associé à de tels systèmes (15 000 à 75 000 \$). Ces outils permettent de contrôler précisément la surcharge imposée lors de l'action excentrique et permettent l'enchaînement de plusieurs répétitions consécutives avec beaucoup moins de restrictions. Il est aussi possible d'utiliser le principe de surcharge excentrique à l'aide d'appareils d'entraînement à résistance pneumatique, cependant le délai nécessaire à la modification de la résistance ne permet pas d'enchaîner les répétitions sans interruption.

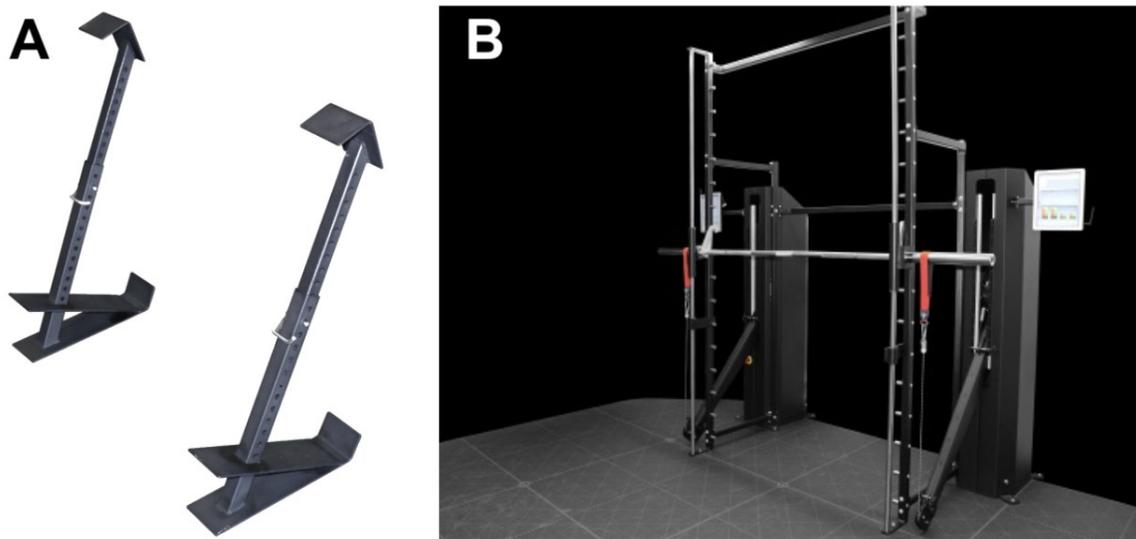


Figure 2. – Équipement permettant d'imposer une surcharge mécanique lors de l'action musculaire excentrique. **A** – Titan Fitness. *Crochets excentriques - Dispositif mécanique permettant de surcharger la contraction musculaire excentrique. Les crochets se décrochent automatiquement à la fin de l'action musculaire excentrique, retirant la charge additionnelle. La charge soulevée lors de l'action concentrique est donc inférieure à celle qui est contrôlée lors de la descente.* [Image]. <https://www.titan.fitness/strength/specialty-machines/accessories/eccentric-hooks/420015.html> **B** – Süß MED. (2018). *Système informatisé de modulation de la charge qui permet de contrôler précisément la charge imposée lors des différentes actions musculaires.* [Modélisation 3D]. <https://www.suessmed.com/kraftmessung/>

En pratique, l'EEA peut aussi être utilisée sans équipement spécifique. Il est possible d'utiliser cette méthode en exécutant la portion excentrique avec une seule jambe (par exemple) avant d'utiliser les deux pour la portion concentrique. En pliométrie, il est aussi possible de surcharger

la phase excentrique à l'aide de bandes élastiques ou de poids libres lors de sauts en profondeur. Une section de ce travail est réservée aux caractéristiques spécifiques à cette méthode d'entraînement. L'EEA est aussi utilisée avec des méthodes peu orthodoxes (ex : intervenant qui ajoute manuellement une résistance additionnelle lors de la phase excentrique d'un mouvement) qui ne permettent pas de contrôler précisément l'application de surcharge excentrique.

Le principal bienfait de l'EEA réside dans le fait qu'elle permet l'enchaînement sans interruption de contractions musculaires excentriques et concentriques tout en étant en mesure de surcharger les tissus musculaires et conjonctifs dans la portion excentrique du mouvement. Plusieurs études (détails des études dans le *tableau 1*) suggèrent que l'EEA permet d'obtenir des adaptations significatives similaires ou supérieures à l'entraînement traditionnel au niveau de l'hypertrophie musculaire (surface en coupe transversale)(Walker et al. 2016), et/ou une augmentation de la force (Brandenburg and Docherty 2002; Walker et al. 2016), et/ou une augmentation de la puissance lors de sauts verticaux (Cook, Beaven, and Kilduff 2013; Suchomel et al. 2019; McNeill et al. 2019; Wagle et al. 2017). Quelques études rapportent toutefois une diminution de la force maximale (Ojasto and Häkkinen 2009) immédiatement après une séance d'entraînement avec surcharge excentrique supra-maximale (Wagle et al. 2017). Les observations parfois contradictoires sur l'EEA suggèrent qu'il faut être prudent avec la fatigue aiguë induite suite à un travail musculaire comportant une surcharge excentrique supra-maximale (Wagle et al. 2017; Ojasto and Häkkinen 2009). Les résultats rapportés dans la littérature témoignent d'un potentiel certain au niveau des adaptations physiologiques permettant de rehausser les différentes qualités musculaires et donc la performance sportive (Wagle et al. 2017; Doan et al. 2002; Brandenburg and Docherty 2002). L'élaboration de paramètres d'entraînement permettant la mise en application pratique de l'EEA repose sur une meilleure compréhension des ratios de surcharge excentrique et de son impact sur la charge d'entraînement totale de l'athlète (Wilk et al. 2018; Wagle et al. 2017; Ojasto and Häkkinen 2009). Plus de recherches sont nécessaires sur l'EEA afin d'améliorer l'état des connaissances sur l'effet de ces paramètres au niveau des adaptations chroniques (Wagle et al. 2017) et leur

impact sur la performance.

Tableau 1 : Caractéristiques des études avec surcharge excentrique accentuée

| Études | # de participants | Âge des participants | Durée de l'étude | Fréquence d'entraînement | Intensité | Protocole d'entraînement | Groupe musculaire sollicité | Qualité musculaire | Résultats |
|--|-------------------|----------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| Brandenburg and Docherty (2002) | 28 | NA | 9 sem | 2-3x/sem | 75% 1RM AEL: CON + 35-45% | 3-4 séries 10 répétitions | MS | Force maximale | ↑ 1RM: 23.9 % (AEL); 14.5 % (TRAD) |
| Doan et al. (2002) | 8 | 23.9 | 4 sem | 1-2x/sem | 1RM AEL: 105% 1RM | 3 séries | MS | Force maximale | ↑ 1RM (AEL): 3.2 % vs TRAD |
| Ojasto and Häkkinen (2009) | 11 | 32.4 ± 4.3 | 7 sem | 1-2x/sem | 1RM AEL: 105-120% 1RM | jusqu'à 2 essais manqués consécutifs | MS | Force maximale | ↓ 1RM (AEL): 3.6 % |
| Cook, Beaven and Kilduff (2013) | 20 | 19.7 ± 0.7 | 12 sem | 3-4x/sem | 5RM @ 80% AEL: 120% 1RM | 12 séries/jour | MS/MI | Force maximale Puissance | ↑ 1RM (AEL): 4.2 %, hedges' g: 2.17 (MS); 2.0 %, hedges'g: 1.46 (MI) ↑ Pmax (AEL + OS): 3.3 %, hedges'g: 1.32 |
| Walker et al. (2016) | 28 | 21 ± 2 | 10 sem | 2x/sem | 6-10 RM AEL: CON + 40% | 3 séries | MI | Hypertrophie Force maximale | ↑ CSA: 13 ± 9 % (AEL); 11 ± 12 % (TRAD) ↑ 1RM: 31 ± 13 % (AEL); 36 ± 13 % (TRAD) |

Abréviations :

AEL: Entraînement excentrique accentué, CON: groupe contrôle, CSA: surface en coupe transversale, MI: membres inférieurs, MS: membres supérieurs, OS: entraînement en survitesse, Pmax: puissance maximale, RM: répétitions maximales, TRAD: entraînement traditionnel

* Ensemble de ces études ont été réalisées auprès d'hommes

2.6. L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE ACCENTUÉ ISO-INERTIEL

L'entraînement excentrique accentué iso-inertielle (EEAI) est une autre méthode d'entraînement permettant d'exploiter les caractéristiques de la contraction musculaire excentrique. Cette méthode d'entraînement est le résultat de la recherche sur l'impact de la microgravité sur le tissu musculaire des astronautes (Berg and Tesch 1998). La résistance imposée lors de l'action excentrique est déterminée par l'énergie cinétique emmagasinée dans une roue inertielle. La masse de la roue inertielle ainsi que la vitesse et la distance parcourue lors de l'action concentrique déterminent la quantité d'énergie cinétique accumulée par la roue inertielle (Suchomel et al. 2019; Raya-González et al. 2021; Maroto-Izquierdo et al. 2019). Une action concentrique rapide et un ralentissement lors de la fin de l'action musculaire excentrique sont nécessaires à l'optimisation de la surcharge musculaire avec l'EEAI. Cette particularité permet de maximiser le cycle étirement-raccourcissement (SSC) ce qui entraîne une plus grande production de force lors de l'initiation du mouvement concentrique et l'atteinte d'une puissance excentrique plus élevée (Maroto-Izquierdo et al. 2017).

Plusieurs études (détails des études dans le *tableau 2*) suggèrent que la surcharge musculaire excentrique engendrée par l'EEAI permet des adaptations structurelles et fonctionnelles supérieures à l'entraînement en résistance traditionnel chez une population athlétique et bien entraînée (Maroto-Izquierdo et al. 2019; Maroto-Izquierdo, García-López, and de Paz 2017; Norrbrand et al. 2008; Suchomel et al. 2019). Les adaptations physiologiques observées sont: une augmentation de la masse musculaire (Tesch et al. 2004; Norrbrand et al. 2008); une augmentation de la force maximale isométrique (~11-39%), concentrique et excentrique (~21-90%) (Maroto-Izquierdo, García-López, and de Paz 2017; Fernandez-Gonzalo et al. 2014); une augmentation de la puissance maximale (~10-33%) (Maroto-Izquierdo, García-López, and de Paz 2017; Naczki et al. 2016); une augmentation de la vitesse de course maximale (Maroto-Izquierdo, García-López, and de Paz 2017) et une augmentation dans l'activité EMG (Seynnes, de Boer, and Narici 2007) (Maroto-Izquierdo et al. 2019; Suchomel et al. 2019). Dans les sports collectifs, ces

adaptations mènent à des améliorations dans les habiletés de sauts et de changements de direction (Raya-González et al. 2021).

Tableau 2 : Caractéristiques des études sur l'entraînement excentrique accentué iso-inertiel

| Études | Modèle d'étude | # de participants | Sexe des participants | Âge des participants | Durée de l'étude (semaines) | Protocole d'entraînement | Qualité musculaire | Résultats |
|--|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|---|---|
| Tesch et al. (2004) | PRE-POST | H/F | 10 | 39 ± 8 | 5 | 4 x 7 Ext. genou | Hypertrophie Force Maximale | ↑ Masse musculaire (IRM): 6.1% ↑ Force maximale: 11% |
| Seynnes, de Boer and Narici (2007) | PRE-POST | H/F | 13 | 20.9 ± 2.6 | 5 | 4 x 7 Ext. genou | Force ISO Activation Hypertrophie | ↑ MVIC: 38.9 ± 5.7 % ↑ EMG: 34.8 ± 4.7 % ↑ CSA: 6.95 ± 1.06 % |
| Norrbrand et al. (2008) | EEAll vs TRAD | H | 15 | 39.1 ± 8.3 | 5 | 4 x 7 Ext. genou | Hypertrophie | ↑ EEAll: 6.2 % vs TRAD: 3 % |
| Fernandez-Gonzalo et al. (2014) | PRE-POST | H/F | 32 | 23.5 ± 1.1 | 6 | 4 x 7 Squat couché | Force maximale Puissance Hypertrophie | ↑ 1RM: 20-25% ↑ Puissance: 3-6% (CMJ) ; 4-8% (SJ); 3-11%(DJ) ↑ Masse musculaire: 4.6-5.4% |
| Nacz et al. (2016) | EEAll vs TRAD | H | 58 | 21.6 ± 0.9 | 5 | 3 x 15 sec Ext. genou | Force maximale Puissance Hypertrophie | ↑ Force maximale: 23.3% ↑ Puissance maximale: 27% ↑ Puissance: 6.67% (CMJ); 7.37% (MP6) ↑ Masse musculaire (bioimpedance): 15.1% |
| Maroto-Izquierdo, García-López and de Paz (2017) | EEAll vs TRAD | H | 29 | 21.7 ± 2.3 | 6 | 4 x 7 Ext. genou | Force maximale Puissance | ↑ 1RM: 12.2% (EAll) vs 7.9% (CON) ↑ Puissance (CMJ): 9.8% (EAll) vs 3.4% (CON) |
| Maroto-Izquierdo et al. (2019) | EEAll vs TRAD | H/F | 40 | 21.7 ± 3.4 | 6 | 4 x 7 RFE split squat | Force Maximale Puissance | ↑ 1RM : 22.4% ↑ Puissance maximale: 52% ↑ Puissance @ 40-70% 1RM : 15.8-21.7% ↑ Puissance @ 80% 1RM : 15.3% |

Abréviations :

CMJ: saut en contrebas, CON: Groupe contrôle, CSA: surface en coupe transversale, DJ: saut en profondeur, EEAll: Entraînement excentrique iso-inertielle, EMG: électromyographie de surface, Ext: extension, F: femmes, H: hommes, H/F: hommes et femmes, IRM: imagerie par résonance magnétique, MP6: puissance maximale 6 secondes, MVIC: contraction maximale volontaire isométrique, RFE: pied arrière surélevé, RM: répétitions maximales SJ: Squat + saut, TRAD: entraînement traditionnel

2.7. PLIOMÉTRIE

La pliométrie est communément utilisée depuis très longtemps dans les pratiques d'entraînement du sportif. Cette méthode repose sur un allongement et d'un freinage rapide du muscle (phase excentrique) immédiatement suivi d'un changement de direction vers une contraction concentrique (Suchomel et al. 2019; Sáez de Villarreal-Sáez, Requena, and Cronin 2012; Sole et al. 2021; Ramirez-Campillo et al. 2021). Le travail en pliométrie est basé sur les principes physiologiques d'augmentation de la force résiduelle et du réflexe myotatique qui surviennent grâce au couplage rapide entre les contractions concentriques et excentriques (Król and Mynarski 2012). Ces deux mécanismes sont impliqués dans le SSC. Les fuseaux neuromusculaires sont stimulés par le changement rapide de la longueur musculaire ce qui entraîne la stimulation et la contraction du muscle agoniste (Król and Mynarski 2012). De plus, l'énergie élastique accumulée dans la phase d'amortissement du SSC est utilisée par la composante élastique en série ce qui permet d'augmenter la force de la contraction musculaire concentrique subséquente (Suchomel et al. 2019; Verkhoshansky and Siff 2009; Taube, Leukel, and Gollhofer 2012). La surcharge excentrique est appliquée via une augmentation de la vitesse d'allongement ou de la charge appliquée (hauteur du saut et/ou addition de bandes élastiques ou charges corporelles).

La littérature suggère que les adaptations fonctionnelles à l'entraînement en pliométrie sont causées par des changements aux niveaux musculaires, neuromusculaires, et du complexe musculo-tendineux (Ramirez-Campillo et al. 2021). Ces adaptations sont principalement associées à l'optimisation des boucles réflexes causé par l'amélioration de la transmission et de la pré activation au niveau spinal et supra spinal respectivement (Ramirez-Campillo et al. 2021; Taube, Leukel, and Gollhofer 2012; Chimera et al. 2004). Cette augmentation de l'efficacité du SSC combiné à une amélioration de la rigidité des complexes musculo-tendineux permettent d'augmenter la performance dans les sauts en hauteur (~7 à 10 %, ES : 0.84 ; Sáez de Villarreal-Sáez et al. 2009) et dans la vitesse de course maximale au sprint (ES : 0.37, ~0.08 sec ; Sáez de Villarreal-Sáez, Requena, and Cronin 2012). La rigidité est souvent expliquée en faisant référence

au modèle de masse-ressort et à la loi de Hooke (Brughelli and Cronin 2008) dans lequel le potentiel de production de force d'un ressort est proportionnel à sa déformation puisqu'elle entraîne une augmentation de son énergie potentielle élastique. Le concept de rigidité fait ici référence à la relation entre la force appliquée et le niveau de déformation des tissus musculaires, tendineux, ligamentaires et cartilagineux (Butler, Crowell, and Davis 2003). L'augmentation de la rigidité des membres inférieurs permet d'augmenter la contribution de l'énergie élastique à la phase concentrique du SSC lors d'un saut ou d'un changement de direction (A. Arampatzis, Brüggemann, and Klapsing 2001; Cormie, McGuigan, and Newton 2010b).

Chez les athlètes d'endurance, une méta-analyse suggèrent que le travail en pliométrie peut améliorer l'économie de course ($\sim 4\%$, $-2.32 \pm 2.07 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) chez des coureurs entraînés et très-entraînés (5 études, 93 coureurs, 78 hommes, 15 femmes, VO_2max : 61.2 - 71.1 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$; 8-12 semaines, 2-3x/semaine ; Balsalobre-Fernández, Santos-Concejero, and Grivas 2016). Cet effet largement bénéfique sur l'économie de course permettrait d'optimiser les performances en endurance chez des athlètes entraînés et très entraînés. Par exemple, une étude menée auprès de coureurs entraînés et très entraînés de 6 semaines suggère que l'ajout de 2 séances par semaine de pliométrie permettrait d'améliorer la performance en course à pied de 3.9% (~ 18 secondes) sur une distance de 2.4 km (Ramírez-Campillo et al. 2014). Une autre étude menée auprès de coureurs très entraînés pendant 9 semaines suggère que l'ajout de séances de pliométrie permettrait d'améliorer la performance en course à pied de 3.1% (~ 36 secondes) sur une distance de 5 km (Paavolainen et al. 1999).

2.8. PÉDALAGE EXCENTRIQUE

Il faut remonter au début des années 1950 pour voir apparaître le premier ergocycle excentrique dans la littérature scientifique, plus précisément en 1952 dans l'étude d'Abbott, Bigland et Ritchie (1952) (Figure 3). Les chercheurs dans cette étude avaient placé deux vélos dos à dos en reliant les deux pédaliers à l'aide d'une chaîne. Les deux vélos étaient séparés par un système tampon auquel on avait ajouté une jauge de force. Pendant qu'un premier sujet pédalait normalement sur un des vélos à une cadence fixe, le deuxième sujet devait freiner l'action du premier en

fonction d'une puissance prédéterminée. Indépendamment des sujets ou de la cadence de pédalage, la consommation en O_2 (VO_2) était considérablement moins élevée lors du pédalage excentrique comparativement au pédalage traditionnel (concentrique) (Abbott, Bigland, and Ritchie 1952). Aussi, plus la cadence de pédalage était augmentée, plus la différence dans la consommation en O_2 s'accroissait entre les deux conditions (voir figure 4.A). Le premier ergocycle excentrique motorisé est introduit l'année suivante dans l'étude d'Abbott et Bigland (Abbott and Bigland 1953). Pour contrôler la vitesse de pédalage, les auteurs avaient lié la roue arrière d'un vélo à pignon fixe à une poulie à cône fixé à un moteur (Abbott and Bigland 1953). Les ergomètres excentriques se sont beaucoup modernisés au fil du temps et sont maintenant disponibles en version commerciale (voir figure 6). Bien que le pédalage excentrique ait fait son apparition dans la littérature il y a presque 70 ans, peu de travaux ont été menés sur le sujet, ce qui explique la paucité des travaux sur le sujet. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne les adaptations chroniques au pédalage excentrique et leurs impacts sur la performance en endurance.

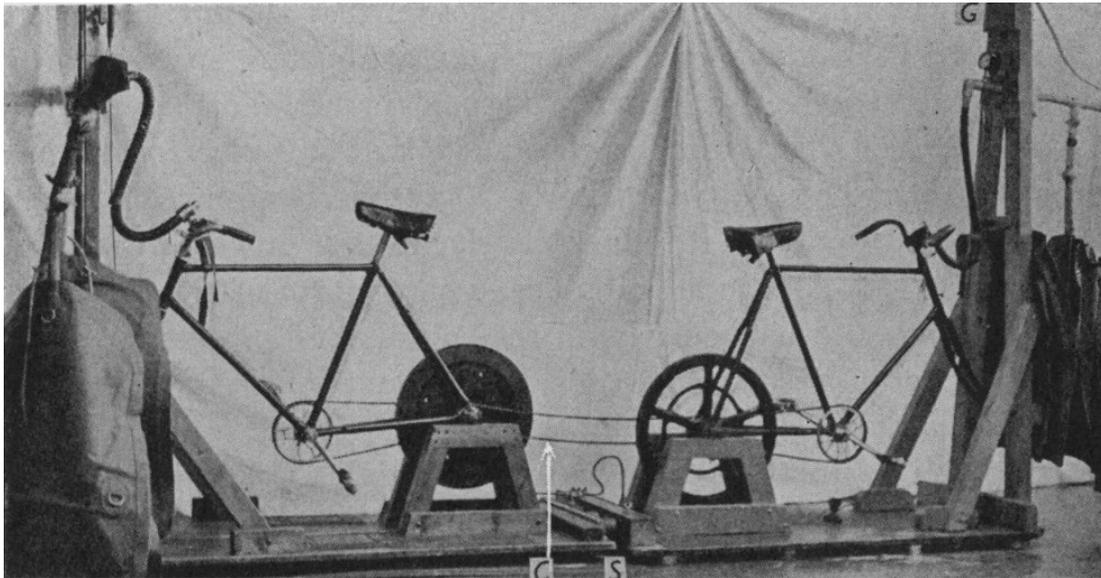


Figure 3. – Abbott, Bigland et Ritchie, 1952 - Ergocycle excentrique original. Deux vélos placés dos à dos reliés par une seule chaîne au niveau des pédales et séparés par un système tampon muni d'une jauge de force.

Le pédalage excentrique est caractérisé par une succession de contractions musculaires excentriques au niveau des membres sollicités (pédalage excentrique avec membres supérieurs ou membres inférieurs). La sollicitation musculaire très faible lors de la phase concentrique est ce qui permet au pédalage excentrique de se distinguer des autres méthodes d'entraînement excentrique. Cela en fait l'outil idéal pour administrer un très haut volume de contractions musculaires excentriques pluriarticulaires au niveau des membres inférieurs ou supérieurs. Cette particularité du pédalage excentrique d'isoler l'action musculaire excentrique est d'autant plus intéressante pour la recherche puisque cela permet d'analyser les mécanismes d'adaptations spécifiques aux contractions musculaires excentriques (D. Green 2018). Il est autrement impossible de le faire étant donné la complexité d'isoler les différents types de contractions musculaires spécifiques aux gestes sportifs (D. Green 2018).

