



HAL
open science

Timing d'application de la surcharge excentrique lors d'un exercice de squat à la flywheel

Audrenn Legendre

► **To cite this version:**

Audrenn Legendre. Timing d'application de la surcharge excentrique lors d'un exercice de squat à la flywheel. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. dumas-04272262

HAL Id: dumas-04272262

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04272262v1>

Submitted on 6 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Mémoire : Timing d'application de la surcharge excentrique lors d'un exercice de squat à la flywheel

Université Rennes 2

Année Universitaire 2022-2023

Master 2 : Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive - parcours Monitoring Optimisation, Prévention

Tuteur universitaire : Kerhervé Hugo - Laboratoire M2S

Tuteur professionnel : Naughton Mitch – University of Newcastle

Mémoire de : LEGENDRE Audrenn - 21805624

Remerciement

Je souhaiterais commencer par remercier mon tuteur de stage, Hugo KERHERVE, pour m'avoir orientée vers ce stage basé sur la physiologie et l'entraînement à la flywheel, et m'avoir accompagnée tout au long de ce stage.

Ensuite, je voudrais remercier mon tuteur professionnel, Mitch NAUGHTON, pour m'avoir accueillie au laboratoire de l'université de Newcastle, et m'avoir soutenue durant ce stage.

Enfin, je voudrais remercier « DIGISPORT » d'avoir permis ma venue en Australie pour y effectuer mon stage.

Table des matières

Introduction.....	5
Revue de la littérature	6
<input type="checkbox"/> Introduction.....	6
<input type="checkbox"/> Design et intérêt de la flywheel	7
<input type="checkbox"/> Intérêt dans le renforcement de certaines parties du mouvement	10
<input type="checkbox"/> Les effets sur le système neuromusculaire.....	12
<input type="checkbox"/> Limites des recherches	15
<input type="checkbox"/> Les effets sur l'entraînement.....	16
<input type="checkbox"/> Synthèse	19
Objectifs et problématique	20
Hypothèses envisagées.....	20
Méthodologie générale.....	21
<input type="checkbox"/> Matériels	21
<input type="checkbox"/> Lieu	23
<input type="checkbox"/> Population	23
<input type="checkbox"/> Durée.....	24
<input type="checkbox"/> Mise en place	24
<input type="checkbox"/> Déroulement du test	24
<input type="checkbox"/> Variables observées	25
<input type="checkbox"/> Outils d'analyse	26
<input type="checkbox"/> Protocole d'analyse pour