Quatre autres caractéristiques expliquent aussi pourquoi le pédalage excentrique semble être une méthode d'entraînement intéressante :

- I. Permet de réaliser un volume d'entraînement excentrique très élevé (volume X intensité)
- II. Tâche motrice simple à maîtriser pour la plupart des sujets après une courte période de familiarisation (≥ 1 séance) (D. J. Green et al. 2017).
- III. Le travail en pédalage excentrique impose un stress sur le système cardiovasculaire beaucoup plus faible que le même travail effectué en pédalage conventionnel (Abbott, Bigland, and Ritchie 1952; Bigland-Ritchie, Graichen, and Woods 1973).
- IV. Outil de travail augmentant l'efficacité des séances d'entraînement puisqu'il permet de compléter la même quantité de travail dans une plus courte période de temps (Dillon 2017).

L'ensemble de ces caractéristiques expliquent l'importance et la pertinence du pédalage excentrique dans un cadre de recherche afin de maximiser son potentiel autant chez les populations cliniques que les athlètes entraînés. Bien qu'il est vrai que le pédalage excentrique permet de recruter exactement les mêmes muscles que ceux impliqués dans le pédalage conventionnel (Eidsheim and Rønnestad 2016), plusieurs auteurs suggèrent que le pédalage

excentrique peut être un outil d'entraînement intéressant pour l'ensemble des athlètes, autant pour les sportifs d'endurance que ceux pratiquant les sports collectifs (Barreto, de Lima, and Denadai 2021). Le pédalage excentrique avec les membres inférieurs permet également de faire travailler simultanément les complexes articulaires de la cheville, du genoux et de la hanche contrairement aux autres ergomètres iso-cinétiques qui sont mono-articulaires (S. J. Elmer et al. 2010).

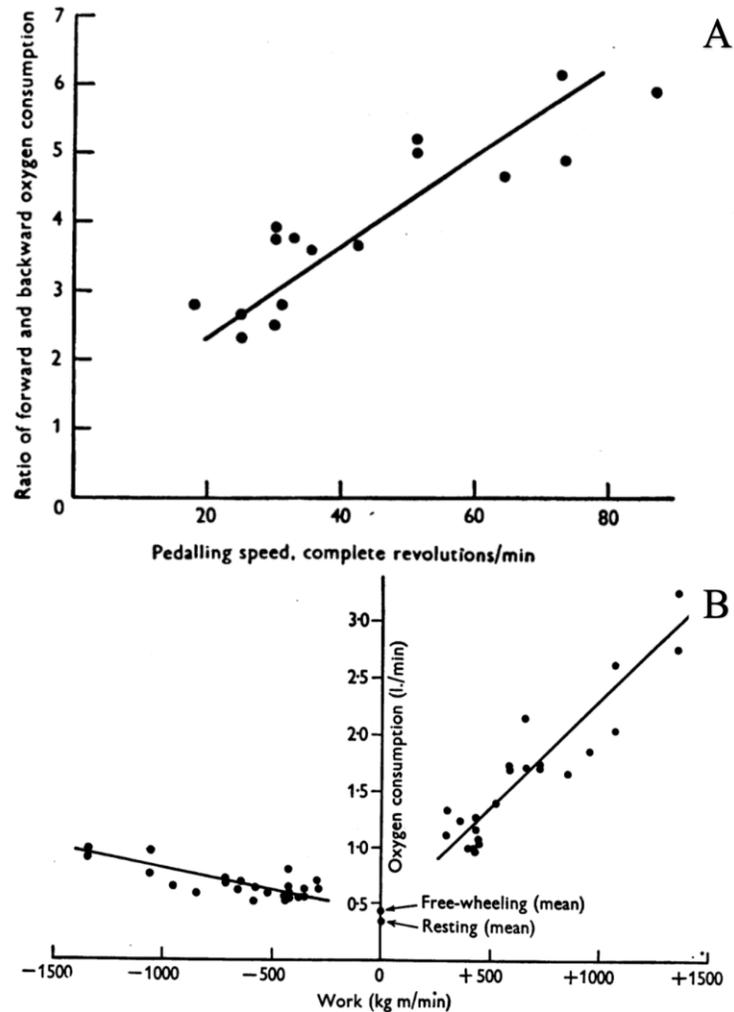


Figure 4. – A – Tiré de l'étude d'Abbott, Bigland et Ritchie (1952) - Consommation d'oxygène en fonction de la cadence de pédalage. Plus la cadence de pédalage augmente, plus l'écart dans la consommation d'oxygène s'accroît entre le pédalage excentrique et le pédalage concentrique. B - Comparaison de la consommation d'oxygène en fonction de la puissance de travail effectuée par minute entre pédalage concentrique et excentrique. L'augmentation de la consommation en oxygène est moins élevée pour le pédalage excentrique comparativement au pédalage concentrique.

Il existe deux principaux modèles d'ergocycles excentriques : un plaçant le sujet dans une position identique au vélo conventionnel (debout) et l'autre en position semi-allongée. Le pédalage excentrique en position debout sollicite davantage les fléchisseurs des hanches, les muscles de la ceinture abdominale et ceux du tronc afin de contribuer à la stabilisation du corps sur la selle afin que le sujet puisse produire la force nécessaire contre le mouvement arrière du pédalier (Lipski, Abbiss, and Nosaka 2018b, 2018a; Lipski 2018). Le sujet est donc positionné de manière à exécuter le travail musculaire excentrique avec des angles articulaires identiques à ceux observés lors du pédalage conventionnel (Eidsheim and Rønnestad 2016). Le pédalage excentrique en position allongée permet de relâcher davantage les muscles qui ne sont pas directement impliqués dans le freinage du pédalier puisque le tronc est stabilisé par le dossier de la selle (S. Elmer et al. 2012; Paulsen et al. 2019).

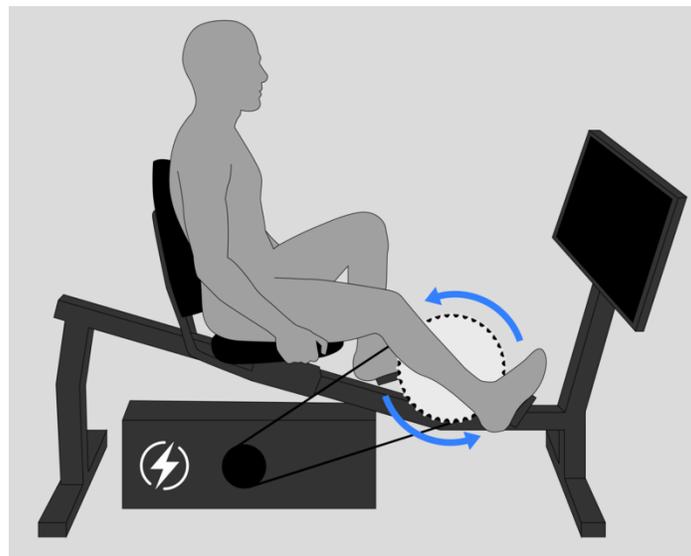


Figure 5. – Pédalage excentrique en position semi-allongée avec support lombaire permettant une plus grande stabilisation du tronc

Le pédalage excentrique en position semi-allongée est donc plus propice à la prescription d'une intensité de travail plus élevée, voire extrêmement élevée, puisque la force de stabilisation des muscles de la ceinture abdominale et de la musculature du tronc ne devient pas un facteur aussi limitant à la capacité d'effort des membres inférieurs lors du freinage du pédalier (Paulsen et al. 2019; S. J. Elmer and Martin 2010). Même en position semi-allongée, l'effort de stabilisation des

biceps brachiaux à intensité élevée peut avoir un impact négatif sur la capacité d'expansion de la cage thoracique et donc du volume courant respiratoire (Lechauve et al. 2014). L'effort de stabilisation requis lors du pédalage en position debout est encore plus important. Le pédalage excentrique en position semi-allongée ne permet toutefois pas un travail excentrique qui place les membres inférieurs dans des angles articulaires identiques à celles du pédalage conventionnel.

Le pédalage excentrique permet d'accumuler un grand volume de contractions excentriques et donc potentiellement d'amener des adaptations permettant de protéger le muscle contre le dommage qu'il pourrait subir lors d'efforts prolongés et/ou répétés. Toutefois, pour le moment, très peu d'études ont soumis les participants à des puissances de travail assez élevées pour observer ces adaptations (< 30% puissance excentrique maximale; Walsh et al. 2021).

Les particularités du pédalage excentrique sont attrayantes pour la recherche, mais le niveau de connaissance scientifique sur l'entraînement avec pédalage excentrique n'est pas encore adéquat pour bien définir les paramètres d'entraînement permettant d'améliorer les performances athlétiques (Barreto, de Lima, and Denadai 2021). L'hétérogénéité des protocoles d'entraînement dans la littérature rend leur interprétation difficile. La revue de portée présentée ci-après tentera d'identifier les pistes de recherche potentielle permettant de mieux comprendre le potentiel du pédalage excentrique pour améliorer les performances en endurance.



Figure 6. – Deux modèles commerciaux d'ergocycles excentriques en position debout (droite) et semi-allongée (gauche) (Cyclus 2, Leipzig, Allemagne).

2.9. ADAPTATIONS CHRONIQUES À L'ENTRAÎNEMENT EXCENTRIQUE

Cette section vise à donner un aperçu des adaptations physiologiques observées à la suite d'une exposition chronique à l'entraînement en résistance excentrique et au pédalage excentrique et rapportées dans la littérature. Ces adaptations sont regroupées dans cinq catégories :

- I. Adaptations structurelles
- II. Adaptations neuromusculaires
- III. Adaptations musculaires
- IV. Adaptations au niveau du contrôle moteur
- V. Adaptations métaboliques.

On observe une grande hétérogénéité dans la littérature scientifique sur l'entraînement excentrique (durée de l'exposition, qualité et types de données rapportées, état d'entraînement des participants, protocoles d'entraînement), en plus d'un nombre restreint de publications ayant étudié des individus entraînés. Ces lacunes mènent les auteurs à être généralement prudents dans la généralisation de ces résultats aux contextes de performance en endurance et dans les sports collectifs auprès de populations entraînées (McNeill et al. 2019; Suchomel et al. 2019).

2.9.1. Adaptations structurelles

Les principales adaptations structurelles observées suivant une exposition chronique à l'entraînement excentrique sont une augmentation dans la rigidité du complexe musculo-tendineux, une modification de l'angle de pennation et une altération dans la distribution des fibres musculaires (Leong et al. 2014; S. L. Lindstedt, LaStayo, and Reich 2001; Stan L. Lindstedt et al. 2002). Très peu d'études comparatives ont toutefois été publiées portant sur les adaptations chroniques observées au niveau des tendons à la suite d'un programme d'entraînement en résistance excentrique ou traditionnel (Douglas et al. 2017). Le manque de données expérimentales de qualité sur le sujet est d'autant plus important avec le pédalage excentrique. Les résultats d'une méta-analyse (37 interventions, 264 participants) suggère que

les tendons répondent mieux à des protocoles d'entraînement longs (durée : > 12 semaines) et où les intensité de travail sont très élevée afin de maximiser la tension mécanique sur les tissus (Bohm, Mersmann, and Arampatzis 2015).

Une revue de littérature récente révèle que l'exposition chronique à une surcharge excentrique permet d'augmenter la rigidité des tendons et peut aussi contribuer à augmenter leur surface en coupe transversale (CSA) (Douglas et al. 2017). Les mécanismes précis permettant d'arriver à ces adaptations n'ont pas encore été clairement identifiés. La même revue de littérature suggère qu'il existe un effet dose-réponse entre le niveau de surcharge excentrique et les adaptations structurelles au niveau de la rigidité et de l'hypertrophie des tendons (Douglas et al. 2017). Une étude de 12 semaines menées auprès de sujets peu ou pas entraînés arrive à la conclusion que le groupe exposé à une plus grande force excentrique (80% du 1RM excentrique comparativement à 80% du 1RM excentrique-concentrique) est le seul où on observe une augmentation significative de la rigidité du tendon patellaire (Malliaras et al. 2013). Une étude de 7 semaines (3x/semaine) d'EEA supramaximal mené auprès de sujets non-entraînés observe également une augmentation de l'épaisseur du muscle et de la rigidité des tendons (Duclay et al. 2009).

L'augmentation de la CSA des tendons semble être associée à une exposition chronique et à un volume d'entraînement élevé avec des charges excentriques sous maximales (Gross et al. 2010; P. C. LaStayo et al. 2000). Le pédalage excentrique pourrait alors être une méthode d'entraînement intéressante puisqu'elle permet d'administrer un grand volume de contractions musculaires excentriques pluri-articulaires tout en minimisant l'accumulation de fatigue.

Une augmentation dans la rigidité des complexes articulaires des membres inférieurs permet d'augmenter l'utilisation de l'énergie élastique lors du SSC en permettant aux tissus musculaires de se contracter à des longueurs et des vitesses optimales (Figure 7) (Cormie, McGuigan, and Newton 2010a; Papadopoulos et al. 2014). L'effet de l'augmentation de la rigidité sur les indicateurs de performance n'a pas été étudié précisément, mais plusieurs auteurs suggèrent

qu'elle peut contribuer à rehausser la performance sportive (Douglas et al. 2017; Papadopoulos et al. 2014; Cook, Beaven, and Kilduff 2013). La revue de Douglas et al. (2017) suggère qu'elle est associée à une augmentation de la vitesse de course maximale, une augmentation dans la puissance des sauts, des temps de contact au sol plus courts et une augmentation de la puissance musculaire maximale.

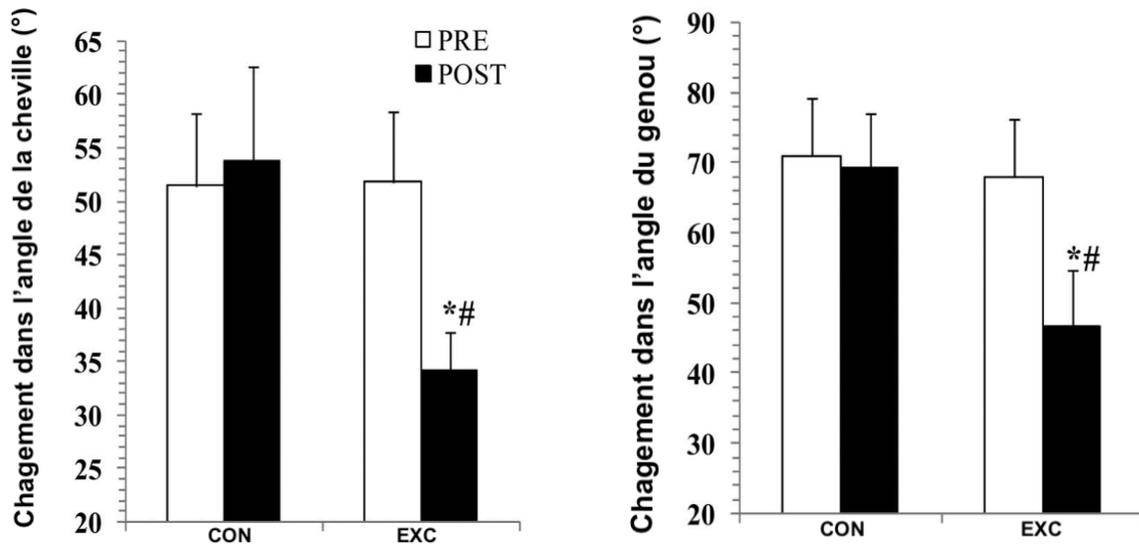


Figure 7. – Changement dans l'angle articulaire (cheville et genou) pendant l'action musculaire excentrique durant un saut en profondeur chez des sujets adultes actifs de façon récréative (participants : 19 hommes, âge: 21.3 ± 0.9 ans, durée du protocole : 8 semaines, fréquence : 2x/semaine, volume d'entraînement : 3-6 séries de 5-10 répétitions, intensité : 70-90% de 1RM excentrique sur appareil isocinétique). Adaptée de Papadopoulos et al. (2014)

L'effet du pédalage excentrique sur la rigidité des complexes musculo-tendineux des membres inférieurs a été étudié à l'aide de sauts répétés sous-maximaux et/ou de sauts à contre-bas sur plateforme de force (S. Elmer et al. 2012; Gross et al. 2010; S. L. Lindstedt, LaStayo, and Reich 2001). La capacité de maintenir une plus grande fréquence lors de sauts répétés et/ou la capacité d'atteindre une hauteur plus élevée lors des sauts à contre-bas est associée à une adaptation fonctionnelle au niveau de la rigidité élastique des membres inférieurs. Dans la fréquence des sauts répétés sous-maximaux, on observe une augmentation de la rigidité élastique des membres inférieurs de $10\% \pm 3\%$ (vs $-2\% \pm 4\%$ pour le groupe contrôle) (S. Elmer et al. 2012). Dans les sauts

à contre-bas sur plateforme de force, on observe une augmentation de 6.5% (vs aucun changement pour le groupe contrôle) (Gross et al. 2010), de 7% (vs -2% pour le groupe contrôle) (S. Elmer et al. 2012) et de 8% (vs aucun changement pour le groupe contrôle) (S. L. Lindstedt, LaStayo, and Reich 2001). Ces résultats suggèrent que le pédalage excentrique pourrait permettre des adaptations fonctionnelles au niveau des propriétés élastiques des complexes musculo-tendineux.

L'effet de l'entraînement excentrique sur l'angle de pennation des muscles ciblés est encore obscur. L'entraînement excentrique semble avoir une influence sur l'angle de pennation. Cependant, les observations rapportées de cette composante de l'architecture musculaire sont contradictoires. L'angle de pennation est augmenté dans certaines études et pour certains groupes de muscles, mais demeure inchangé dans d'autres (Baroni, Rodrigues, et al. 2013). Il est encore prématuré de se prononcer sur l'impact de l'entraînement excentrique sur cette composante puisque les résultats présentés sont habituellement à l'intérieur de l'erreur de mesure des instruments et/ou des techniques d'analyse employées par les chercheurs (Baroni, Geremia, et al. 2013).

Plusieurs auteurs ont observé une augmentation du nombre de fibres musculaires rapides de type IIa et IIx suite à un protocole d'entraînement excentrique (Douglas 2018; Douglas et al. 2017; Martino V. Franchi, Reeves, and Narici 2017). La conversion de fibres IIx à IIa et l'augmentation du nombre de fibres de type IIa sont associées à des gains significatifs dans les performances en endurance (Paulsen et al. 2019; Rønnestad and Mujika 2014). Un volume de travail excentrique élevé est associé à une réduction des chaînes lourdes de myosine IIx et une augmentation des IIa (Adams et al. 1993; Schantz 1986; Andersen, Klitgaard, and Saltin 1994). La combinaison d'une cadence de pédalage et d'une puissance de travail élevées permettrait à l'entraînement sur ergocycle excentrique d'atténuer la transition vers des fibres musculaires de types IIa (Douglas et al. 2017; Paddon-Jones et al. 2001).

Dans l'ensemble, les observations recueillies à la suite de l'entraînement excentrique suggèrent un potentiel évident au niveau des adaptations structurelles, mais la quantité de données et le niveau de compréhension demeurent insuffisants pour sauter aux conclusions.

2.9.2. Adaptations neuromusculaires

La littérature n'est pas abondante en ce qui concerne les adaptations neuromusculaires à la suite d'une exposition chronique à l'entraînement excentrique. Pensini et al. (2002) suggèrent qu'une exposition prolongée et régulière à l'entraînement excentrique (4 semaines, 4x/semaine) permet d'augmenter le niveau d'activation maximal volontaire des muscles entraînés via une augmentation de la commande neurale. Cette augmentation dans la commande neurale semble être reliée à l'activation d'une plus grande quantité de neurones moteurs ou d'une fréquence de décharge plus élevée des unités motrices déjà activées (Pensini, Maffiuletti, and Martin 2002; Bigland-Ritchie, Jones, and Woods 1979). Ces adaptations facilitent un recrutement plus rapide des fibres de type II (IIa et IIx) ce qui se traduit généralement par une augmentation de la production de force et de puissance musculaire (Cormie, McGuigan, and Newton 2011).

De plus, à l'instar des autres modes de contractions musculaires, l'entraînement en résistance excentrique permet également d'augmenter la coordination intermusculaire en augmentant la coactivation des muscles agonistes et en minimisant la coactivation des muscles antagonistes ce qui contribue une augmentation de la puissance maximale et de la force musculaire maximale (Pensini, Maffiuletti, and Martin 2002; Cormie, McGuigan, and Newton 2011). Cette modalité d'entraînement permettrait également d'améliorer la synchronisation des unités motrices et la coordination intramusculaire ce qui se traduit également en une augmentation de la puissance maximale et de la force maximale (Douglas et al. 2017).

Bien que peu nombreuses, quelques études rapportent des adaptations neuromusculaires chroniques à la suite d'un protocole d'entraînement sur ergocycle excentrique. Des augmentations de la force maximale isométrique (26 % ; P. C. LaStayo et al. 2000; 54-65% FCmax, 2-5x/semaine, 15-30 min; 33 % ; Lastayo et al. 1999; 2-5x/semaine, 10-30 min) ont été rapportés

à la suite d'expositions de 8 et de 6 semaines, respectivement. À la suite d'un protocole de 8 semaines sur ergocycle excentrique (fréquence : 2x/semaine, intensité : 20-55% Pmax, durée d'effort de 5 à 10.5 minutes), Leong et al. (2014) ont noté des améliorations de 5% et 9% sur la puissance maximale à vélo (moyenne sur 4 secondes) 1 semaine et 8 semaines post-intervention, respectivement. À notre connaissance, il s'agit de la seule étude publiée ayant mesuré les adaptations à différents points après une exposition chronique au pédalage excentrique. La période de récupération imposée par Leong et al. (2014) suivant l'exposition prolongée au pédalage excentrique semble donc avoir permis d'éliminer la fatigue résiduelle.

Ces observations sont intéressantes, mais davantage de données sont nécessaires afin de statuer sur : i) l'impact de la fatigue générée par l'entraînement excentrique, et ii) le délai nécessaire afin de récupérer pleinement et bénéficier des adaptations.

2.9.3. Adaptations musculaires

L'effet du type de contraction musculaire et plus particulièrement de la surcharge excentrique sur l'hypertrophie a été passablement étudié. L'entraînement excentrique semble provoquer une plus grande réponse hypertrophique que les autres types d'actions musculaires, et ce même chez des sujets bien entraînés (B. Schoenfeld 2020). De nombreuses études suggèrent que les adaptations surviennent principalement dans la portion distale du muscle comparativement à la partie médiale pour l'entraînement concentrique (Martino V. Franchi, Reeves, and Narici 2017; M. V. Franchi et al. 2014; D. Green 2018; B. J. Schoenfeld et al. 2017). L'entraînement excentrique semble mener à une plus grande synthèse en protéines musculaires et une réaction accentuée des signaux anaboliques (M. V. Franchi et al. 2014; Coffey and Hawley 2007). Le recrutement préférentiel des fibres musculaires de type II qui permet une augmentation de la tension mécanique et possiblement davantage de dommages musculaires serait à l'origine de ces adaptations hypertrophiques plus importantes (B. J. Schoenfeld et al. 2017; B. Schoenfeld 2020; Eliasson et al. 2006).

À l'image des autres modalités d'entraînement excentrique, plusieurs études suggèrent que le pédalage excentrique mène également à une hypertrophie musculaire (P. C. LaStayo et al. 2000; Gerber et al. 2007; Gross et al. 2010). Toutefois, plusieurs études rapportant des gains en hypertrophie et utilisant un ergocycle excentrique ont été réalisées avec des sujets ayant des limitations physiques importantes et celles où ce n'est pas le cas comportent soit de nombreuses lacunes méthodologiques (type d'ergocycle, intensité de travail limitée, choix des méthodes d'évaluations, nombre de sujets, absence de période d'affutage) où ont majoritairement utilisé des participants non entraînés. Ces particularités de la recherche sur le pédalage excentrique rendent difficile toute comparaison avec les méthodes d'entraînement excentriques plus traditionnelles (D. Green 2018). Toutefois, les études semblent s'entendre pour suggérer que le pédalage excentrique permet d'améliorer significativement la force maximale par le biais d'une augmentation de la puissance de travail excentrique et de la vitesse des contractions musculaires (Douglas et al. 2017; Chapman et al. 2006). Cette élévation de la force musculaire est aussi associée à une augmentation des dommages musculaires post-exercice et pourrait contribuer à l'augmentation de la réponse hypertrophique (Douglas et al. 2017).

Une très grande hétérogénéité est observée dans la réponse hypertrophique et les adaptations au niveau musculaire. Les résultats varient principalement selon la méthodologie employée par les chercheurs et l'état d'entraînement des participants exposés à la surcharge excentrique dans la littérature. Par exemple, une augmentation de seulement ~2% de la masse musculaire au niveau des membres inférieurs a été observée dans une étude réalisée chez des skieurs alpins juniors élites après 6 semaines d'entraînement sur ergocycle excentrique (Gross et al. 2010). Ces gains sont bien inférieurs au 24 % (Leong et al. 2014) et 52 % observés dans la surface en coupe transverse du vaste latéral (P. C. LaStayo et al. 2000) auprès de populations non entraînés à la suite de 8 semaines d'exposition régulière au pédalage excentrique.

Finalement, une autre des principales adaptations musculaires à la surcharge musculaire excentrique est une augmentation du nombre de sarcomères en série (Peñailillo, Blazevich, and Nosaka 2015). Cette adaptation engendre une diminution de la longueur des sarcomères pour

un allongement musculaire donnée et limite ainsi l'étirement excessif des sarcomères lors de l'allongement sous tension. Cette adaptation structurelle permettrait de diminuer l'étendue des dommages musculaires et pourrait contribuer à l'effet protecteur que l'on observe suite à une exposition à l'entraînement excentrique (Touron et al. 2020; Mavropalias et al. 2020).

2.9.4. Adaptations dans le contrôle moteur

La littérature sur l'entraînement en résistance excentrique suggère, qu'en comparaison avec la contraction concentrique, un nombre plus faible d'unités motrices sont activées lors de la contraction excentrique pour un niveau de force équivalent puisque les unités motrices sont en mesure de générer une quantité de force plus élevée dans la phase d'allongement (Aagaard et al. 2000; Beltman et al. 2004; Douglas et al. 2017; Komi et al. 2000). Comme mentionné ci-haut, une commande neurale plus faible lors de l'allongement sous tension du tissu musculaire et/ou d'une fréquence de décharge moins élevée des unités motrices (20 – 35 %) pourrait expliquer la diminution de l'activation maximale volontaire des muscles squelettiques lors des contractions musculaires excentriques (Pensini, Maffiuletti, and Martin 2002; Duchateau and Baudry 2014; Del Valle and Thomas 2005). Les mesures d'activation musculaire (EMG) moins élevées (~20 - 27 % triceps ; ~50 – 60 % fléchisseurs) témoignent également d'une plus faible activation volontaire maximale des muscles squelettiques lors des contractions excentriques (Del Valle and Thomas 2005; Fang et al. 2001) en comparaison avec les contractions concentriques.

Bien que la commande neurale soit moins grande, des données recueillies à l'aide d'un électroencéphalogramme montrent une plus grande région du cerveau (~41 – 79 %) impliquée dans le contrôle du mouvement lors des actions musculaires excentriques que concentriques (Duchateau and Baudry 2014; Fang et al. 2001). Ces travaux ne permettent toutefois pas d'expliquer les mécanismes physiologiques derrière les différences observées dans la commande motrice entre les modes de contraction musculaire. Par contre, plusieurs auteurs suggèrent que des mécanismes spécifiques à la fois au niveau spinal et supraspinal seraient impliqués dans les réponses propres aux contractions musculaires excentriques (Duchateau and Baudry 2014; Duchateau and Enoka 2016; Douglas et al. 2017). À notre connaissance, aucune étude utilisant

un protocole de pédalage excentrique n'a encore rapporté des adaptations chroniques reliées au contrôle moteur à la suite d'un programme d'entraînement excentrique.

2.9.5. Adaptations métaboliques

Comme mentionné précédemment, la demande métabolique est trois à quatre fois moins élevée pour une quantité de travail mécanique équivalente lors de la contraction musculaire excentrique (Abbott, Bigland, and Ritchie 1952; Bigland-Ritchie, Graichen, and Woods 1973; Peñailillo, Blazevich, and Nosaka 2017). À la connaissance de l'auteur, aucune étude ne s'est intéressée principalement aux adaptations métaboliques à la suite d'une exposition chronique au pédalage excentrique. Plusieurs études ont exploré les réponses cardio-respiratoires aiguës au pédalage excentrique et de nombreux chercheurs ont souligné que le pédalage excentrique nécessitait jusqu'à cinq fois moins d'O₂ pour une puissance de travail équivalente (D. Green 2018; Isner-Horobeti et al. 2013; Abbott, Bigland, and Ritchie 1952). Plusieurs auteurs ont aussi conclu que le débit cardiaque et la fréquence cardiaque étaient environ deux fois moins élevés lors d'un effort en pédalage excentrique comparativement au pédalage concentrique à puissance de travail équivalente (Dufour et al. 2004, 2007; Isner-Horobeti et al. 2013). Cependant, ces travaux ont aussi montré que le débit cardiaque et la fréquence cardiaque sont significativement plus élevés lors du pédalage excentrique que concentrique pour une consommation d'O₂ équivalente. Les besoins en thermorégulation, une puissance mécanique et une tension musculaire plus élevée pour une consommation en O₂ similaire expliqueraient cette augmentation du débit cardiaque (Dufour et al. 2004).

L'intensité de travail lors protocoles d'entraînements sur ergocycle excentrique est communément établie en fonction des informations recueillies lors d'une épreuve d'effort incrémenté sur ergocycle traditionnel (voir section « Prescription d'entraînement ») (Lipski, Abbiss, and Nosaka 2018a). Les facteurs physiologiques limitant la performance maximale lors du pédalage sur ergocycle excentrique demeurent toutefois à être élucidés. Il serait alors possible d'identifier les réponses physiologiques aux différentes zones d'intensité, de les comparer avec celles observés lors d'une épreuve d'effort incrémenté sur ergocycle traditionnel, et ainsi

améliorer notre compréhension pour améliorer la prescription d'exercice avec pédalage excentrique. L'utilisation d'une puissance de travail sélectionnée en fonction de la capacité maximale concentrique pourrait grandement sous-estimer le potentiel maximal de travail en mode excentrique (Roig et al. 2009). De plus, les adaptations à l'exercice excentrique pourraient nécessiter un délai de plusieurs semaines avant de montrer des bénéfices notables (Coratella and Schena 2016; Leong et al. 2014) La grande majorité des études ayant rapporté des adaptations à la suite d'un programme de pédalage excentrique ont mesuré des indices d'endurance immédiatement à la fin du programme d'entraînement, ne laissant peut-être pas suffisamment de temps aux adaptations de s'installer. À ce jour, les mécanismes par lesquels l'entraînement excentrique pourrait améliorer l'endurance sont donc peu connus.

2.10. PRESCRIPTION D'ENTRAÎNEMENT

Tel que mentionné précédemment, le pédalage excentrique demeure relativement peu étudié et il n'existe pas de consensus ou de normes dans littérature scientifique en ce qui concerne la prescription d'exercice et encore moins de programme d'entraînement sur ergocycle excentrique. Il existe deux catégories mères dans la prescription de séances de pédalage excentrique. Les protocoles utilisant une puissance de travail supérieure à la puissance maximale aérobie (PAM) sont considérés comme étant supra-maximaux, tandis que ceux qui ne dépassent pas la PAM sont considérés comme étant sous-maximaux. Plusieurs paramètres ont été utilisés dans le passé pour moduler l'intensité des périodes d'efforts en pédalage excentrique; i) en fonction d'un % cible de la fréquence cardiaque maximum (54-66%) (S. Elmer et al. 2012; D. Green 2018); ii) en fonction d'un % cible de la PMA (20-80%) (Leong et al. 2014; D. Green 2018); iii) en fonction d'un niveau de perception d'effort à l'aide de l'échelle CR10 de Borg (Paulsen et al. 2019; Eidsheim and Rønnestad 2016; Laroche et al. 2013); iiiii) en fonction d'un % de la puissance maximale de travail lors d'un sprint de 4 secondes (Dillon 2017).

À l'image de l'entraînement aérobie conventionnel, les séances d'exercice en pédalage excentrique peuvent être prescrites en continu ou en intervalles. Lorsque prescrites en continu, la durée des périodes de travail en pédalage excentrique est généralement progressivement

augmentée au fil des séances. Lorsque les séances d'entraînement sont planifiées par intervalles, la progression de l'intensité des périodes de travail est établie en fonction des paramètres énumérés ci-haut. Plusieurs cadences de pédalage ont été utilisées, allant de 20 à 120 rpm, mais la majorité des auteurs semblent préférer utiliser des cadences de pédalage oscillant autour de 60 rpm (D. Green 2018; Dillon 2017; Eidsheim and Rønnestad 2016).

2.11. DÉTERMINANTS DE LA PERFORMANCE

Peu importe le sport pratiqué, tout athlète dans les sports d'endurance a comme objectif de franchir la ligne d'arrivée en premier. La vitesse moyenne entre le départ et l'arrivée ou le temps final indiqué sur le chronomètre sont donc les seuls et uniques étalons de mesure de la performance (van der Zwaard, Brocherie, and Jaspers 2021). Cette vitesse moyenne est majoritairement influencée par trois principales variables en physiologie de l'exercice; i) la capacité maximale aérobie ou le taux maximal d'oxygène que le corps peut inspirer à l'aide du système pulmonaire, transporter et utiliser via le système cardio-vasculaire lors d'exercices impliquant une grande masse musculaire, et ce dans un temps donné ($VO_2\text{max}$) (Bassett and Howley 2000; P. Laursen and Buchheit 2019; Poole and Jones 2017), ii) la capacité de maintenir un haut pourcentage de cette capacité maximale aérobie pendant des périodes prolongées, un phénomène étroitement relié au concept de seuil anaérobie et ses multiples dérivés et iii) l'efficacité énergétique de l'athlète lors des efforts prolongés (Joyner and Coyle 2008; P. B. Laursen and Rhodes 2001; Lucia et al. 2008). La discipline sportive, la durée moyenne des efforts durant la compétition, le temps total des compétitions et l'environnement dans lequel a lieu la compétition (température, altitude, humidité relative) déterminent l'importance relative de ces trois principaux facteurs.

Il est plus complexe d'analyser précisément les déterminants de la performance dans les sports collectifs nécessitant un très haut niveau d'endurance cardiovasculaire puisque les résultats de l'équipe et les performances de l'athlète sont influencés par une multitude de facteurs; i) attributs physiologiques des athlètes individuels, ii) les habiletés techniques des athlètes et iii)

les stratégies tactiques et ajustements des entraîneurs, iv) la préparation et la performance mentale (P. Laursen and Buchheit 2019). La force musculaire maximale et/ou relative ainsi que la puissance maximale sont les deux indicateurs de performance déterminant qui vont permettre de différencier les attributs physiologiques des athlètes (Suchomel, Nimphius, and Stone 2016; Haff and Nimphius 2012). Ces deux indicateurs influencent directement la majorité des caractéristiques de la performance dans les sports collectifs soit: la vitesse maximale au sprint, l'accélération, les changements de direction, les aptitudes dans les sauts (Suchomel, Nimphius, and Stone 2016; Haff and Nimphius 2012) et la capacité de répéter des efforts maximaux et supramaximaux (Buchheit 2008).

2.11.1. Consommation maximale d'oxygène ou $VO_2\text{max}$

La capacité aérobie de l'athlète ($VO_2\text{max}$) est critique à la performance sportive en endurance. Les améliorations du $VO_2\text{max}$ sont déterminées par des adaptations au niveau central telles que l'augmentation du volume d'éjection systolique, l'augmentation du débit cardiaque, une augmentation du volume sanguin, une augmentation de la capacité en transport de l'oxygène (concentration en hémoglobine) et des adaptations périphériques telle une augmentation de l'activité enzymatique mitochondriale, la densité des capillaires musculaires et la distribution des fibres musculaires squelettiques (Bassett and Howley 2000; Coyle 1999; MacInnis and Gibala 2017). Plusieurs physiologistes suggèrent que cette limite supérieure au niveau des adaptations permettant d'augmenter le $VO_2\text{max}$ est principalement associé à la capacité de l'organisme à transporter efficacement l' O_2 aux muscles actifs plutôt qu'à la capacité d'extraction des tissus musculaires à extraire l' O_2 disponible dans la circulation sanguine (Bassett and Howley 2000; Wagner 1996).

Les athlètes élités dans les sports d'endurance se distinguent des individus sédentaires avec des valeurs de $VO_2\text{max}$ très élevés (70 à $85 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) (Joyner and Coyle 2008). Ces valeurs extrêmes de consommation maximale en O_2 peuvent être expliquées grâce à leur volume d'éjection systolique (VES) maximal qui est grandement supérieur ce qui permet un débit

cardiaque maximal plus élevé et donc une plus grande capacité de transport en O₂ vers les muscles actifs (Bassett and Howley 2000).

Il n'y a pas de différence significative dans la fréquence cardiaque maximale à l'effort associé à l'état d'entraînement comme le témoignent les observations entre des athlètes élités et des personnes sédentaires du même âge. L'augmentation de la capacité maximale aérobie chez les athlètes entraînés provient donc principalement d'une augmentation du débit cardiaque (VES), d'une capacité d'extraction de l'O₂ ($a-\bar{v} O_2$) supérieure au niveau des tissus musculaires actifs lors des efforts prolongés (Bassett and Howley 2000). Une masse en hémoglobine plus élevée permet aussi d'améliorer le transport de l'O₂ vers les muscles actifs. Cette adaptation pourrait permettre aux athlètes plus âgés de maintenir ou même d'augmenter leur VO₂max malgré une diminution de la capacité aérobie habituellement observé avec le vieillissement (Lundby and Robach 2015).

Les athlètes d'endurance sont exposés à des séances d'entraînement par intervalles à haute ou très haute intensité (HIIT) et à des séances d'entraînement de plus longue durée à intensité basse ou modérée. Ces séances permettent des adaptations au niveau du transport et de l'utilisation de l'oxygène permettant d'élever significativement la capacité aérobie maximale chez des personnes novices ou non entraînés (Wen et al. 2019). Les résultats combinés de la recherche sur l'entraînement de la capacité aérobie suggèrent que l'entraînement par intervalles à haute intensité et à très haute intensité permet des adaptations physiologiques similaires à l'entraînement en continu à vitesse modérée (Wen et al. 2019). L'entraînement par intervalles se distingue par l'utilisation d'intensités de travail qui sont plus élevées, mais permet un volume d'entraînement qui peut être jusqu'à cinq fois moins élevé (MacInnis and Gibala 2017).

Le VO₂max permet donc d'établir la limite maximale en matière de consommation d'O₂ chez un individu. Par contre, dès que la durée des compétitions dépasse les 15 minutes, il est très rare que les athlètes atteignent ces valeurs maximales de consommation d'O₂ lors des compétitions. C'est pourquoi les valeurs respectives de VO₂max chez les athlètes élités n'ont pas d'utilité lorsque vient le temps de prédire les performances sportives. Bien que des valeurs très élevées

soient nécessaires à la performance en endurance et pour atteindre les plus hauts niveaux de performance, la valeur la plus élevée n'est pas automatiquement associée à la victoire dans un groupe d'athlètes homogènes aux capacités aérobies similaires (Bassett and Howley 2000; Rønnestad and Mujika 2014).

2.11.2. Endurance

Plusieurs concepts ont été élaborés et plusieurs techniques de mesures ont été employées depuis le début du XXe siècle afin de définir adéquatement et de mesurer précisément la fraction de l'intensité maximale pouvant être soutenue de manière prolongée. La notion de seuil(s) est encore très prévalente dans le milieu sportif et scientifique, malgré qu'elle ait été mis au rencart il y a près de 40 ans (pour une revue, voir (Poole et al. 2020). Seuils lactique, ventilatoire, de compensation respiratoire, anaérobie, d'accumulation de lactate, la puissance/vitesse critique et plus d'une quarantaine d'autres ont été employés pour estimer l'endurance dans les ~100 dernières années (Faude, Kindermann, and Meyer 2009; Jones et al. 2019; Poole et al. 2020).

Traditionnellement, on avance que cette capacité à maintenir une fraction de l'intensité maximale, ou endurance, doit varier en fonction de la durée de l'effort, de la consommation maximale d'oxygène et du rendement mécanique, ou efficacité (Joyner and Coyle 2008). Mais l'endurance peut tout autant s'appliquer à un athlète dans un sport collectif qui doit répéter des sprints à très haute intensité pendant toute la durée d'un match. La capacité à répéter des sprints ou des efforts à haute intensité est une autre manifestation de l'endurance. Le dommage musculaire s'installe progressivement dans le muscle peu importe, que l'amortissement des impacts au sol soit soutenu pendant la durée d'un marathon, ou que les changements de directions et freinages soient répétés pendant toute la durée d'un match (Del Coso et al. 2013; Ascensão et al. 2008; Thorpe and Sunderland 2012). L'exercice excentrique est reconnu pour protéger le muscle contre le dommage musculaire (McHugh 2003), mais à notre connaissance très peu d'études (Paulsen et al. 2019) ont soumis des individus entraînés à un protocole d'entraînement excentrique afin de mesurer les impacts sur l'endurance, quelle qu'elle soit. Et

ce, même si plusieurs auteurs ont suggéré cette approche (Roig Pull and Ranson 2007; Mujika, Rønnestad, and Martin 2016).

2.11.2. Efficacité/rendement énergétique

La relation entre la consommation d'O₂ et l'intensité objective des efforts prolongés (puissance ou vitesse) nous permet de mesurer l'efficacité énergétique d'un athlète. C'est donc le ratio entre la quantité de travail accompli et la dépense énergétique pour un effort donné qui nous permet de quantifier précisément cet indicateur de performance. Il s'agit d'une variable déterminante de la performance lors des efforts prolongés en endurance chez des groupes d'athlètes aux capacités aérobies similaires (Barnes and Kilding 2015; Horowitz, Sidossis, and Coyle 1994). L'analyse du concept d'efficacité énergétique et des facteurs permettant de l'améliorer est grandement complexifiée par le nombre d'aspects physiologiques qui y sont en interdépendance pour le déterminer. L'efficacité énergétique de l'athlète est à priori grandement déterminée par sa génétique, mais plus précisément par son efficacité métabolique, son efficacité cardio-respiratoire, son efficacité biomécanique, son efficacité neuromusculaire et son état d'entraînement (Barnes and Kilding 2015). L'ensemble de ces facteurs doit être pris en considération dans la préparation de l'athlète.

Les athlètes bénéficiant d'une meilleure efficacité énergétique sont en mesure d'utiliser moins d'O₂ que ceux possédant une moins bonne efficacité énergétique pour la même intensité d'effort (Saunders et al. 2004). Dans le même ordre d'idée, une efficacité énergétique améliorée permet aussi à l'athlète de performer à des intensités de travail plus élevées pour une même consommation d'O₂.

CHRONIC ADAPTATIONS FROM ECCENTRIC CYCLING AND PERFORMANCE IN SPORTS: A SCOPING REVIEW

Villeneuve, Marc-Étienne ; Arvisais, Denis ; Tremblay, Jonathan

1. INTRODUCTION

Eccentric muscle contractions occur when the muscle tissue is lengthened while generating force against an external load. Multiple characteristics of eccentric muscle actions are interesting for sports practitioners. The capacity of the muscle tissue to exert greater mechanical tension during eccentric muscle contractions while requiring a lower metabolic cost per unit of external work deserves more attention (Suchomel et al. 2019). One of the most interesting tools available to exert controlled eccentric muscle contractions is the eccentric cycling ergometer.

Eccentric cycling has sparked the interest of many research groups since its introduction by Abbott, Bigland, and Ritchie, in 1952, which reported that the metabolic cost of eccentric cycling, or negative work, was “considerably less” than during concentric or regular cycling for the same power output (Abbott, Bigland, and Ritchie 1952). Although the concept of eccentric exercise and, more specifically, eccentric cycling was first documented almost 70 years ago, when compared to traditional concentric cycling, multiple physiological adaptations remain to be understood, and this probably explains why research interest has been trending upwards.

The main feature of eccentric cycling stems from the ability to generate greater mechanical loads at a reduced metabolic demand (Touron et al. 2020). It is now well documented that for a given power output, O_2 consumption (~3-5x), blood lactate concentration (~85 %) muscle activation (~2-50%), cardiac output (~40 %) and perceived exertion (~35 %) are considerably lower during eccentric cycling (Dufour et al. 2004; Abbott, Bigland, and Ritchie 1952; Perrey et al. 2001; Abbott and Bigland 1953; Peñailillo, Blazeovich, and Nosaka 2017). Muscles can also produce significantly more tension (~20-60%) during lengthening contractions (Douglas et al. 2017; Suchomel et al. 2019; Hollander et al. 2007). Albeit conducted on untrained participants, studies suggest that

prolonged supervised exposure to eccentric cycling allows significant increases in maximal jumping power, concentric cycling power, maximal strength, pennation angle, muscle thickness, and leg stiffness (Lipski 2018; Elmer et al. 2012; Leong et al. 2014). These properties of eccentric cycling illustrate why it has been considered an interesting solution for injury rehabilitation, clinical populations, and sports training purposes (Touron et al. 2020; Hoppeler 2016; Green 2018).

Endurance training is typically linked to increased aerobic capacity and improvements in fatigue resistance, while resistance training is associated with muscle hypertrophy and increases in muscle strength and power (MacInnis and Gibala 2017). Benefits recorded on well-trained endurance runners' anaerobic capacity, running economy, and 5 km performance following heavy resistance training protocols are promising for eccentric cycling (Dillon 2017; Denadai et al. 2017; Barnes et al. 2013; Barnes and Kilding 2015). These functional improvements are linked to adaptations at the neuromuscular level where increases in stiffness over the muscle-tendon complexes can increase gross efficiency (Paavolainen et al. 1999; Vikmoen et al. 2016; Saunders et al. 2004). Eccentric cycling could bridge resistance strength training and classical endurance training. Chronic and progressive eccentric cycling can induce central and metabolic adaptations similar to concentric cycling while also eliciting neuromuscular adaptations usually linked to resistance training (Barreto, de Lima, and Denadai 2021). However, researchers have yet to experiment with the very high eccentric power output that would be required to elicit significant metabolic and cardiorespiratory adaptations capable of influencing positively key endurance performance determinants (Touron et al. 2020). Many sports require the athlete to produce repeated eccentric muscle contractions, leading to muscle damage and altered neuromuscular function. The high volume of controlled eccentric contractions in eccentric cycling could allow athletes to tolerate their occurrence better while practicing their sport. Very little research employing eccentric cycling ergometers has been conducted with trained endurance athletes. Hence, very little is known on the adaptations to chronic exposure to eccentric cycling in this population and their potential to improve performance.

This scoping review thus aims to (1) explore the current scientific evidence on chronic adaptations to eccentric cycling and provide a brief synthesis on its potential impact on the determinants of endurance performance, (2) identify and describe existing gaps of knowledge in the literature to guide future research projects.

2. METHODS

Research Question

This review is based on the recommendations for scoping reviews (Armstrong et al. 2011; Peters et al. 2021) with the purpose to summarize the current evidence and identify knowledge gaps to propose a research agenda. The research question can thus be defined as: What are the chronic adaptations observed following eccentric cycling training in trained and highly-trained participants?

Protocol & Registration

This scoping review was developed based on the guidelines of the Joanna Briggs Institute (Peters et al. 2015, 2021) and the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR). The research protocol was registered with Open Science Framework before submission.

Search Strategy

The research question and the selection criteria were established prior to conducting the electronic literature search. The following bibliographic databases were queried: Medline, Embase, SPORTDiscus, and Web of Science. Also, Dissertations & Theses Global (ProQuest) was searched for unpublished studies. These databases were selected to collect as much literature relevant to the research question. All the databases were queried from the earliest record up to June 1, 2021. The final search strategy for MEDLINE can be found in Appendix 1. The reference

list of all included papers was also screened for potential additional sources and included in the screening process.

Evidence Screening and Selection

A total of 1595 studies met our initial search equation criteria, of which 478 were removed because they were duplicates. The titles and abstracts of the remaining 1117 studies were then independently screened by two reviewers against the selection criteria presented below. Both reviewers were blinded to each other's decisions, and disagreements were resolved via consensus. If consensus could not be reached, a third reviewer made the final decision about the inclusion. An article was automatically included in the full-text screening stage when it was unclear whether it should be included or not based on the title and abstract only. The same process was repeated for the full-text screening phase. When an article was excluded during the full-text screening phase, the main reason for its exclusion was noted.

A total of 34 full texts were assessed for eligibility; 29 of them were excluded for the following reasons: wrong study design (n = 10), wrong intervention (n = 3), inadequate data presented (n = 1), or inappropriate length of their training protocol (n = 15). One article was identified while searching through citations and was subsequently added to our review. Therefore, a total of 5 studies met our inclusion criteria and are included in this review (see flow chart figure 10). All records were initially uploaded to Covidence (Veritas Health Innovation Ltd, Melbourne, Australia), a web-based screening tool for systematic reviews, to help efficiently manage the results and screen the corresponding 1595 articles.

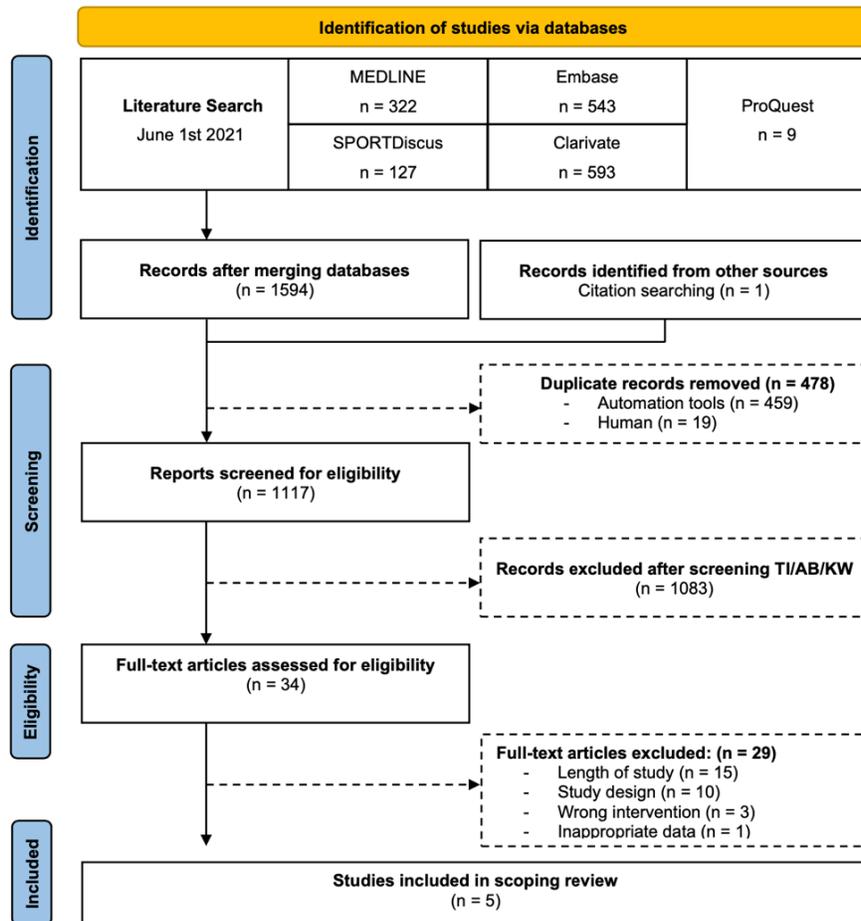


Figure 1. – PRISMA-ScR Flow chart of the study selection process, according to Tricco et al. (2018).

Inclusion Criteria

To be included in our review, articles had to fulfill the following selection criteria: (1) peer-reviewed, (2) human participants only, (3) subjects were teenagers or adults, of all ages, healthy, and trained ($VO_2\text{max} > 45 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), (4) investigation of physiological and perceptual responses to eccentric cycling bouts lasting at least 2 minutes, (5) investigation of chronic adaptations to eccentric cycling training protocols with a study length of at least four weeks, and (6) key performance variables were measured pre- and post-intervention. Articles were excluded if (1) they only included untrained participants or (2) only participants with metabolic conditions, injured, or under any form of medication.

3. RESULTS

Five studies, totaling 79 participants, examined the impact of chronic exposure to eccentric cycling on various performance variables and are included in this scoping review (n = 79, 77 males, 2 females, 25.3 ± 10.6 years old). Detailed information about the selected studies is provided in Tables 1 & 2. The year of publication for the five included articles spanning from 2010 to 2019. Four studies were conducted on well-trained athletes, albeit performing in different sporting events, and one included participants from various sporting backgrounds. This scoping review thus includes junior track cyclists (Sarkar et al. 2020), distance runners (Green 2018), amateur cyclists (Paulsen et al. 2019), junior alpine skiers (Gross et al. 2010), as well as recreational and competitive athletes (Elmer et al. 2012). Out of the 79 participants, seven would classify as “recreationally trained”, all the other participants would classify as “trained” or “highly-trained” based on the classification proposed by McKay et al. (2022). The length of the included research protocols spans from 4 to 10 weeks with a frequency of 1 to 6 sessions per week. Cycling cadence varied from 40 to 80 RPM. A single study included male and female participants. Two studies opted for upright ergometers, which hinders the administration of very high-intensity work sets (Sarkar et al. 2020; Paulsen et al. 2019), and three studies were conducted with recumbent ergometers (Green 2018; Elmer et al. 2012; Gross et al. 2010). Two studies opted for 2 minutes work intervals (Paulsen et al. 2019; Green 2018), two preferred steady-state moderate-intensity exercise (Elmer et al. 2012; Gross et al. 2010), and one opted for a combination of both (Sarkar et al. 2020). Exercise progression was based on rate of perceived exertion (RPE) (Paulsen et al. 2019; Gross et al. 2010), %HR_{max} (Elmer et al. 2012; Sarkar et al. 2020), Borg CR10 scale (Sarkar et al. 2020), or the RPE of their previous session (Green 2018). A single study used a recovery period before the post-protocol evaluations to minimize fatigue (Paulsen et al. 2019). Four studies were conducted with two groups comparing pre- and post-intervention, with the control group receiving a traditional training intervention (Paulsen et al. 2019; Sarkar et al. 2020; Elmer et al. 2012; Gross et al. 2010). The study by Sarkar et al. (Sarkar et al. 2020) only had a single group with assessments pre- and post-intervention.

A quick search query in Pubmed with the terms “eccentric cycling” OR “backward pedaling” shows that albeit still relatively sparse, research interest on the subject has been trending upward in the last five years. According to the first author affiliation of the included articles, eccentric cycling seems to draw interest from various world regions. While the sample is small, the interest in eccentric cycling specifically aimed at improving endurance performance does not seem to be limited to certain territories.

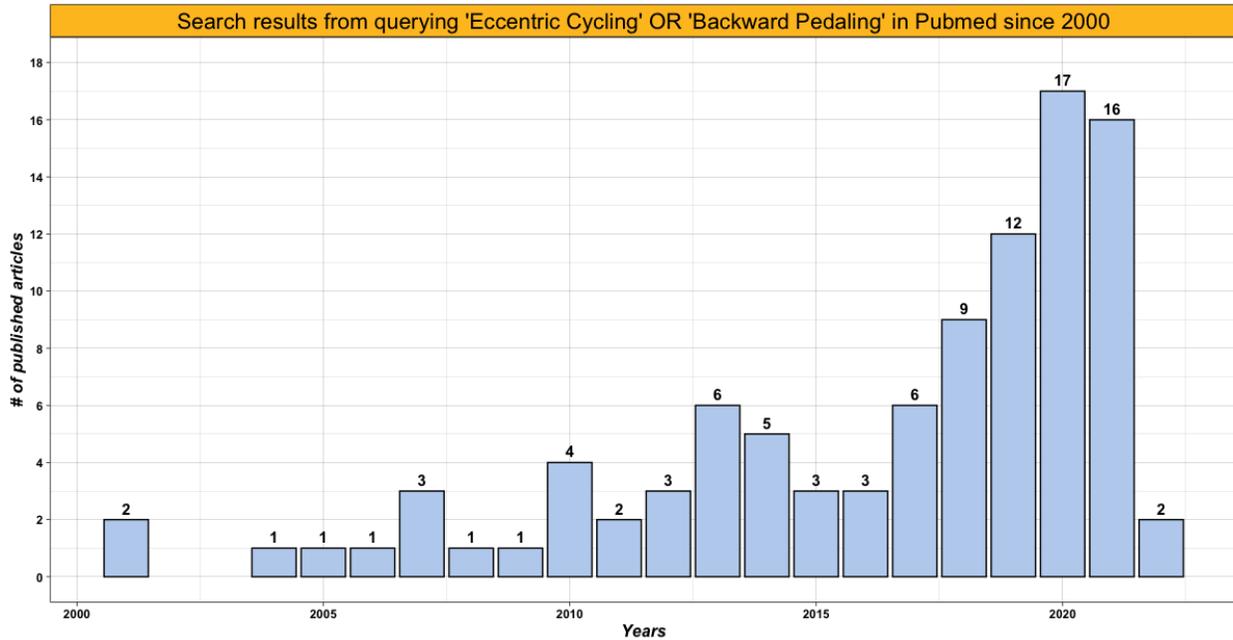


Figure 2. – Search results from querying ‘Eccentric Cycling’ OR ‘Backward Pedaling’ in Pubmed since 2000.

Neuromuscular Adaptations

Lower body stiffness was reported to be significantly increased ($10 \pm 3 \%$, hedges’ $g = 0.58$) in recreational and competitive athletes with repeated jumps on force plates following 7 weeks of eccentric cycling, three times per week, compared to a concentric cycling control group with matching training volume ($-2 \pm 4 \%$) (Elmer et al. 2012). In the same study, countermovement jump (CMJ) maximal power was also increased following eccentric cycling ($7 \pm 2 \%$, hedges’ $g = -0.03$) compared to a control group ($-2 \pm 3 \%$) (Elmer et al. 2012). Two other studies reported benefits after eccentric cycling protocols for CMJ where jump height was either increased in junior alpine skiers (6.5% , hedges’ $g = 0.63$; (Gross et al. 2010) or jump power was maintained in

well-trained endurance runners (0 %, hedges' $g = 1.19$; (Green 2018) compared to no significant change or a decrease (4.2%) in the concentric cycling groups. Albeit using the jump and reach technique compared to force plates measurement for the other 3 studies, Sarkar et al. (2020) reports an increase in CMJ height for junior track cyclists (6.96 %, hedges' $g = 0.8$) following 4 weeks of eccentric cycling. Improvements in squat-jump power (10 %, hedges' $g = 1.02$) and height (8 %, hedges' $g = 1.05$) are also reported following 8 weeks and 6 weeks of eccentric cycling, respectively, compared to decreases of 2.9 % and 4.2 % in the paired concentric cycling groups (Green 2018; Gross et al. 2010). In addition, impairments to maximal 30m running speed performance (-6.79 %, hedges' $g = -0.74$) and agility abilities during 6 x 10m shuttle runs (-1.57 %, hedges' $g = -0.51$) were observed following 4 weeks of eccentric cycling on junior track cyclists (Sarkar et al. 2020).

Strength Adaptations

Two of the five studies selected reported results regarding strength adaptations. Paulsen et al. (2019) observed small increases in muscle thickness of the vastus lateralis (3.7 ± 3.7 %, hedges' $g = 0.96$) and rectus femoris (5 ± 5 %, hedges' $g = 0.96$) following 10 weeks of eccentric cycling as well as large improvements in eccentric power (9.9 ± 14.5 %, hedges' $g = 0.76$). Sarkar et al. (2020) observed large increases of relative back strength (10.57 %, hedges' $g = 1.33$) following their eccentric cycling protocol. Green et al. (2018) observed no significant change for the quadriceps and hamstrings maximal isokinetic strength immediately after 8 weeks of eccentric cycling compared to the traditional cycling group.

Endurance Performance Adaptations

Four of the five studies evaluated the impact of chronic eccentric cycling on various endurance performance measures. Significant decreases to 20 min time trial power (-3.5 ± 3.8 %) for eccentric cycling were observed (Paulsen et al. 2019). When measured, maximal aerobic power was significantly decreased (-3 ± 2.9 % ; Paulsen et al. 2019), significantly increased (8.72 %, hedges' $g = 0.37$; Sarkar et al. 2020) or remained unchanged (0.48 %, ECCpre: 1035 ± 142 W,

ECCpost: 1030 ± 133 W, CONpre: 1072 ± 98 W, CONpost: 1081 ± 85 W ; Elmer et al. 2012). Sarkar et al. (2020) suggest chronic exposure to eccentric cycling could benefit $VO_2\text{max}$ (4.67 %, hedges' $g = 0.84$). Green (2018) observed no significant modifications of the energy cost of running. However, longer stride lengths were observed for the traditional cycling control group post-intervention.

4. DISCUSSION

The observations presented in the previous section and current data on eccentric cycling leads us to believe appropriate training prescription has not yet been identified in order to impact endurance performance for trained and well-trained subjects. However, eccentric cycling seems to be an appropriate training solution in order to elicit significant adaptations benefitting strength and neuromuscular performances for trained and well-trained subjects. Multiple factors might explain why these positive adaptations to the strength and neuromuscular qualities don't translate to endurance performance improvements. The main findings of this review were that eccentric cycling:

- I. Either provides no benefits or small benefits to endurance performance
- II. Has an impact on endurance performance that varies with the measured parameter
- III. Primarily impacts neuromuscular, strength, and perceived effort variables
- IV. Has null or detrimental effects on mechanical efficiency and aerobic capacity

The absence of intensity landmarks specific to eccentric cycling is a major weakness identified in the current review. Eccentric cycling intensity prescriptions were solely based on either concentric incremental test, fixed heart rate percentages or rate of perceived exertion. This is a standard procedure among eccentric cycling literature. However, multiple authors suggest these measures are underestimating eccentric cycling exercise capacity and may explain the underperformance observed with this modality when used with healthy participants (Barreto, de Lima, and Denadai 2021; Coratella et al. 2019). A recent study by Walsh et al. (2021) measured 6-second peak eccentric power (PETP) at $360^\circ/\text{sec}$ (equivalent to 60 RPM) for healthy individuals

at 1690 ± 448 W. Comparisons between the prescribed intensities in the selected studies and the average PETP of healthy individuals give the following range of relative intensities in the included studies: 12.4 ± 1.5 % - 24.1 ± 3.1 % (Elmer et al. 2012), 16 ± 1.2 % - 30.9 ± 3.1 % (Green 2018), 17.2 ± 3.6 % - 30.8 ± 4.1 % (Paulsen et al. 2019) and 12.6 ± 1.4 % - 50.3 ± 4.2 % (Gross et al. 2010). Studies have thus used eccentric power outputs that were relatively low, only a single study in this review went above 50% PETP and only for ~3 sessions (Walsh et al. 2021; Gross et al. 2010). Furthermore, the participants in the current review are trained or well-trained, which means their PETP would potentially be higher, and their relative eccentric cycling intensity probably lower. Based on the accentuated eccentric loading literature, it is reasonable to believe the utilization of higher-power outputs would lead to greater neuromuscular adaptations and increases in maximal strength thus leading to greater performance improvements (Brandenburg and Docherty 2002; McNeill et al. 2019; Wagle et al. 2017). Future studies should seek to develop evaluation protocols that offer researchers a superior measure of eccentric cycling exercise capacity.

Neuromuscular and Strength Adaptations

Collectively, the data suggest eccentric cycling elicits neuromuscular adaptations and increases muscular strength of trained and well-trained subjects. Both adaptations are common objectives for strength and conditioning coaches to optimize athletic performance. Heterogeneous protocols employing various intensity work intervals, progressions and ergometer types led to significant improvements on CMJ performance (Sarkar et al. 2020; Green 2018; Gross et al. 2010). For example, the study by Elmer et al. (2012) included athletes with a lower VO_{2peak} (48.2 ± 12.0 ml•kg⁻¹•min⁻¹, mean for the included studies: 57.5 ± 10.4 ml•kg⁻¹•min⁻¹) suggesting a lower fitness or training experience. The authors also opted for a protocol with a lower intensity prescription where none of the participants was exposed to intensities above 25% of PETP (reaching a maximum of 40% of maximal concentric power). Results from these studies cannot confirm whether training programs with higher eccentric power outputs (absolute and relative) would lead to greater neuromuscular adaptations and potential gains in performance, especially in trained or experienced participants. Significant improvements in maximal isometric strength

(12%), CMJ power (8.8%), squat jump power (9.2%) and eccentric force measured with weighted CMJ (15.2 %) were observed following 5 weeks of high intensity eccentric cycling intervals (5 minutes, 404-965 W, 23.9% - 57.1% PFTP) performed 2x/week with elite alpine skiers (Vogt and Hoppeler 2014, 2012). The utilization of higher relative power outputs thus seem to offer benefits for functional performance. Future studies should seek to determine with greater precision how intensity thresholds vary based on the training proficiency of the participants.

Possible explanations for eccentric cycling benefitting CMJ height while being detrimental to maximal speed and agility are hard to find (Sarkar et al. 2020). Nonetheless, measurements of vertical jump height with the jump and reach technique are prone to measurement errors which undermines its validity (Buckthorpe, Morris, and Folland 2012). The fatigue accumulation provoked by four weeks of 2x/day training, 6 times per week (1200 - 1680 foot contacts/week), with minimal recovery may actually explain the detrimental effects observed for agility and maximal speed capabilities while the plyometric protocol conducted alongside the eccentric cycling protocol probably improved the participants' jumping motor abilities (coordination) and stretch-shortening cycle (SSC) efficiency (Sáez de Villarreal-Sáez et al. 2009; Miller et al. 2006; Ramírez-Campillo, Andrade, and Izquierdo 2013).

A single study selected in this scoping review implemented a strategy to minimize fatigue before the post-intervention testing (Paulsen et al. 2019). While statistically not significant, results from Leong et al. (2014) suggest prolonged exposure to eccentric cycling requires longer recovery periods post-intervention to allow physiological perturbations to be restored and hence increase the precision of the measurements for functional adaptations. The absence of research on chronic eccentric cycling and fatigue accumulation highlights the current knowledge gap. However, based on inferences made from other fields of eccentric training, it is reasonable to make theoretical assumptions on eccentric cycling. Previous assessments with isokinetic single joint exercises suggest repeated high intensity eccentric contractions induce elevated central fatigue (Clos et al. 2020). Flywheel high intensity resistance training suggests architectural changes require longer adaptation window (Seynnes, de Boer, and Narici 2007). Thus, delaying

post-intervention evaluations seems warranted to allow neuromuscular fatigue to dissipate and architectural adaptations to fully take place. Such recommendations would enable researchers to measure the full extent of chronic eccentric cycling functional adaptations.

Endurance Performance Adaptations

Current results regarding endurance performance and eccentric cycling suggest it's a suboptimal training modality to significantly improve endurance performance with trained and well-trained athletes. Unsurprisingly, the results are different from what has been observed with untrained participants or those affected by cardiorespiratory or metabolic diseases. In all the selected studies for this review, training prescription was based on physiological thresholds associated with concentric cycling. As mentioned previously, there are reasons to believe the selection of such parameters as a starting point for eccentric cycling protocols negatively impacts the results for endurance performance just as much as they do for other athletic capabilities. To the author's knowledge, a single study implemented an incremental eccentric cycling test to task failure (Lipski, Abbiss, and Nosaka 2018). The study was conducted on sedentary or recreationally active participants, it used upright ergometers and started both concentric and eccentric incremental tests at the same power output. Hence, eccentric cycling exercise capacity determinants and thresholds are still vastly unknown which impedes the utilization of supra-maximal intensity.

Metabolic adaptations are dependent on the intensity zone or domain at which the exercise is performed (Poole and Jones 2012; Jones et al. 2019; Nixon et al. 2021). Researchers have yet to experiment with the very high eccentric power output that would be required to elicit significant metabolic and cardiorespiratory adaptations capable of positively influencing key endurance performance determinants (Touron et al. 2020). Future research should seek to better understand physiological responses to various eccentric cycling intensity prescriptions thus guiding researchers in the selection of parameters specific to their training objectives.

Considering previous research on plyometric training and eccentric resistance training observations, utilization of elevated training intensity could potentially increase stiffness of lower body musculature, improve running economy and thus raise endurance performance (Lindstedt, LaStayo, and Reich 2001; Cormie, McGuigan, and Newton 2010; Papadopoulos et al. 2014).

Time-Efficiency

Another potential benefit of eccentric cycling lies in its ability to improve time efficiency by allowing athletes to accomplish similar or even greater workloads within shorter or less training sessions (Elmer et al. 2012). This increases the time available for recovery. The monitoring of training load is a common practice now in athletes and practitioners are increasingly sensitive to methods increasing their flexibility in training load prescription to minimize the risk of injury all the while preparing athletes for the demands of competitions (Halson 2014).

LIMITATIONS

Some limitations of this review require attention. The decision to exclude studies focusing solely on untrained participants which greatly limited the pool of studies could be interpreted as a potential selection bias. We believe this decision was justified because physiological differences between untrained and well-trained subjects require different training protocols because they respond differently for a given training load. This review was primarily focused on mapping the state of the literature on eccentric cycling for trained and highly-trained participants. Sports scientists suggest the inclusion of sedentary or solely recreationally active participants is inappropriate considering the inferior reliability of performance measures collected when evaluated and the lack of validity compared to elite performers (McKay et al. 2022). Therefore, exclusion of research protocols conducted with beginners is acceptable to fulfill this mandate and present more precise research directions. None of the included studies have opted for a truly experimental approach. The five studies are considered quasi-experimental because they didn't include a true "non-exercise" control group (Page 2012). Three studies opted for a control group receiving a traditional treatment and one study simply opted for a single group pre-post

comparison. A single study (Green 2018) included a non-exercise control-group, but no “exercise control-group”. The addition of a true control group requires the recruitment of more participants which can interfere with the need to conduct research rapidly in the academic setting. However, to account for random measurement error and within-subject variability when investigating inter-individual variability, authors need to consider the necessity to implement no exercise control groups and apply rigorous statistical approaches (Bonafiglia, Preobrazenski, and Gurd 2021; Bonafiglia et al. 2021; Atkinson and Batterham 2015).

5.CONCLUSION

Multiple studies have suggested that chronic eccentric cycling conducted with untrained participants allows for significant increases in maximal jumping power, concentric cycling power, maximal strength, pennation angle, muscle thickness and leg stiffness (Lipski 2018; Elmer et al. 2012; Leong et al. 2014). Albeit to a lesser degree, the studies reviewed suggest eccentric cycling has the potential to elicit significant neuromuscular adaptations and increase muscular strength with trained and well-trained subjects. Observations reported for endurance performance variables are less convincing. However, we have reasons to believe this underperformance is caused by inadequate intensity prescription and fatigue management. Future studies should seek to provide answers to these questions to fill the knowledge gaps present in the literature.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

MEV and JT designed the study. JT, MEV and DA determined the different terms for the search strategy. DA completed all the searches on the databases and exported the data to MEV. MEV and FFJ completed the screening process with various inputs by JT. MEV wrote the first draft while JV contributed for the editing of the final manuscript. All authors read and approve this final version.

Table 1 : Summary of the principal characteristics in the selected published articles and PhD thesis for the scoping review

| Study | Study Type | Study Location | # Participants | Sex of Participants | Age of Participants | Characteristics of Participants | Ergometer Type |
|----------------------------|---|----------------|--|---------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Elmer et al. 2012 | Quasi-Experimental 2 group pre-post test Between groups | USA | n = 12 ECC (6) CON (6) | M/F | ECC: 25 ± 6 yr. CON: 25 ± 2 yr. | ECC: 77 ± 23 kg, 1.74 ± 0.09m VO2peak: 49 ± 13.1 ml.kg-1.min-1 Pmax: 1035 ± 348 W CON: 76 ± 11 kg, 1.77 ± 0.08m VO2peak: 47.5 ± 12.1 ml.kg-1.min-1 Pmax: 1072 ± 240 W | ECC: Recumbent CON: Upright |
| Green 2018 | PhD Dissertation Chap. 7: Quasi-Experimental 2 group pre-post test Between groups | GBR | Chap. 7: n = 14 ECC (6) CON (8) | M | Chap. 7: 32 ± 8 yr. | Chap. 7: 72.3 ± 9.1 kg, 1.83 ± 0.09 m VO2peak: 64.2 ± 6 ml.kg-1.min-1 CLM5km: 17 min 56 sec ± 66 sec | ECC: Recumbent |
| Paulsen et al. 2019 | Quasi-Experimental 2 group pre-post test Between groups | NOR | n = 23 ECC (12) CON (11) | M | 33 ± 12 yr. | 77 ± 7kg, TV: 10 ± 5h, RT: 1 ± 1.7h ECC (n = 12): VO2max: 62.1 ± 10.1 ml.kg-1.min-1 Pmax: 406 ± 54 W, MP6: 1276 ± 102 W, MP30: 776 ± 62 W EC: 16.3 ± 0.9 W.ml-1, TT20: 268 ± 32 W CON (n = 11): VO2max: 62 ± 9.4 ml.kg-1.min-1, Pmax: 383 ± 36 W, MP6: 1251 ± 84 W, MP30: 761 ± 52 W EC: 16.9 ± 0.8 W.ml-1, TT20: 260 ± 42 W | ECC: Upright |
| Gross et al. 2010 | Quasi-Experimental 2 group pre-post test Between groups | CHE | n = 15 ECC (8) CON (7) | M | 17.6 ± 1.4 yr. | 1.77 ± 0.52 m 73.9 ± 7.5kg 12.4 ± 4.6% BF | ECC: Recumbent |
| Sarkar et al. 2020 | Quasi-Experimental 1 group pre-post test Within groups | IND | n = 15 | M | 15 ± 0.4 yr | 1.67 ± 0.06 m 57.9 ± 4.5kg 16.73 ± 4.5% BF VO2max: 51.66 ± 3.08 ml.kg-1.min-1 Pmax: 538.13 ± 121.42 W | ECC: Upright |

Abbreviations :

BF: body fat, CON: control group, EC: energy cost, ECC: eccentric cycling, F: female, M: male, M/F: male & female, MP6: 6 seconds mean power, MP30: 30 seconds mean power, Pmax: maximal power, SB5km: season best 5km, VO2max: maximal oxygen consumption, VO2peak: peak oxygen consumption

Table 2 : Overview of the protocol characteristics in the selected published articles and PhD thesis for the scoping review

| Study | Study Length & Frequency | Proession Type | Exercise Duration | Exercise Intensity | Cadence (RPM) | Training Protocol | Results |
|---------------------|--------------------------|--|-------------------|-----------------------------|-----------------|---|--|
| Elmer et al. 2012 | 7 weeks @ 3 x/week | Duration & intensity | 10-30 min | 54-66% HRmax | 60 | ECC: ↑ 2 min/week CON: TT to reach same TV accomplished by ECC group | Intensity: ECC: 210 ± 25W → 408 ± 53W CON: 209 ± 17W (⊙ significant Δ) Neuromuscular Adaptations: Δ stiffness of LB: (repeated jumps on FP) ECC +10 ± 3% > CON -2 ± 4% Δ CMJpmax: ECC + 7 ± 2% > CON -2 ± 3% Endurance Performance : ⊙ Δ Pmax ECC & CON RPE 11.9 ± 0.4 (ECC) vs 15.9 ± 0.4 (CON) Length of training sessions = 2X longer for CON @ = TV |
| Green 2018 | 8 weeks @ 2-3 x/week | Intensity : RPElegs of previous session | 10 x 2 min | RPElegs of previous session | 60 ¹ | 2 groups randomly divided based on 5km TT P adjusted based on participant's RPElegs from previous session (+ ou - 0.5 W/kg : RPE 10-20) | Intensity: ECC: 271 ± 21W → 523 ± 53W Efficiency Adaptations: Δ Stride length : + ↑ POST CON vs ECC ⊙ significant Δ on EC Neuromuscular Adaptations: Δ CMJpmax: + ↓ POST CON vs ECC Δ SJ: + ↑ POST ECC vs CON Strength Adaptations: ⊙ significant Δ on concentric strength |
| Paulsen et al. 2019 | 10 weeks @ 1-2 x/week | RPE Borg | 5-8 x 2 min | RPE 12 - 17 | 40 | Identical aerobic intervals for both groups 83-87% HRmax → 93-98% HRmax 15-16 → 17-18 Borg CR20 Taper (5 days) : ↓ 50% TV 5 X 2 min @ 93-98% HRmax 2 days before post-test | Intensity: ECC: 290 ± 60W → 520 ± 70W Strength Adaptations: ECC ↑ VL & RF hypertrophy ECC ↑ isokinetic ECC strength Neuromuscular Adaptations: ECC modifies pedaling stroke ↑ ECC power @ 60°• s-1 : 35.8 ± 13.6 W Endurance Performance Adaptations: ↓ TT20 P: - 3.5 ± 3.8 W ↓ Pmax: -3 ± 2.9 W ↓ Pedaling peak torque: -5.9 ± 8.2 N ↓ Pedaling avg. ° : -1.8 ± 4.5 ° |

Table 2 : (Continued)

| Study | Study Length & Frequency | Proession Type | Exercise Duration | Exercise Intensity | Cadence (RPM) | Training Protocol | Results |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|--|---|---------------|--|--|
| Gross et al. 2010 | 6 weeks @ 3 x/week | RPE Borg | 20 min | RPE 14 - 16 ² | 60-80 | <p>CON: RT 3 x/week 5 sets 30 RM Leg-Press & Leg Curl 4 sets 30 RM Squat & Lunges</p> <p>ECC: RT 3 x/week 3 sets 30 RM Same exercises as CON + 20 min ECC cycling</p> | <p>Intensity: ECC: Avg W progressed from 213 ± 23 W → 850 ± 71 W Strength Adaptations Δ ISO LP85°: ↑ 12.2% (CON) vs ↑ 9.9% (ECC) Δ ISO LC120° : ↓ 10.5% (CON) vs ↓ 5.5% (ECC) Neuromuscular Adaptations: Δ SJ: ↓ 4.2% (CON) vs ∅ Δ for ECC Δ CMJheight: ↑ 6.5% (ECC) vs ∅ Δ for CON Significant group x time effect was found in SJ height for ECC Endurance Performance Adaptations: Pmax significantly ↓ (3%) for CON Other: CON & ECC ↓ 1.4 % BW ECC: ↑ LM (2.1 ± 1.6%) , ∅ Δ for CON</p> |
| Sarkar et al. 2020 | 4 weeks @ 6 x/week | Duration & intensity | <p>5 - 7 x 2 min 4 x 12 - 15 min</p> | <p>Intervals: 4-7 Borg CR10 Aerobic: 76-95% HRmax</p> | 40 | <p>(2x/day) ECC cycling + PLYO PLYO: ↑ foot contacts/session weekly ECC: Intervals (2 min): ↑ Intensity BorgsCR10 weekly ↑ Duration: +1 set weekly Aerobic intervals (12-15 min): ↑ %HRmax weekly ∅ Δ duration</p> | <p>Strength Adaptations: Δ RBS: ↑ 10.57% Endurance Performance Adaptations: Δ VO2max: ↑ 4.61% Δ Pmaxrel: ↑ 8.72% Neuromuscular Adaptations: Δ Acceleration: ↑ 6.79% Δ CMJ: ↑ 6.96% Δ Agility: ↑ 1.57%</p> |

Abbreviations :

BW: body weight, CON: control group, CMJ: countermovement jump, CMJpmax: countermovement jump maximal power, EC: energy cost, ECC: eccentric cycling, FP: force plate, HRmax: Maximal heart rate, ISO: isometric, LB: lower body, LC: leg curl, LM: lean mass, LP: leg press, P: power, Pmax: maximal power, Pmaxrel: maximal relative power, PLYO: plyometric, RBS: relative back strength, RF: rectus femoris, RPE: rate of perceived exertion, RT: resistance training, RM: repetition maximum, SJ: squat jump, TT: time trial, TV: training volume, VL: vastus lateralis, VO2max: maximal oxygen consumption, Δ: change

¹ Based on findings of previous published articles and chapters of author's PhD thesis;

² Progression based on a perceived effort of 'hard';

REFERENCES

- Abbott, B. C., and B. Bigland. 1953. "The Effects of Force and Speed Changes on the Rate of Oxygen Consumption during Negative Work." *The Journal of Physiology* 120 (3): 319–25.
- Abbott, B. C., B. Bigland, and J. M. Ritchie. 1952. "The Physiological Cost of Negative Work." *The Journal of Physiology* 117 (3): 380–90.
- Armstrong, Rebecca, Belinda J. Hall, Jodie Doyle, and Elizabeth Waters. 2011. "Cochrane Update. 'Scoping the Scope' of a Cochrane Review." *Journal of Public Health* 33 (1): 147–50.
- Atkinson, Greg, and Alan M. Batterham. 2015. "True and False Interindividual Differences in the Physiological Response to an Intervention." *Experimental Physiology* 100 (6): 577–88.
- Barnes, Kyle R., Will G. Hopkins, Michael R. McGuigan, Mark E. Northuis, and Andrew E. Kilding. 2013. "Effects of Resistance Training on Running Economy and Cross-Country Performance." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 45 (12): 2322–31.
- Barnes, Kyle R., and Andrew E. Kilding. 2015. "Running Economy: Measurement, Norms, and Determining Factors." *Sports Medicine - Open* 1 (1): 8.
- Barreto, Renan Vieira, Leonardo Coelho Rabello de Lima, and Benedito Sérgio Denadai. 2021. "Moving Forward with Backward Pedaling: A Review on Eccentric Cycling." *European Journal of Applied Physiology* 121 (2): 381–407.
- Bonafiglia, Jacob T., Hashim Islam, Nicholas Preobrazenski, Andrew Ma, Madeleine Deschenes, Avigail T. Erlich, Joe Quadrilatero, David A. Hood, and Brendon J. Gurd. 2021. "Examining Interindividual Differences in Select Muscle and Whole-Body Adaptations to Continuous Endurance Training." *Experimental Physiology* 106 (11): 2168–76.
- Bonafiglia, Jacob T., Nicholas Preobrazenski, and Brendon J. Gurd. 2021. "A Systematic Review Examining the Approaches Used to Estimate Interindividual Differences in Trainability and Classify Individual Responses to Exercise Training." *Frontiers in Physiology* 12 (November): 665044.
- Brandenburg, Jason P., and David Docherty. 2002. "The Effects of Accentuated Eccentric Loading on Strength, Muscle Hypertrophy, and Neural Adaptations in Trained Individuals." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 16 (1): 25–32.
- Buckthorpe, Matthew, John Morris, and Jonathan P. Folland. 2012. "Validity of Vertical Jump Measurement Devices." *Journal of Sports Sciences* 30 (1): 63–69.
- Clos, Pierre, Yoann Garnier, Alain Martin, and Romuald Lepers. 2020. "Corticospinal Excitability Is Altered Similarly Following Concentric and Eccentric Maximal Contractions." *European Journal of Applied Physiology* 120 (6): 1457–69.
- Coratella, Giuseppe, Stefano Longo, Emiliano Cè, Fabio Esposito, Yuri de Almeida Costa Campos, Miller Pereira Guimarães, Sandro Fernandes da Silva, et al. 2019. "Commentaries on Viewpoint: Distinct Modalities of Eccentric Exercise: Different Recipes, Not the Same Dish." *Journal of Applied Physiology* 127 (3): 884–91.
- Cormie, Prue, Michael R. McGuigan, and Robert U. Newton. 2010. "Changes in the Eccentric Phase Contribute to Improved Stretch-Shorten Cycle Performance after Training." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (9): 1731–44.

- Denadai, Benedito Sérgio, Rafael Alves de Aguiar, Leonardo Coelho Rabello de Lima, Camila Coelho Greco, and Fabrizio Caputo. 2017. "Explosive Training and Heavy Weight Training Are Effective for Improving Running Economy in Endurance Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Sports Medicine* 47 (3): 545–54.
- Dillon, Piers C. 2017. "The Effect of Eccentric Cycle Training on Physiological and Performance Parameters in Cycling." Edited by Joe McQuillan. University of Waikato. <https://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/11776/thesis.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Douglas, Jamie, Simon Pearson, Angus Ross, and Mike McGuigan. 2017. "Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review." *Sports Medicine* 47 (5): 917–41.
- Dufour, Stéphane Pascal, Eliane Lampert, Stéphane Doutreleau, Evelyne Lonsdorfer-Wolf, Veronique L. Billat, François Piquard, and Ruddy Richard. 2004. "Eccentric Cycle Exercise: Training Application of Specific Circulatory Adjustments." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36 (11): 1900–1906.
- Elmer, S., S. Hahn, P. McAllister, C. Leong, and J. Martin. 2012. "Improvements in Multi-Joint Leg Function Following Chronic Eccentric Exercise." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 22 (5): 653–61.
- Green, David. 2018. "The Neuromuscular Responses to Eccentric Cycling and the Implications for Athletic Development." Doctoral, Northumbria University. <http://nrl.northumbria.ac.uk/39771/>.
- Gross, M., F. Lüthy, J. Kroell, E. Müller, H. Hoppeler, and M. Vogt. 2010. "Effects of Eccentric Cycle Ergometry in Alpine Skiers." *International Journal of Sports Medicine* 31 (8): 572–76.
- Halson, Shona L. 2014. "Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes." *Sports Medicine* 44 Suppl 2 (November): S139–47.
- Hollander, Daniel B., Robert R. Kraemer, Marcus W. Kilpatrick, Zaid G. Ramadan, Greg V. Reeves, Michelle François, Edward P. Hebert, and James L. Tryniecki. 2007. "Maximal Eccentric and Concentric Strength Discrepancies between Young Men and Women for Dynamic Resistance Exercise." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 21 (1): 34–40.
- Hoppeler, Hans. 2016. "Moderate Load Eccentric Exercise; A Distinct Novel Training Modality." *Frontiers in Physiology* 7 (November): 483.
- Jones, Andrew M., Mark Burnley, Matthew I. Black, David C. Poole, and Anni Vanhatalo. 2019. "The Maximal Metabolic Steady State: Redefining the 'Gold Standard.'" *Physiological Reports* 7 (10): e14098.
- Leong, C. H., W. J. McDermott, S. J. Elmer, and J. C. Martin. 2014. "Chronic Eccentric Cycling Improves Quadriceps Muscle Structure and Maximum Cycling Power." *International Journal of Sports Medicine* 35 (7): 559–65.
- Lindstedt, S. L., P. C. LaStayo, and T. E. Reich. 2001. "When Active Muscles Lengthen: Properties and Consequences of Eccentric Contractions." *News in Physiological Sciences: An International Journal of Physiology Produced Jointly by the International Union of Physiological Sciences and the American Physiological Society* 16 (December): 256–61.
- Lipski, Marcin. 2018. "High-Intensity Interval Eccentric Cycling: Acute and Chronic Effects." Edith Cowan University. <http://ro.ecu.edu.au/theses/2104/>.

- Lipski, Marcin, Chris R. Abbiss, and Kazunori Nosaka. 2018. "Cardio-Pulmonary Responses to Incremental Eccentric and Concentric Cycling Tests to Task Failure." *European Journal of Applied Physiology* 118 (February): 947–57.
- MacInnis, Martin J., and Martin J. Gibala. 2017. "Physiological Adaptations to Interval Training and the Role of Exercise Intensity." *The Journal of Physiology* 595 (9): 2915–30.
- McKay, Alannah K. A., Trent Stellingwerff, Ella S. Smith, David T. Martin, Iñigo Mujika, Vicky L. Goosey-Tolfrey, Jeremy Sheppard, and Louise M. Burke. 2022. "Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework." *International Journal of Sports Physiology and Performance*, December, 1–15.
- McNeill, Conor, C. Martyn Beaven, Daniel T. McMaster, and Nicholas Gill. 2019. "Eccentric Training Interventions and Team Sport Athletes." *Journal of Functional Morphology and Kinesiology* 4 (4). <https://doi.org/10.3390/jfmk4040067>.
- Miller, Michael G., Jeremy J. Herniman, Mark D. Ricard, Christopher C. Cheatham, and Timothy J. Michael. 2006. "The Effects of a 6-Week Plyometric Training Program on Agility." *Journal of Sports Science & Medicine* 5 (3): 459–65.
- Nixon, Rebekah J., Sascha H. Kranen, Anni Vanhatalo, and Andrew M. Jones. 2021. "Steady-State above MLSS: Evidence That Critical Speed Better Represents Maximal Metabolic Steady State in Well-Trained Runners." *European Journal of Applied Physiology* 121 (11): 3133–44.
- Paavolainen, L., K. Häkkinen, I. Hämmäläinen, A. Nummela, and H. Rusko. 1999. "Explosive-Strength Training Improves 5-Km Running Time by Improving Running Economy and Muscle Power." *Journal of Applied Physiology* 86 (5): 1527–33.
- Page, Phil. 2012. "Research Designs in Sports Physical Therapy." *International Journal of Sports Physical Therapy* 7 (5): 482–92.
- Papadopoulos, Christos, Konstantinos Theodosiou, Gregory C. Bogdanis, Evangelia Gkantiraga, Ioannis Gissis, Michalis Sambanis, Athanasios Souglis, and Aristomenis Sotiropoulos. 2014. "Multiarticular Isokinetic High-Load Eccentric Training Induces Large Increases in Eccentric and Concentric Strength and Jumping Performance." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 28 (9): 2680–88.
- Paulsen, Gøran, Hedda Ø. Eidsheim, Christian Helland, Olivier Seynnes, Paul A. Solberg, and Bent R. Rønnestad. 2019. "Eccentric Cycling Does Not Improve Cycling Performance in Amateur Cyclists." *PloS One* 14 (1): e0208452.
- Peñailillo, Luis, Anthony J. Blazevich, and Kazunori Nosaka. 2017. "Factors Contributing to Lower Metabolic Demand of Eccentric Compared with Concentric Cycling." *Journal of Applied Physiology* 123 (4): 884–93.
- Perrey, S., A. Betik, R. Candau, J. D. Rouillon, and R. L. Hughson. 2001. "Comparison of Oxygen Uptake Kinetics during Concentric and Eccentric Cycle Exercise." *Journal of Applied Physiology* 91 (5): 2135–42.
- Peters, Micah D. J., Christina M. Godfrey, Hanan Khalil, Patricia McInerney, Deborah Parker, and Cassia Baldini Soares. 2015. "Guidance for Conducting Systematic Scoping Reviews." *International Journal of Evidence-Based Healthcare* 13 (3): 141–46.
- Peters, Micah D. J., Casey Marnie, Andrea C. Tricco, Danielle Pollock, Zachary Munn, Lyndsay Alexander, Patricia McInerney, Christina M. Godfrey, and Hanan Khalil. 2021. "Updated

- Methodological Guidance for the Conduct of Scoping Reviews.” *JBI Evidence Implementation* 19 (1): 3–10.
- Poole, David C., and Andrew M. Jones. 2012. “Oxygen Uptake Kinetics.” *Comprehensive Physiology* 2 (2): 933–96.
- Ramírez-Campillo, Rodrigo, David C. Andrade, and Mikel Izquierdo. 2013. “Effects of Plyometric Training Volume and Training Surface on Explosive Strength.” *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 27 (10): 2714–22.
- Sáez de Villarreal-Sáez, Eduardo, Eleftherios Kellis, William J. Kraemer, and Mikel Izquierdo. 2009. “Determining Variables of Plyometric Training for Improving Vertical Jump Height Performance: A Meta-Analysis.” *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 23 (2): 495–506.
- Sarkar, Surojit, Suvam Dasgupta, K. Kosana Meitei, Snehusu Adhikari, Amit Bandyopadhyay, and Swapan Kumar Dey. 2020. “Effect of Eccentric Cycling and Plyometric Training on Physiological and Performance Related Parameters of Trained Junior Track Cyclists.” *Polish Journal of Sport and Tourism* 27 (1): 14–20.
- Saunders, Philo U., David B. Pyne, Richard D. Telford, and John A. Hawley. 2004. “Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners.” *Sports Medicine* 34 (7): 465–85.
- Seynnes, O. R., M. de Boer, and M. V. Narici. 2007. “Early Skeletal Muscle Hypertrophy and Architectural Changes in Response to High-Intensity Resistance Training.” *Journal of Applied Physiology* 102 (1): 368–73.
- Suchomel, Timothy J., John P. Wagle, Jamie Douglas, Christopher B. Taber, Mellissa Harden, G. Gregory Haff, and Michael H. Stone. 2019. “Implementing Eccentric Resistance Training—Part 1: A Brief Review of Existing Methods.” *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/jfmk4020038>.
- Touron, Julianne, Frédéric Costes, Emmanuel Coudeyre, Hélène Perrault, and Ruddy Richard. 2020. “Aerobic Metabolic Adaptations in Endurance Eccentric Exercise and Training: From Whole Body to Mitochondria.” *Frontiers in Physiology* 11: 596351.
- Tricco, Andrea C., Erin Lillie, Wasifa Zarin, Kelly K. O’Brien, Heather Colquhoun, Danielle Levac, David Moher, et al. 2018. “PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation.” *Annals of Internal Medicine* 169 (7): 467–73.
- Vikmoen, Olav, Truls Raastad, Olivier Seynnes, Kristoffer Bergstrøm, Stian Ellefsen, and Bent R. Rønnestad. 2016. “Effects of Heavy Strength Training on Running Performance and Determinants of Running Performance in Female Endurance Athletes.” *PloS One* 11 (3): e0150799.
- Vogt, Michael, and Hans H. Hoppeler. 2012. “Competitive Alpine Skiing: Combining Strength and Endurance Training. Molecular Bases and Applications.” In *Science and Skiing V*, edited by Mueller E, Lindinger S, Stoeggl T. Meyer. Meyer & Meyer.
- . 2014. “Eccentric Exercise: Mechanisms and Effects When Used as Training Regime or Training Adjunct.” *Journal of Applied Physiology* 116 (11): 1446–54.
- Wagle, John P., Christopher B. Taber, Aaron J. Cunanan, Garrett E. Bingham, Kevin M. Carroll, Brad H. DeWeese, Kimitake Sato, and Michael H. Stone. 2017. “Accentuated Eccentric

Loading for Training and Performance: A Review.” *Sports Medicine*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0755-6>.

Walsh, Joel A., Paul J. Stapley, Jonathan Shemmell, and Darryl J. McAndrew. 2021. “Reliability of a Protocol to Elicit Peak Measures Generated by the Lower Limb for Semi-Recumbent Eccentric Cycling.” *Frontiers in Sports and Active Living* 3 (May): 653699.

4. DISCUSSION

Les principaux faits à retenir de cette revue de portée sur le pédalage excentrique sont les suivants :

- I. Le pédalage excentrique permet peu ou aucun bénéfice au niveau de la performance en endurance.
- II. L'impact du pédalage excentrique sur la performance en endurance varie en fonction des paramètres mesurés.
- III. Le pédalage excentrique influence principalement les propriétés neuromusculaires, la force maximale et la perception de l'effort.
- IV. Le pédalage excentrique ne procure pas de gain notable ou a un impact délétère sur le rendement mécanique et la capacité aérobie maximale.

4.1. PERFORMANCE EN ENDURANCE

Les effets de l'entraînement au pédalage excentrique observés sur la performance en endurance chez les participants entraînés sont inférieurs à ce qui a été mesuré auprès de participants sans expérience en entraînement, chez des participants ayant des problèmes de santé cardio-respiratoire ou métabolique et chez les personnes âgées (Leong et al. 2014; Rooyackers, Berkeljon, and Folgering 2003; Lastayo et al. 1999; Paul C. LaStayo et al. 2003; Mueller et al. 2009). À la suite d'un protocole d'entraînement de 8 semaines sur ergocycle excentrique, Leong et al. (2014) ont observé une augmentation de la puissance maximale sur huit rotations du pédales de $5 \pm 1 \%$ et $9 \pm 2 \%$, 1 et 8 semaines après la fin de la période d'entraînement. Les comparaisons avec les données recueillies auprès de population ayant des problèmes de santé cardio-respiratoire, des problèmes métaboliques et chez les personnes âgées sont complexes puisque les auteurs ont employé des méthodes d'évaluations des capacités spécifiques à leur population (tests chronométrés de lever de chaise de Mathias, test d'équilibre, descente d'escaliers). Les résultats de l'étude de portée suggèrent que le pédalage excentrique est une modalité d'entraînement inadéquate pour améliorer les différents déterminants de la

performance chez les personnes entraînées et très entraînées (De Pauw et al. 2013; McKay et al. 2022).

Cependant, l'ensemble des protocoles de recherche à l'exception de celui de Lipski et al. (2018) ont utilisé un test incrémental sur vélo concentrique ou d'autres paramètres physiologiques mesurés ou associés à des efforts aérobies traditionnels pour la prescription d'intensité (%VO₂max mesuré dans un test incrémental concentrique, %FCmax théorique, perception de l'effort). Plusieurs auteurs ont mentionné qu'il est fort probable que le recours à ces paramètres dans l'élaboration des protocoles de recherche sur le pédalage excentrique a un impact négatif sur les variables mesurées (Barreto, de Lima, and Denadai 2021; Coratella et al. 2019). Les conclusions suggérant l'incapacité du pédalage excentrique à augmenter la performance en endurance pourraient être considérées comme un peu trop hâtives considérant la qualité et la quantité de données recueillies.

Un seul protocole expérimental a eu recours à un test incrémental à effort maximal sur ergocycle excentrique (Lipski, Abbiss, and Nosaka 2018a). Cette étude avait comme objectif d'établir un comparatif sur les réponses cardio-respiratoires lors d'efforts maximaux entre les différents modes de pédalage. Elle a été faite auprès de sujets sédentaires, en utilisant des ergocycles debout et les tests incrémentaux (excentrique et concentrique) ont débuté à une puissance identique. À la différence du protocole d'effort incrémenté concentrique, l'arrêt de l'épreuve excentrique était exigé lorsque les participants ne pouvaient résister à la cadence imposée par le moteur et dépassait de 10 RPM la cadence prescrite pour plus de 30 secondes. En raison des caractéristiques métaboliques du pédalage excentrique mentionnées dans la première partie de ce travail (coût métabolique beaucoup moins élevé, de la lactatémie moins élevée, plus faible activation musculaire, débit cardiaque moins élevé, perception d'effort moins élevée), la durée du test incrémental avec pédalage excentrique était considérablement plus élevée (CON: 6 à 12 minutes, EXC: 11 à 20 minutes). La puissance de travail maximale était 53% plus élevée dans le groupe excentrique (CON: 294 ± 61 W, EXC: 449 ± 115 W) alors que la consommation maximale en oxygène moyenne et le débit ventilatoire moyen était respectivement 43 % (CON: 43.9 ± 6.9,

vs. EXC: $30.6 \pm 5.6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) et 41 % moins élevé (CON: 110 ± 28 , vs. EXC: $65 \pm 22 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$). Aucune étude ne rapporte des résultats à des épreuves maximales chez des sujets entraînés ou très entraînés.

Cette absence de connaissance sur les domaines d'intensité, les efforts à très haute intensité et les réponses physiologiques à l'effort maximal au pédalage excentrique est un handicap à l'utilisation d'intensité de travail supra-maximale. Ceci nous oblige à nuancer les conclusions face au potentiel du pédalage excentrique sur les adaptations en endurance puisque l'intensité de travail est déterminante pour les adaptations métaboliques (MacInnis and Gibala 2017). Pour l'instant, nous pouvons conclure que les données actuelles nous incitent à la prudence vis-à-vis le potentiel du pédalage excentrique sur les adaptations permettant de rehausser la performance en endurance tout en notant les importantes limites des travaux effectués à ce jour.

La durée des études incluses dans l'étude de portée varie entre 4 et 10 semaines. Une méta-analyse sur l'effet de l'entraînement combiné sur le rendement énergétique révèle que des bienfaits peuvent survenir lors d'un bloc d'entraînement court ou moyen (6-14 semaines) chez des sujets entraînés, mais que des expositions plus longues (14-20 semaines) sont nécessaires afin d'observer des changements chez les sujets très entraînés (Denadai et al. 2017). La même étude révèle que les améliorations sont faibles dans les 6 à 8 premières semaines, alors qu'elles sont modérées à larges après 12 à 14 semaines. Il est donc possible que les protocoles d'entraînement sur ergocycle excentrique inclus dans la revue de portée soient trop courts pour mener à des adaptations significatives au niveau du rendement énergétique. L'augmentation de la rigidité des complexes musculo-tendineux des membres inférieurs serait un facteur déterminant dans l'amélioration du rendement énergétique (Adamantios Arampatzis et al. 2006).

4.2. ADAPTATIONS NEUROMUSCULAIRES ET IMPACT SUR LA FORCE MUSCULAIRE

Les résultats observés lors de l'étude de portée suggèrent que le pédalage excentrique est une modalité d'entraînement adéquate pour induire des adaptations neuromusculaires et

augmenter la force maximale chez des sujets actifs de façon récréative, entraînés et très entraînés (McKay et al. 2022). Ces adaptations sont importantes dans l'optimisation de la performance sportive puisque la puissance et la force maximales sont déterminantes dans l'ensemble des qualités athlétiques (sauts, changements de direction, vitesse maximale, accélération).

Des augmentations dans la performance des CMJ ont été observées à la suite de l'ensemble des protocoles d'entraînement. Ces protocoles étaient très variés, effectués sur différents modèles d'ergomètre, proposaient des intensités de travail et des progressions variées de la surcharge excentrique (Sarkar et al. 2020; D. Green 2018; Gross et al. 2010; S. Elmer et al. 2012). Récemment, un modèle a été proposé afin de mesurer le potentiel de force excentrique maximale sur 6 secondes (PETP) de participants sédentaires ou actifs de façon récréative (Walsh et al. 2021; McKay et al. 2022). Les auteurs ont évalué ce PETP à l'aide d'un dynamomètre dans une amplitude de mouvement de 180° en reproduisant les angles articulaires (hanches, genoux, chevilles) d'un ergocycle semi-allongé et une vitesse de contraction reproduisant une cadence de 60 RPM. La figure 3 propose un comparatif entre les intervalles d'intensité utilisés dans les études répertoriées dans la revue de portée et la moyenne suggérée de PETP dans Walsh et al. (2021).

On remarque qu'aucun protocole expérimental inclus dans la revue de portée n'a soumis ses participants à des intensités relatives de travail supérieures à 55 % et qu'une seule d'entre elle a dépassé le 50 %. Bien que les données actuelles ne permettent pas de s'avancer sur la présence d'un potentiel seuil à atteindre ou dépasser afin d'induire les adaptations désirées. Cependant les études montrant des bénéfices pour le pédalage excentrique ont utilisé des puissances de travail plus élevées et très souvent supérieures à 50%. Vogt et Hoppeler (2012) sont les seuls chercheurs à avoir dépassé cette limite d'intensité (57.1 %). Leur étude a été réalisée auprès de skieurs alpins élites sur une période de 5 semaines à raison de 2 séances par semaine avec des intervalles de 5 minutes. Ils ont observé des améliorations significatives au niveau de la force

isométrique maximale des membres inférieurs (12 %), de la puissance des CMJ (8.8 %), de la puissance lors des SJ (9.2 %) et de la force excentrique lors des CMJ avec surcharge (15.2 %).

L'utilisation d'intensité relative de travail plus élevée semble donc être avantageuse pour engendrer des adaptations fonctionnelles avantageuses pour la performance sportive. Il serait pertinent d'explorer dans quelle mesure le niveau d'expérience des participants nécessite un ajustement dans la prescription des puissances de travail pour optimiser les adaptations au niveau de l'efficacité neuromusculaire et de la force maximale. Plusieurs études suggèrent que l'ajout d'une surcharge excentrique à un programme d'entraînement permet d'améliorer les principaux indicateurs de performance au niveau de la force maximale, de la vitesse maximale, de la puissance maximale et dans l'efficacité des changements de direction (McNeill et al. 2019). Les résultats de l'étude de portée suggèrent que la surcharge excentrique pourrait être tout aussi importante lors d'un entraînement avec pédalage excentrique.

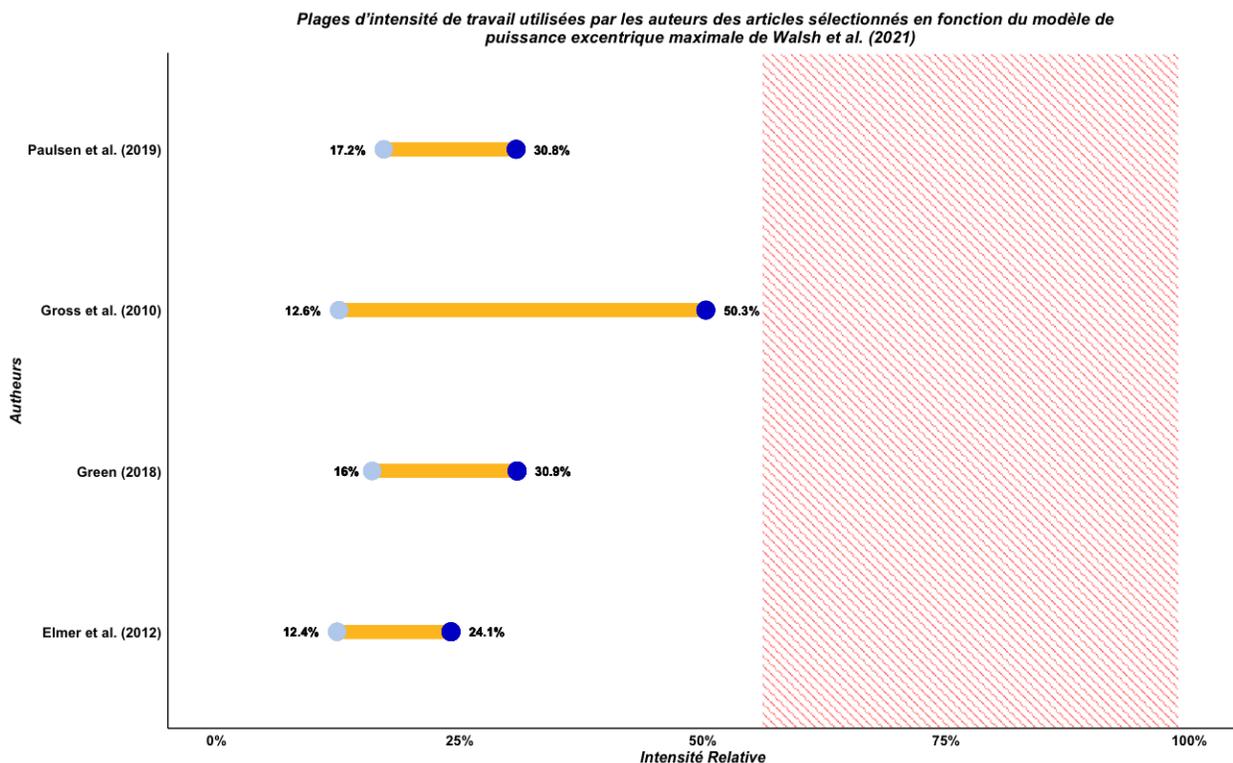


Figure 8. – Plages d'intensité de travail utilisées par les auteurs des articles sélectionnés en fonction du modèle de puissance excentrique maximale de Walsh et al. (2021). On remarque l'absence d'intensité de travail supérieures à 50.3%.

L'amélioration de la performance au CMJ combinée à la détérioration de la vitesse maximale et des performances dans un test de changements de direction rapportés dans l'étude de Sarkar et al. (2020) sont difficiles à expliquer. Le choix d'évaluer la hauteur des sauts verticaux à l'aide d'un saut à contre-mouvement avec atteinte du bras ouvre la porte à certaines critiques. Les auteurs ne rapportent pas comment les sources d'erreur de mesure associées à cette méthode d'évaluation ont été prises en considération (la technique de saut, la coordination, la flexibilité et l'utilisation des bras) (Buckthorpe, Morris, and Folland 2012). L'utilisation d'un test navette pour la mesure de la capacité aérobie maximale chez des cyclistes sur piste peut aussi être remise en question. Lors l'analyse des résultats, il faut aussi prendre en considération l'accumulation de la fatigue induite par le protocole intensif proposé par Sarkar et al. (2020) où les participants ont été exposés à du pédalage excentrique et des exercices de pliométrie pendant 4 semaines à deux entraînements par jour, six jours par semaine (12 séances, 1200 à 1680 contacts au sol/semaine). Ce type de volume d'entraînement en pliométrie est $\sim 3.5-7x$ plus élevé que le volume d'entraînement que l'on retrouve habituellement dans la littérature (Miller et al. 2006; Sáez de Villarreal-Sáez et al. 2009; Ramírez-Campillo, Andrade, and Izquierdo 2013). Il est donc possible qu'une gestion inadéquate du volume d'entraînement combiné à la négligence d'instaurer une fenêtre de récupération avant les évaluations post-intervention et une batterie d'évaluation insuffisamment sensible ou adaptée puissent expliquer ces résultats contradictoires.

Une seule étude incluse dans la revue de portée avait planifié une stratégie afin de réduire l'accumulation de fatigue avant les évaluations post-intervention via une réduction de 50 % du volume d'entraînement dans les cinq dernières journées (Paulsen et al. 2019). Une autre étude réalisée auprès de sujets sédentaires ou actifs de façon récréative suggère qu'un entraînement chronique avec pédalage excentrique requiert une période de récupération prolongée post-intervention (Leong et al. 2014). La recherche sur l'entraînement excentrique monoarticulaire sur appareil isocinétique corrobore ces résultats en montrant que les contractions musculaires excentriques à haute intensité provoquent une augmentation de la fatigue centrale (Clos et al. 2020). D'autres travaux sur l'entraînement excentrique avec poulie iso-inertielle suggèrent qu'elle nécessite une plus grande période de récupération post-intervention afin d'accorder le

temps nécessaire pour le remodelage des tissus musculaires et conjonctifs (Seynnes, de Boer, and Narici 2007). Ainsi, on peut conclure qu'il serait probablement préférable de prévoir une période de récupération suivant l'exposition prolongée au pédalage excentrique afin de mesurer adéquatement l'étendue des adaptations chroniques et fonctionnelles.

5. CONCLUSION

La revue de portée de ce mémoire tentait de I) explorer les évidences scientifiques actuelles sur les adaptations chroniques au pédalage excentrique chez des sujets entraînés et très entraînés; II) élaborer une synthèse des bénéfices observés du pédalage excentrique sur les déterminants de la performance en endurance chez des sujets entraînés et très entraînés; III) identifier les lacunes actuelles au niveau de la connaissance et IV) tenter d'offrir des pistes de recherches potentielles dans le but de combler ces lacunes.

Les évidences scientifiques disponibles à ce jour ne permettent pas, pour le moment, de justifier l'utilisation du pédalage excentrique dans le but d'augmenter le niveau de performance en endurance. Les chercheurs doivent être en mesure de présenter des protocoles plus homogènes afin de combler l'hétérogénéité et les lacunes identifiées dans les études. Il faut poursuivre la recherche afin de développer des protocoles d'évaluation permettant d'identifier une puissance maximale en pédalage excentrique, en s'appuyant sur les performances en pédalage concentrique ou d'autres mesures de performance. Cela permettrait d'améliorer notre compréhension des réponses aiguës et chroniques spécifiques à l'exercice cyclique excentrique. Cela permettrait aussi de prescrire des intensités de travail plus élevées dans les protocoles d'entraînement, plus particulièrement avec des athlètes entraînés et très entraînés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aagaard, P., E. B. Simonsen, J. L. Andersen, S. P. Magnusson, J. Halkjaer-Kristensen, and P. Dyhre-Poulsen. 2000. "Neural Inhibition during Maximal Eccentric and Concentric Quadriceps Contraction: Effects of Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 89 (6): 2249–57.
- Abbott, B. C., and X. M. Aubert. 1952. "The Force Exerted by Active Striated Muscle during and after Change of Length." *The Journal of Physiology* 117 (1): 77–86.
- Abbott, B. C., and B. Bigland. 1953. "The Effects of Force and Speed Changes on the Rate of Oxygen Consumption during Negative Work." *The Journal of Physiology* 120 (3): 319–25.
- Abbott, B. C., B. Bigland, and J. M. Ritchie. 1952. "The Physiological Cost of Negative Work." *The Journal of Physiology* 117 (3): 380–90.
- Adams, G. R., B. M. Hather, K. M. Baldwin, and G. A. Dudley. 1993. "Skeletal Muscle Myosin Heavy Chain Composition and Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 74 (2): 911–15.
- Alcazar, Julian, Robert Csapo, Ignacio Ara, and Luis M. Alegre. 2019. "On the Shape of the Force-Velocity Relationship in Skeletal Muscles: The Linear, the Hyperbolic, and the Double-Hyperbolic." *Frontiers in Physiology* 10 (June): 769.
- Andersen, J. L., H. Klitgaard, and B. Saltin. 1994. "Myosin Heavy Chain Isoforms in Single Fibres from m. Vastus Lateralis of Sprinters: Influence of Training." *Acta Physiologica Scandinavica* 151 (2): 135–42.
- Arampatzis, A., G. P. Brüggemann, and G. M. Klapsing. 2001. "Leg Stiffness and Mechanical Energetic Processes during Jumping on a Sprung Surface." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33 (6): 923–31.
- Arampatzis, Adamantios, Gianpiero De Monte, Kiros Karamanidis, Gaspar Morey-Klapsing, Savvas Stafilidis, and Gert-Peter Brüggemann. 2006. "Influence of the Muscle-Tendon Unit's Mechanical and Morphological Properties on Running Economy." *The Journal of Experimental Biology* 209 (Pt 17): 3345–57.
- Armstrong, Rebecca, Belinda J. Hall, Jodie Doyle, and Elizabeth Waters. 2011. "Cochrane

- Update. 'Scoping the Scope' of a Cochrane Review." *Journal of Public Health* 33 (1): 147–50.
- Ascensão, António, António Rebelo, Eduardo Oliveira, Franklim Marques, Laura Pereira, and José Magalhães. 2008. "Biochemical Impact of a Soccer Match - Analysis of Oxidative Stress and Muscle Damage Markers throughout Recovery." *Clinical Biochemistry* 41 (10–11): 841–51.
- Atkinson, Greg, and Alan M. Batterham. 2015. "True and False Interindividual Differences in the Physiological Response to an Intervention." *Experimental Physiology* 100 (6): 577–88.
- Balsalobre-Fernández, Carlos, Jordan Santos-Concejero, and Gerasimos V. Grivas. 2016. "Effects of Strength Training on Running Economy in Highly Trained Runners: A Systematic Review With Meta-Analysis of Controlled Trials." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 30 (8): 2361–68.
- Barnes, Kyle R., Will G. Hopkins, Michael R. McGuigan, Mark E. Northuis, and Andrew E. Kilding. 2013. "Effects of Resistance Training on Running Economy and Cross-Country Performance." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 45 (12): 2322–31.
- Barnes, Kyle R., and Andrew E. Kilding. 2015. "Running Economy: Measurement, Norms, and Determining Factors." *Sports Medicine - Open* 1 (1): 8.
- Baroni, Bruno Manfredini, Jean Marcel Geremia, Rodrigo Rodrigues, Rodrigo De Azevedo Franke, Kiros Karamanidis, and Marco Aurélio Vaz. 2013. "Muscle Architecture Adaptations to Knee Extensor Eccentric Training: Rectus Femoris vs. Vastus Lateralis." *Muscle & Nerve* 48 (4): 498–506.
- Baroni, Bruno Manfredini, R. Rodrigues, R. Franke, J. Geremia, D. Rassier, and M. Vaz. 2013. "Time Course of Neuromuscular Adaptations to Knee Extensor Eccentric Training." *International Journal of Sports Medicine* 34 (10): 904–11.
- Barreto, Renan Vieira, Leonardo Coelho Rabello de Lima, and Benedito Sérgio Denadai. 2021. "Moving Forward with Backward Pedaling: A Review on Eccentric Cycling." *European Journal of Applied Physiology* 121 (2): 381–407.
- Bassett, D. R., Jr, and E. T. Howley. 2000. "Limiting Factors for Maximum Oxygen Uptake and Determinants of Endurance Performance." *Medicine and Science in Sports and Exercise*

32 (1): 70–84.

- Beltman, J. G. M., A. J. Sargeant, W. van Mechelen, and A. de Haan. 2004. "Voluntary Activation Level and Muscle Fiber Recruitment of Human Quadriceps during Lengthening Contractions." *Journal of Applied Physiology* 97 (2): 619–26.
- Berg, H. E., and P. A. Tesch. 1998. "Force and Power Characteristics of a Resistive Exercise Device for Use in Space." *Acta Astronautica* 42 (1–8): 219–30.
- Bigland, B., and O. C. Lippold. 1954. "The Relation between Force, Velocity and Integrated Electrical Activity in Human Muscles." *The Journal of Physiology* 123 (1): 214–24.
- Bigland-Ritchie, B., H. Graichen, and J. J. Woods. 1973. "A Variable-Speed Motorized Bicycle Ergometer for Positive and Negative Work Exercise." *Journal of Applied Physiology* 35 (5): 739–40.
- Bigland-Ritchie, B., D. A. Jones, and J. J. Woods. 1979. "Excitation Frequency and Muscle Fatigue: Electrical Responses during Human Voluntary and Stimulated Contractions." *Experimental Neurology* 64 (2): 414–27.
- Bonafiglia, Jacob T., Hashim Islam, Nicholas Preobrazenski, Andrew Ma, Madeleine Deschenes, Avigail T. Erlich, Joe Quadrilatero, David A. Hood, and Brendon J. Gurd. 2021. "Examining Interindividual Differences in Select Muscle and Whole-Body Adaptations to Continuous Endurance Training." *Experimental Physiology* 106 (11): 2168–76.
- Bonafiglia, Jacob T., Nicholas Preobrazenski, and Brendon J. Gurd. 2021. "A Systematic Review Examining the Approaches Used to Estimate Interindividual Differences in Trainability and Classify Individual Responses to Exercise Training." *Frontiers in Physiology* 12 (November): 665044.
- Brandenburg, Jason P., and David Docherty. 2002. "The Effects of Accentuated Eccentric Loading on Strength, Muscle Hypertrophy, and Neural Adaptations in Trained Individuals." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 16 (1): 25–32.
- Brughelli, Matt, and John Cronin. 2008. "Influence of Running Velocity on Vertical, Leg and Joint Stiffness: Modelling and Recommendations for Future Research." *Research in Sports Medicine* 38 (8): 647–57.

- Buchheit, Martin. 2008. "The 30-15 Intermittent Fitness Test: Accuracy for Individualizing Interval Training of Young Intermittent Sport Players." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 22 (2): 365–74.
- Buckthorpe, Matthew, John Morris, and Jonathan P. Folland. 2012. "Validity of Vertical Jump Measurement Devices." *Journal of Sports Sciences* 30 (1): 63–69.
- Butler, Robert J., Harrison P. Crowell 3rd, and Irene McClay Davis. 2003. "Lower Extremity Stiffness: Implications for Performance and Injury." *Clinical Biomechanics* 18 (6): 511–17.
- Carzoli, Joseph P., Colby A. Sousa, Daniel J. Belcher, Eric R. Helms, Andy V. Khamoui, Michael Whitehurst, and Michael C. Zourdos. 2019. "The Effects of Eccentric Phase Duration on Concentric Outcomes in the Back Squat and Bench Press in Well-Trained Males." *Journal of Sports Sciences* 37 (23): 2676–84.
- Chapman, D., M. Newton, P. Sacco, and K. Nosaka. 2006. "Greater Muscle Damage Induced by Fast versus Slow Velocity Eccentric Exercise." *International Journal of Sports Medicine* 27 (8): 591–98.
- Chimera, Nicole J., Kathleen A. Swanik, C. Buz Swanik, and Stephen J. Straub. 2004. "Effects of Plyometric Training on Muscle-Activation Strategies and Performance in Female Athletes." *Journal of Athletic Training* 39 (1): 24–31.
- Clos, Pierre, Yoann Garnier, Alain Martin, and Romuald Lepers. 2020. "Corticospinal Excitability Is Altered Similarly Following Concentric and Eccentric Maximal Contractions." *European Journal of Applied Physiology* 120 (6): 1457–69.
- Coffey, Vernon G., and John A. Hawley. 2007. "The Molecular Bases of Training Adaptation." *Sports Medicine* 37 (9): 737–63.
- Cook, Christian J., C. Martyn Beaven, and Liam P. Kilduff. 2013. "Three Weeks of Eccentric Training Combined with Overspeed Exercises Enhances Power and Running Speed Performance Gains in Trained Athletes." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 27 (5): 1280–86.
- Coratella, Giuseppe, Stefano Longo, Emiliano Cè, Fabio Esposito, Yuri de Almeida Costa Campos, Miller Pereira Guimarães, Sandro Fernandes da Silva, et al. 2019. "Commentaries on

- Viewpoint: Distinct Modalities of Eccentric Exercise: Different Recipes, Not the Same Dish." *Journal of Applied Physiology* 127 (3): 884–91.
- Coratella, Giuseppe, and Federico Schena. 2016. "Eccentric Resistance Training Increases and Retains Maximal Strength, Muscle Endurance, and Hypertrophy in Trained Men." *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme* 41 (11): 1184–89.
- Cormie, Prue, Michael R. McGuigan, and Robert U. Newton. 2010a. "Adaptations in Athletic Performance after Ballistic Power versus Strength Training." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (8): 1582–98.
- . 2010b. "Changes in the Eccentric Phase Contribute to Improved Stretch-Shorten Cycle Performance after Training." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (9): 1731–44.
- . 2011. "Developing Maximal Neuromuscular Power : Part 1 – Biological Basis of Maximal Power Production." *Sports Medicine* 41 (1): 17–38.
- Coyle, E. F. 1999. "Physiological Determinants of Endurance Exercise Performance." *Journal of Science and Medicine in Sport / Sports Medicine Australia* 2 (3): 181–89.
- De Pauw, Kevin, Bart Roelands, Stephen S. Cheung, Bas de Geus, Gerard Rietjens, and Romain Meeusen. 2013. "Guidelines to Classify Subject Groups in Sport-Science Research." *International Journal of Sports Physiology and Performance* 8 (2): 111–22.
- Del Coso, Juan, David Fernández de Velasco, Javier Abián-Vicen, Juan José Salinero, Cristina González-Millán, Francisco Areces, Diana Ruiz, César Gallo, Julio Calleja-González, and Benito Pérez-González. 2013. "Running Pace Decrease during a Marathon Is Positively Related to Blood Markers of Muscle Damage." *PloS One* 8 (2): e57602.
- Del Valle, Alejandro, and Christine K. Thomas. 2005. "Firing Rates of Motor Units during Strong Dynamic Contractions." *Muscle & Nerve* 32 (3): 316–25.
- Denadai, Benedito Sérgio, Rafael Alves de Aguiar, Leonardo Coelho Rabello de Lima, Camila Coelho Greco, and Fabrizio Caputo. 2017. "Explosive Training and Heavy Weight Training Are Effective for Improving Running Economy in Endurance Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Sports Medicine* 47 (3): 545–54.

- Dillon, Piers C. 2017. "The Effect of Eccentric Cycle Training on Physiological and Performance Parameters in Cycling." Edited by Joe McQuillan. University of Waikato.
<https://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/11776/thesis.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Doan, Brandon K., Robert U. Newton, Joseph L. Marsit, N. Travis Triplett-McBride, L. Perry Koziris, Andrew C. Fry, and William J. Kraemer. 2002. "Effects of Increased Eccentric Loading on Bench Press 1RM." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 16 (1): 9–13.
- Douglas, Jamie. 2018. "The Role of Eccentric Muscle Function and Training in Athletic Performance." Edited by Mike McGuigan, Simon Pearson, and Angus Ross. PhD, Auckland University of Technology.
<https://openrepository.aut.ac.nz/handle/10292/11830>.
- Douglas, Jamie, Simon Pearson, Angus Ross, and Mike McGuigan. 2017. "Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review." *Sports Medicine* 47 (5): 917–41.
- Duchateau, Jacques, and Stéphane Baudry. 2014. "Insights into the Neural Control of Eccentric Contractions." *Journal of Applied Physiology* 116 (11): 1418–25.
- Duchateau, Jacques, and Roger M. Enoka. 2016. "Neural Control of Lengthening Contractions." *The Journal of Experimental Biology* 219 (Pt 2): 197–204.
- Duclay, Julien, Alain Martin, Alice Duclay, Gilles Cometti, and Michel Pousson. 2009. "Behavior of Fascicles and the Myotendinous Junction of Human Medial Gastrocnemius Following Eccentric Strength Training." *Muscle & Nerve* 39 (6): 819–27.
- Dufour, Stéphane Pascal, Stéphane Doutreleau, Evelyne Lonsdorfer-Wolf, Eliane Lampert, Christine Hirth, François Piquard, Jean Lonsdorfer, Bernard Geny, Bertrand Mettauer, and Ruddy Richard. 2007. "Deciphering the Metabolic and Mechanical Contributions to the Exercise-Induced Circulatory Response: Insights from Eccentric Cycling." *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 292 (4): R1641-8.
- Dufour, Stéphane Pascal, Eliane Lampert, Stéphane Doutreleau, Evelyne Lonsdorfer-Wolf, Veronique L. Billat, François Piquard, and Ruddy Richard. 2004. "Eccentric Cycle

- Exercise: Training Application of Specific Circulatory Adjustments." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36 (11): 1900–1906.
- Edman, K. A., G. Elzinga, and M. I. Noble. 1982. "Residual Force Enhancement after Stretch of Contracting Frog Single Muscle Fibers." *The Journal of General Physiology* 80 (5): 769–84.
- Eidsheim, Hedda Øyeflaten, and Bent R. Rønnestad. 2016. "Effects of Eccentric Cycling and Endurance Training versus Low Cadence Cycling and Endurance Training on Muscle Strength and Cycling Performance in Trained Individuals." European Master in Health and Physical Activity, University of Lillehammer.
- Eliasson, Jörgen, Thibault Elfegoun, Johnny Nilsson, Rickard Köhnke, Björn Ekblom, and Eva Blomstrand. 2006. "Maximal Lengthening Contractions Increase P70 S6 Kinase Phosphorylation in Human Skeletal Muscle in the Absence of Nutritional Supply." *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism* 291 (6): E1197-205.
- Elmer, S., S. Hahn, P. McAllister, C. Leong, and J. Martin. 2012. "Improvements in Multi-Joint Leg Function Following Chronic Eccentric Exercise." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 22 (5): 653–61.
- Elmer, Steven J., Matthew L. Madigan, Paul C. LaStayo, and James C. Martin. 2010. "Joint-Specific Power Absorption during Eccentric Cycling." *Clinical Biomechanics* 25 (2): 154–58.
- Elmer, Steven J., and James C. Martin. 2010. "Joint-Specific Power Loss after Eccentric Exercise." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (9): 1723–30.
- Fang, Y., V. Siemionow, V. Sahgal, F. Xiong, and G. H. Yue. 2001. "Greater Movement-Related Cortical Potential during Human Eccentric versus Concentric Muscle Contractions." *Journal of Neurophysiology* 86 (4): 1764–72.
- Faude, Oliver, Wilfried Kindermann, and Tim Meyer. 2009. "Lactate Threshold Concepts." *Sports Medicine* 39 (6): 469–90.
- Fernandez-Gonzalo, Rodrigo, Tommy R. Lundberg, Lucia Alvarez-Alvarez, and José A. de Paz. 2014. "Muscle Damage Responses and Adaptations to Eccentric-Overload Resistance Exercise in Men and Women." *European Journal of Applied Physiology* 114 (5): 1075–84.

- Franchi, M. V., P. J. Atherton, N. D. Reeves, M. Flück, J. Williams, W. K. Mitchell, A. Selby, R. M. Beltran Valls, and M. V. Narici. 2014. "Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle." *Acta Physiologica* 210 (3): 642–54.
- Franchi, Martino V., Neil D. Reeves, and Marco V. Narici. 2017. "Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations." *Frontiers in Physiology* 8 (July): 447.
- Gerber, J. Parry, Robin L. Marcus, Leland E. Dibble, Patrick E. Greis, Robert T. Burks, and Paul C. LaStayo. 2007. "Effects of Early Progressive Eccentric Exercise on Muscle Structure after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 89 (3): 559–70.
- Grabner, M. D., and T. M. Owings. 2002. "EMG Differences between Concentric and Eccentric Maximum Voluntary Contractions Are Evident Prior to Movement Onset." *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 145 (4): 505–11.
- Green, David. 2018. "The Neuromuscular Responses to Eccentric Cycling and the Implications for Athletic Development." Doctoral, Northumbria University.
<http://nrl.northumbria.ac.uk/39771/>.
- Green, David James, Kevin Thomas, Emma Ross, Jamie Pringle, and Glyn Howatson. 2017. "Familiarisation to Maximal Recumbent Eccentric Cycling." *Isokinetics and Exercise Science* 25 (1): 17–24.
- Gross, M., F. Lüthy, J. Kroell, E. Müller, H. Hoppeler, and M. Vogt. 2010. "Effects of Eccentric Cycle Ergometry in Alpine Skiers." *International Journal of Sports Medicine* 31 (8): 572–76.
- Haff, G. Gregory, and Sophia Nimphius. 2012. "Training Principles for Power." *Strength & Conditioning Journal* 34 (6): 2.
- Häkkinen, K., P. V. Komi, M. Alén, and H. Kauhanen. 1987. "EMG, Muscle Fibre and Force Production Characteristics during a 1 Year Training Period in Elite Weight-Lifters." *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 56 (4): 419–27.

- Halson, Shona L. 2014. "Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes." *Sports Medicine* 44 Suppl 2 (November): S139-47.
- Helgerud, Jan, Kjetill Høydal, Eivind Wang, Trine Karlsen, Pål Berg, Marius Bjerkaas, Thomas Simonsen, et al. 2007. "Aerobic High-Intensity Intervals Improve V'O₂max More Than Moderate Training." *Medicine & Science in Sports & Exercise* 39 (4): 665.
- Herzog, W., and T. R. Leonard. 2002. "Force Enhancement Following Stretching of Skeletal Muscle: A New Mechanism." *The Journal of Experimental Biology* 205 (Pt 9): 1275–83.
- Herzog, W., G. Schappacher, M. DuVall, T. R. Leonard, and J. A. Herzog. 2016. "Residual Force Enhancement Following Eccentric Contractions: A New Mechanism Involving Titin." *Physiology* 31 (4): 300–312.
- Herzog, Walter. 2014. "The Role of Titin in Eccentric Muscle Contraction." *The Journal of Experimental Biology* 217 (Pt 16): 2825–33.
- Hessel, Anthony L., Stan L. Lindstedt, and Kiisa C. Nishikawa. 2017. "Physiological Mechanisms of Eccentric Contraction and Its Applications: A Role for the Giant Titin Protein." *Frontiers in Physiology* 8 (February): 70.
- Hollander, Daniel B., Robert R. Kraemer, Marcus W. Kilpatrick, Zaid G. Ramadan, Greg V. Reeves, Michelle Francois, Edward P. Hebert, and James L. Tryniecki. 2007. "Maximal Eccentric and Concentric Strength Discrepancies between Young Men and Women for Dynamic Resistance Exercise." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 21 (1): 34–40.
- Hoppeler, Hans. 2016. "Moderate Load Eccentric Exercise; A Distinct Novel Training Modality." *Frontiers in Physiology* 7 (November): 483.
- Horowitz, J. F., L. S. Sidossis, and E. F. Coyle. 1994. "High Efficiency of Type I Muscle Fibers Improves Performance." *International Journal of Sports Medicine* 15 (3): 152–57.
- Isner-Horobeti, Marie-Eve, Stéphane Pascal Dufour, Philippe Vautravers, Bernard Geny, Emmanuel Coudeyre, and Ruddy Richard. 2013. "Eccentric Exercise Training: Modalities, Applications and Perspectives." *Sports Medicine* 43 (6): 483–512.
- Jones, Andrew M., Mark Burnley, Matthew I. Black, David C. Poole, and Anni Vanhatalo. 2019. "The Maximal Metabolic Steady State: Redefining the 'Gold Standard.'" *Physiological*

- Reports* 7 (10): e14098.
- Joyner, Michael J., and Edward F. Coyle. 2008. "Endurance Exercise Performance: The Physiology of Champions." *The Journal of Physiology* 586 (1): 35–44.
- Komi, P. V. 1973. "Measurement of the Force-Velocity Relationship in Human Muscle under Concentric and Eccentric Contractions." *Medecine and Sport* 8 (Biomechanics III): 224–29.
- Komi, P. V., V. Linnamo, P. Silventoinen, and M. Sillanpää. 2000. "Force and EMG Power Spectrum during Eccentric and Concentric Actions." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32 (10): 1757–62.
- Król, Henryk, and Władysław Mynarski. 2012. "A Comparison of Mechanical Parameters between the Counter Movement Jump and Drop Jump in Biathletes." *Journal of Human Kinetics* 34 (October): 59–68.
- Krzysztofik, Michal, Michal Wilk, Grzegorz Wojdała, and Artur Gołaś. 2019. "Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (24). <https://doi.org/10.3390/ijerph16244897>.
- Laroche, Davy, Charles Jousain, Claire Espagnac, Claire Morisset, Nicolas Tordi, Vincent Gremeaux, and Jean-Marie Casillas. 2013. "Is It Possible to Individualize Intensity of Eccentric Cycling Exercise from Perceived Exertion on Concentric Test?" *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 94 (8): 1621-1627.e1.
- LaStayo, P. C., D. J. Pierotti, J. Pifer, H. Hoppeler, and S. L. Lindstedt. 2000. "Eccentric Ergometry: Increases in Locomotor Muscle Size and Strength at Low Training Intensities." *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 278 (5): R1282-8.
- Lastayo, P. C., T. E. Reich, M. Urquhart, H. Hoppeler, and S. L. Lindstedt. 1999. "Chronic Eccentric Exercise: Improvements in Muscle Strength Can Occur with Little Demand for Oxygen." *The American Journal of Physiology* 276 (2): R611-5.
- LaStayo, Paul C., Gordon A. Ewy, David D. Pierotti, Richard K. Johns, and Stan Lindstedt. 2003. "The Positive Effects of Negative Work: Increased Muscle Strength and Decreased Fall

- Risk in a Frail Elderly Population." *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences* 58 (5): M419-24.
- Laursen, P. B., and E. C. Rhodes. 2001. "Factors Affecting Performance in an Ultraendurance Triathlon." *Sports Medicine* 31 (3): 195–209.
- Laursen, Paul, and Martin Buchheit. 2019. *Science and Application of High-Intensity Interval Training: Solutions to the Programming Puzzle*. Human Kinetics.
- Lechauve, J. B., H. Perrault, B. Aguilaniu, M. E. Isner-Horobeti, V. Martin, E. Coudeyre, and R. Richard. 2014. "Breathing Patterns during Eccentric Exercise." *Respiratory Physiology & Neurobiology* 202 (October): 53–58.
- Lee, Hae-Dong, and Walter Herzog. 2002. "Force Enhancement Following Muscle Stretch of Electrically Stimulated and Voluntarily Activated Human Adductor Pollicis." *The Journal of Physiology* 545 (1): 321–30.
- Leong, C. H., W. J. McDermott, S. J. Elmer, and J. C. Martin. 2014. "Chronic Eccentric Cycling Improves Quadriceps Muscle Structure and Maximum Cycling Power." *International Journal of Sports Medicine* 35 (7): 559–65.
- Lindstedt, S. L., P. C. LaStayo, and T. E. Reich. 2001. "When Active Muscles Lengthen: Properties and Consequences of Eccentric Contractions." *News in Physiological Sciences: An International Journal of Physiology Produced Jointly by the International Union of Physiological Sciences and the American Physiological Society* 16 (December): 256–61.
- Lindstedt, Stan L., Trude E. Reich, Paul Keim, and Paul C. LaStayo. 2002. "Do Muscles Function as Adaptable Locomotor Springs?" *The Journal of Experimental Biology* 205 (Pt 15): 2211–16.
- Lipski, Marcin. 2018. "High-Intensity Interval Eccentric Cycling: Acute and Chronic Effects." Edith Cowan University. <http://ro.ecu.edu.au/theses/2104/>.
- Lipski, Marcin, Chris R. Abbiss, and Kazunori Nosaka. 2018a. "Cardio-Pulmonary Responses to Incremental Eccentric and Concentric Cycling Tests to Task Failure." *European Journal of Applied Physiology* 118 (February): 947–57.
- . 2018b. "Oxygen Consumption, Rate of Perceived Exertion and Enjoyment in High-Intensity Interval Eccentric Cycling." *European Journal of Sport Science: EJSS: Official*

- Journal of the European College of Sport Science* 18 (10): 1390–97.
- Lucia, Alejandro, Jesús Oliván, Jerónimo Bravo, Marta Gonzalez-Freire, and Carl Foster. 2008. "The Key to Top-Level Endurance Running Performance: A Unique Example." *British Journal of Sports Medicine* 42 (3): 172–74; discussion 174.
- MacInnis, Martin J., and Martin J. Gibala. 2017. "Physiological Adaptations to Interval Training and the Role of Exercise Intensity." *The Journal of Physiology* 595 (9): 2915–30.
- Malliaras, Peter, Beenish Kamal, Alastair Nowell, Theo Farley, Hardev Dhamu, Victoria Simpson, Dylan Morrissey, Henning Langberg, Nicola Maffulli, and Neil D. Reeves. 2013. "Patellar Tendon Adaptation in Relation to Load-Intensity and Contraction Type." *Journal of Biomechanics* 46 (11): 1893–99.
- Maroto-Izquierdo, Sergio, Rodrigo Fernandez-Gonzalo, Hashish R. Magdi, Saul Manzano-Rodriguez, Javier González-Gallego, and José A. De Paz. 2019. "Comparison of the Musculoskeletal Effects of Different Iso-Inertial Resistance Training Modalities: Flywheel vs. Electric-Motor." *European Journal of Sport Science: EJSS: Official Journal of the European College of Sport Science* 19 (9): 1184–94.
- Maroto-Izquierdo, Sergio, David García-López, Rodrigo Fernandez-Gonzalo, Osvaldo C. Moreira, Javier González-Gallego, and José A. de Paz. 2017. "Skeletal Muscle Functional and Structural Adaptations after Eccentric Overload Flywheel Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Journal of Science and Medicine in Sport / Sports Medicine Australia* 20 (10): 943–51.
- Maroto-Izquierdo, Sergio, David García-López, and José A. de Paz. 2017. "Functional and Muscle-Size Effects of Flywheel Resistance Training with Eccentric-Overload in Professional Handball Players." *Journal of Human Kinetics* 60 (December): 133–43.
- Mavropalias, Georgios, Tomoko Koeda, Oliver R. Barley, Wayne C. K. Poon, Aiden J. Fisher, Anthony J. Blazevich, and Kazunori Nosaka. 2020. "Comparison between High- and Low-Intensity Eccentric Cycling of Equal Mechanical Work for Muscle Damage and the Repeated Bout Effect." *European Journal of Applied Physiology*, March.
<https://doi.org/10.1007/s00421-020-04341-5>.
- McHugh, Malachy P. 2003. "Recent Advances in the Understanding of the Repeated Bout Effect:

- The Protective Effect against Muscle Damage from a Single Bout of Eccentric Exercise.” *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 13 (2): 88–97.
- McKay, Alannah K. A., Trent Stellingwerff, Ella S. Smith, David T. Martin, Iñigo Mujika, Vicky L. Goosey-Tolfrey, Jeremy Sheppard, and Louise M. Burke. 2022. “Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework.” *International Journal of Sports Physiology and Performance*, December, 1–15.
- McNeill, Conor, C. Martyn Beaven, Daniel T. McMaster, and Nicholas Gill. 2019. “Eccentric Training Interventions and Team Sport Athletes.” *Journal of Functional Morphology and Kinesiology* 4 (4). <https://doi.org/10.3390/jfmk4040067>.
- Mike, Jonathan N., Nathan Cole, Chris Herrera, Trisha VanDusseldorp, Len Kravitz, and Chad M. Kerksick. 2017. “The Effects of Eccentric Contraction Duration on Muscle Strength, Power Production, Vertical Jump, and Soreness.” *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 31 (3): 773–86.
- Miller, Michael G., Jeremy J. Herniman, Mark D. Ricard, Christopher C. Cheatham, and Timothy J. Michael. 2006. “The Effects of a 6-Week Plyometric Training Program on Agility.” *Journal of Sports Science & Medicine* 5 (3): 459–65.
- Mueller, Matthias, Fabio Andreas Breil, Michael Vogt, Roger Steiner, Kurt Lippuner, Albrecht Popp, Stephan Klossner, Hans Hoppeler, and Christoph Däpp. 2009. “Different Response to Eccentric and Concentric Training in Older Men and Women.” *European Journal of Applied Physiology* 107 (2): 145–53.
- Mujika, Iñigo, Bent R. Rønnestad, and David T. Martin. n.d. “Effects of Increased Muscle Strength and Muscle Mass on Endurance Cycling Performance.” <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2015-0405>.
- Naczk, Mariusz, Alicja Naczk, Wioletta Brzenczek-Owczarzak, Jarosław Arlet, and Zdzisław Adach. 2016. “Impact of Inertial Training on Strength and Power Performance in Young Active Men.” *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 30 (8): 2107–13.
- Nixon, Rebekah J., Sascha H. Kranen, Anni Vanhatalo, and Andrew M. Jones. 2021. “Steady-State above MLSS: Evidence That Critical Speed Better Represents Maximal Metabolic

- Steady State in Well-Trained Runners." *European Journal of Applied Physiology* 121 (11): 3133–44.
- Norrbrand, Lena, James D. Fluckey, Marco Pozzo, and Per A. Tesch. 2008. "Resistance Training Using Eccentric Overload Induces Early Adaptations in Skeletal Muscle Size." *European Journal of Applied Physiology* 102 (3): 271–81.
- Ojasto, Timo, and Keijo Häkkinen. 2009. "Effects of Different Accentuated Eccentric Load Levels in Eccentric-Concentric Actions on Acute Neuromuscular, Maximal Force, and Power Responses." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 23 (3): 996–1004.
- Paavolainen, L., K. Häkkinen, I. Hämmäläinen, A. Nummela, and H. Rusko. 1999. "Explosive-Strength Training Improves 5-Km Running Time by Improving Running Economy and Muscle Power." *Journal of Applied Physiology* 86 (5): 1527–33.
- Paddon-Jones, D., M. Leveritt, A. Lonergan, and P. Abernethy. 2001. "Adaptation to Chronic Eccentric Exercise in Humans: The Influence of Contraction Velocity." *European Journal of Applied Physiology* 85 (5): 466–71.
- Page, Phil. 2012. "Research Designs in Sports Physical Therapy." *International Journal of Sports Physical Therapy* 7 (5): 482–92.
- Papadopoulos, Christos, Konstantinos Theodosiou, Gregory C. Bogdanis, Evangelia Gkantiraga, Ioannis Gissis, Michalis Sambanis, Athanasios Souglis, and Aristomenis Sotiropoulos. 2014. "Multiarticular Isokinetic High-Load Eccentric Training Induces Large Increases in Eccentric and Concentric Strength and Jumping Performance." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 28 (9): 2680–88.
- Paulsen, Gøran, Hedda Ø. Eidsheim, Christian Helland, Olivier Seynnes, Paul A. Solberg, and Bent R. Rønnestad. 2019. "Eccentric Cycling Does Not Improve Cycling Performance in Amateur Cyclists." *PloS One* 14 (1): e0208452.
- Peñailillo, Luis, Anthony J. Blazevich, and Kazunori Nosaka. 2015. "Muscle Fascicle Behavior during Eccentric Cycling and Its Relation to Muscle Soreness." *Medicine and Science in Sports and Exercise* 47 (4): 708–17.
- . 2017. "Factors Contributing to Lower Metabolic Demand of Eccentric Compared with

- Concentric Cycling." *Journal of Applied Physiology* 123 (4): 884–93.
- Pensini, M., N. A. Maffiuletti, and A. Martin. 2002. "Central Versus Peripheral Adaptations Following." *International Journal of Sports Medicine* 23: 567–74.
- Perrey, S., A. Betik, R. Candau, J. D. Rouillon, and R. L. Hughson. 2001. "Comparison of Oxygen Uptake Kinetics during Concentric and Eccentric Cycle Exercise." *Journal of Applied Physiology* 91 (5): 2135–42.
- Peters, Micah D. J., Christina M. Godfrey, Hanan Khalil, Patricia McInerney, Deborah Parker, and Cassia Baldini Soares. 2015. "Guidance for Conducting Systematic Scoping Reviews." *International Journal of Evidence-Based Healthcare* 13 (3): 141–46.
- Peters, Micah D. J., Casey Marnie, Andrea C. Tricco, Danielle Pollock, Zachary Munn, Lyndsay Alexander, Patricia McInerney, Christina M. Godfrey, and Hanan Khalil. 2021. "Updated Methodological Guidance for the Conduct of Scoping Reviews." *JBI Evidence Implementation* 19 (1): 3–10.
- Poole, David C., and Andrew M. Jones. 2012. "Oxygen Uptake Kinetics." *Comprehensive Physiology* 2 (2): 933–96.
- . 2017. "Measurement of the Maximum Oxygen Uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ Is No Longer Acceptable." *Journal of Applied Physiology* 122 (4): 997–1002.
- Poole, David C., Harry B. Rossiter, George A. Brooks, and L. Bruce Gladden. 2020. "The Anaerobic Threshold: 50+ Years of Controversy." *The Journal of Physiology*, October. <https://doi.org/10.1113/JP279963>.
- Ramírez-Campillo, Rodrigo, David C. Andrade, and Mikel Izquierdo. 2013. "Effects of Plyometric Training Volume and Training Surface on Explosive Strength." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 27 (10): 2714–22.
- Ramirez-Campillo, Rodrigo, Paulo Gentil, Yassine Negra, Jozo Grgic, and Olivier Girard. 2021. "Effects of Plyometric Jump Training on Repeated Sprint Ability in Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Sports Medicine* 51 (10): 2165–79.
- Raya-González, Javier, Amaya Prat-Luri, Alejandro López-Valenciano, Rafael Sabido, and Jose Luis Hernández-Davó. 2021. "Effects of Flywheel Resistance Training on Sport Actions. A Systematic Review and Meta-Analysis." *Journal of Human Kinetics* 77 (January): 191–

204.

- Roig, M., K. O'Brien, G. Kirk, R. Murray, P. McKinnon, B. Shadgan, and W. D. Reid. 2009. "The Effects of Eccentric versus Concentric Resistance Training on Muscle Strength and Mass in Healthy Adults: A Systematic Review with Meta-Analysis." *British Journal of Sports Medicine* 43 (8): 556–68.
- Roig Pull, Marc, and Craig Ranson. 2007. "Eccentric Muscle Actions: Implications for Injury Prevention and Rehabilitation." *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 8 (2): 88–97.
- Rønnestad, B. R., and I. Mujika. 2014. "Optimizing Strength Training for Running and Cycling Endurance Performance: A Review." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 24 (4): 603–12.
- Rooyackers, J. M., D. A. Berkeljon, and H. T. M. Folgering. 2003. "Eccentric Exercise Training in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease." *International Journal of Rehabilitation Research. Internationale Zeitschrift Fur Rehabilitationsforschung. Revue Internationale de Recherches de Readaptation* 26 (1): 47–49.
- Sáez de Villarreal-Sáez, Eduardo, Eleftherios Kellis, William J. Kraemer, and Mikel Izquierdo. 2009. "Determining Variables of Plyometric Training for Improving Vertical Jump Height Performance: A Meta-Analysis." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 23 (2): 495–506.
- Sáez de Villarreal-Sáez, Eduardo, Bernardo Requena, and John B. Cronin. 2012. "The Effects of Plyometric Training on Sprint Performance: A Meta-Analysis." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 26 (2): 575–84.
- Sarkar, Surojit, Suvam Dasgupta, K. Kosana Meitei, Snehunsu Adhikari, Amit Bandyopadhyay, and Swapan Kumar Dey. 2020. "Effect of Eccentric Cycling and Plyometric Training on Physiological and Performance Related Parameters of Trained Junior Track Cyclists." *Polish Journal of Sport and Tourism* 27 (1): 14–20.
- Saunders, Philo U., David B. Pyne, Richard D. Telford, and John A. Hawley. 2004. "Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners." *Sports Medicine* 34 (7): 465–85.

- Schantz, Peter G. 1986. "Plasticity of Human Skeletal Muscle with Special Reference to Effects of Physical Training on Enzyme Levels of the NADH Shuttles and Phenotypic Expression of Slow and Fast Myofibrillar Proteins." *Acta Physiologica Scandinavica* 128 (558): 1–62.
- Schoenfeld, Brad. 2020. *Science and Development of Muscle Hypertrophy*. Human Kinetics.
- Schoenfeld, Brad J., Dan I. Ogborn, and James W. Krieger. 2015. "Effect of Repetition Duration during Resistance Training on Muscle Hypertrophy: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Sports Medicine* 45 (4): 577–85.
- Schoenfeld, Brad J., Dan I. Ogborn, Andrew D. Vigotsky, Martino V. Franchi, and James W. Krieger. 2017. "Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review Meta-Analysis." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 31 (9): 2599–2608.
- Seiler, Stephen. 2010. "What Is Best Practice for Training Intensity and Duration Distribution in Endurance Athletes?" *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5 (3): 276–91.
- Seiler, Stephen, K. Jørganson, B. V. Olesen, and K. J. Hetlelid. 2013. "Adaptations to Aerobic Interval Training: Interactive Effects of Exercise Intensity and Total Work Duration." *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 23 (1): 74–83.
- Seynnes, O. R., M. de Boer, and M. V. Narici. 2007. "Early Skeletal Muscle Hypertrophy and Architectural Changes in Response to High-Intensity Resistance Training." *Journal of Applied Physiology* 102 (1): 368–73.
- Shibata, Keisuke, Kazuki Takizawa, Kazunori Nosaka, and Masao Mizuno. 2021. "Effects of Prolonging Eccentric Phase Duration in Parallel Back-Squat Training to Momentary Failure on Muscle Cross-Sectional Area, Squat One Repetition Maximum, and Performance Tests in University Soccer Players." *Journal of Strength & Conditioning Research* 35 (3): 668–74.
- Sole, Silvia, Rodrigo Ramírez-Campillo, David C. Andrade, and Javier Sanchez-Sanchez. 2021. "Plyometric Jump Training Effects on the Physical Fitness of Individual-Sport Athletes: A Systematic Review with Meta-Analysis." *PeerJ* 9 (March): e11004.
- Suchomel, Timothy J., Sophia Nimphius, and Michael H. Stone. 2016. "The Importance of

- Muscular Strength in Athletic Performance." *Sports Medicine* 46 (10): 1419–49.
- Suchomel, Timothy J., John P. Wagle, Jamie Douglas, Christopher B. Taber, Mellissa Harden, G. Gregory Haff, and Michael H. Stone. 2019. "Implementing Eccentric Resistance Training—Part 1: A Brief Review of Existing Methods." *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
<https://doi.org/10.3390/jfmk4020038>.
- Taube, Wolfgang, Christian Leukel, and Albert Gollhofer. 2012. "How Neurons Make Us Jump: The Neural Control of Stretch-Shortening Cycle Movements." *Exercise and Sport Sciences Reviews* 40 (2): 106–15.
- Tesch, P. A., A. Ekberg, D. M. Lindquist, and J. T. Trieschmann. 2004. "Muscle Hypertrophy Following 5-Week Resistance Training Using a Non-Gravity-Dependent Exercise System." *Acta Physiologica Scandinavica* 180 (1): 89–98.
- Thorpe, Robin, and Caroline Sunderland. 2012. "Muscle Damage, Endocrine, and Immune Marker Response to a Soccer Match." *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 26 (10): 2783–90.
- Touron, Julianne, Frédéric Costes, Emmanuel Coudeyre, Hélène Perrault, and Ruddy Richard. 2020. "Aerobic Metabolic Adaptations in Endurance Eccentric Exercise and Training: From Whole Body to Mitochondria." *Frontiers in Physiology* 11: 596351.
- Tricco, Andrea C., Erin Lillie, Wasifa Zarin, Kelly K. O'Brien, Heather Colquhoun, Danielle Levac, David Moher, et al. 2018. "PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation." *Annals of Internal Medicine* 169 (7): 467–73.
- Verkhoshansky, Yuri, and Mel Siff. 2009. *Supertraining*. Verkhoshansky SSTM.
- Vikmoen, Olav, Truls Raastad, Olivier Seynnes, Kristoffer Bergstr  m, Stian Ellefsen, and Bent R. Rønnestad. 2016. "Effects of Heavy Strength Training on Running Performance and Determinants of Running Performance in Female Endurance Athletes." *PloS One* 11 (3): e0150799.
- Vogt, Michael, and Hans H. Hoppeler. 2012. "Competitive Alpine Skiing: Combining Strength and Endurance Training. Molecular Bases and Applications." In *Science and Skiing V*, edited by Mueller E, Lindinger S, Stoeggl T. Meyer. Meyer & Meyer.

- . 2014. “Eccentric Exercise: Mechanisms and Effects When Used as Training Regime or Training Adjunct.” *Journal of Applied Physiology* 116 (11): 1446–54.
- Wagle, John P., Christopher B. Taber, Aaron J. Cunanan, Garrett E. Bingham, Kevin M. Carroll, Brad H. DeWeese, Kimitake Sato, and Michael H. Stone. 2017. “Accentuated Eccentric Loading for Training and Performance: A Review.” *Sports Medicine*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0755-6>.
- Wagner, P. D. 1996. “Determinants of Maximal Oxygen Transport and Utilization.” *Annual Review of Physiology* 58: 21–50.
- Walker, Simon, Anthony J. Blazevich, G. Gregory Haff, James J. Tufano, Robert U. Newton, and Keijo Häkkinen. 2016. “Greater Strength Gains after Training with Accentuated Eccentric than Traditional Isoinertial Loads in Already Strength-Trained Men.” *Frontiers in Physiology* 7 (April): 149.
- Walsh, Joel A., Paul J. Stapley, Jonathan Shemmell, and Darryl J. McAndrew. 2021. “Reliability of a Protocol to Elicit Peak Measures Generated by the Lower Limb for Semi-Recumbent Eccentric Cycling.” *Frontiers in Sports and Active Living* 3 (May): 653699.
- Wen, Daizong, Till Utesch, Jun Wu, Samuel Robertson, John Liu, Guopeng Hu, and Haichun Chen. 2019. “Effects of Different Protocols of High Intensity Interval Training for VO₂max Improvements in Adults: A Meta-Analysis of Randomised Controlled Trials.” *Journal of Science and Medicine in Sport / Sports Medicine Australia* 22 (8): 941–47.
- Wetmore, Alexander B., Paul A. Moquin, Kevin M. Carroll, Andrew C. Fry, W. Guy Hornsby, and Michael H. Stone. 2020. “The Effect of Training Status on Adaptations to 11 Weeks of Block Periodization Training.” *Sports (Basel, Switzerland)* 8 (11). <https://doi.org/10.3390/sports8110145>.
- Wilk, Michal, Artur Golas, Petr Stastny, Monika Nawrocka, Michal Krzysztofik, and Adam Zajac. 2018. “Does Tempo of Resistance Exercise Impact Training Volume?” *Journal of Human Kinetics* 62 (June): 241–50.
- Williams, Tyler D., Danilo V. Toluoso, Michael V. Fedewa, and Michael R. Esco. 2017. “Comparison of Periodized and Non-Periodized Resistance Training on Maximal Strength: A Meta-Analysis.” *Sports Medicine* 47 (10): 2083–2100.

Zwaard, Stephan van der, Franck Brocherie, and Richard T. Jaspers. 2021. "Under the Hood: Skeletal Muscle Determinants of Endurance Performance." *Frontiers in Sports and Active Living* 3 (August): 719434.

ANNEXES

ANNEXE 1 - Ovid MEDLINE(R) ALL

Search Strategy:

| # | Searches |
|---|--|
| 1 | ((eccentric or back or backward or negative or passive or retro or reverse) adj4 (cycling or cycle or bicycling or bicycle or pedaling or pedalling or ergometer or ergometry)).ab,kf,ti. |
| 2 | ("energy cost" or "caloric cost" or "metabolic cost" or "energetic cost" or "mechanical efficiency" or "mechanical economy" or "oxygen consumption" or "oxygen cost" or "oxygen uptake" or "oxygen intake" or "VO2 max" or "peak VO2" or "peak power" or "power output" or "aerobic power" or "aerobic capacity" or "aerobic endurance" or "aerobic fitness" or "endurance performance" or "cardiovascular performance" or "cardiovascular stamina cardiovascular fitness" or "cardiorespiratory endurance" or "cardiorespiratory fitness" or "physical endurance" or "exercise tolerance" or "exercise capacity" or "functional capacity" or "lactate threshold" or "anaerobic capacity" or "anaerobic threshold" or "anaerobic power" or "ventilatory threshold" or "neuromuscular characteristics" or "neuromuscular efficiency" or "running performance" or "running economy" or "running time" or "running speed" or "energy cost of running" or "running efficiency" or "running endurance" or "cycling endurance" or "cycling economy" or "cycling performance" or "time trial performance" or speed or velocity).ab,kf,ti. |
| 3 | Physical endurance/ or anaerobic threshold/ or exercise tolerance/ |
| 4 | Oxygen Consumption/ |
| 5 | Cardiorespiratory Fitness/ |
| 6 | Exercise Test/ |
| 7 | Athletic Performance/ |
| 8 | 2 or 3 or 4 or 5 or 6 or 7 |
| 9 | 1 and 8 |

ANNEXE 2 - Scoping review - Protocol Registration (OSF)

STUDY INFORMATION

Review title:

Chronic adaptations from eccentric cycling on performance in continuous and intermittent sports: a scoping review

Review authors:

Villeneuve, Marc-Étienne ; Arvisais, Denis ; Tremblay, Jonathan

Review objective:

The aim of this scoping review is to summarise the current scientific evidence on chronic adaptations to eccentric cycling and their potential impact on endurance performance determinants. We are interested more specifically in recreational or competitive endurance athletes. The review will therefore consider the different populations that have been studied, the various methods used and finally identify existing gaps of knowledge in the literature in order to better target future research projects.

DESIGN PLAN

Study type:

Scoping Review

Blinding:

No blinding is involved in this study.

SAMPLING PLAN

Existing data:

Registration prior to accessing the data: As of the date of submission, the data exist, but have not been accessed by you or your collaborators. Commonly, this includes data that has been collected by another researcher or institution

Search strategy:

The following databases will be searched:

1. Medline
2. Embase
3. Web of Science
4. SPORTDiscus

The research equations will be adapted to each database using the terms in our queries:

"eccentric", "eccentrically", "negative work", "cycling", "bicycle", "pedaling", "pedalling", "ergometer", "ergometry", "endurance performance", "cycling endurance", "running endurance" and "eccentric strength training".

Selection criteria:

Studies will be included if:

1. They are peer-reviewed
2. Subjects are teenagers or adults, of all ages, healthy, and endurance trained
3. They investigated acute physiological and perceptual responses (e.g., heart rate, oxygen uptake, muscle activation, RPE) to eccentric cycling bouts lasting at least 2 minutes
4. They investigated the chronic adaptations to eccentric cycling training protocols (length of study is 4 weeks minimum) on maximal exercise capacity, exercise tolerance, body composition, muscle architecture, and neuromuscular function parameters.
5. They measured the variables mentioned in points 3 & 4 pre- and post-intervention.

Studies will be excluded if the study:

1. does not have a concentric cycling bout/training group as a control
2. investigated acute or chronic physiological responses to eccentric cycling performed unilaterally or with the upper limbs.
3. Involved untrained participants
4. Involved participants with metabolic conditions

Outcome measures:

The main outcome of this review is the impact of chronic adaptations to eccentric cycling on running and cycling performance determinants. Chronic adaptations to eccentric cycling are assessed by direct measurement of oxygen consumption, aerobic power, EMG signals, cycling/running efficiency, maximal isometric strength, maximal jumping power, maximal cycling power or maximal running speed. Comparisons between the measurements pre and post intervention can demonstrate the impact of chronic adaptations to eccentric cycling on running and cycling endurance performance.

Data extraction:

Study titles and abstracts will be independently screened by two reviewers (Marc-Etienne Villeneuve, Jonathan Tremblay). The reviewers will be blinded to the author names and their affiliation. After initial screening, full texts will be independently screened to examine further eligibility by the two same reviewers. The articles selected for eligibility will then be discussed with a third reviewer (Denis Arvisais).

Data extraction will then be carried out independently by two reviewers (Marc-Etienne Villeneuve, Jonathan Tremblay). After completing the data extraction, both reviewers will compare their results. The possible differences observed will be resolved by discussion between the two reviewers and if necessary, by involving a third reviewer (Denis Arvisais).

Extracted information will include:

first author and year of publication, population characteristics, length of study, frequency of training sessions, progression type, length of training protocol, type of measurement device, interval bouts intensity and main results.

Keywords:

Eccentric training, eccentric cycling, endurance, chronic adaptations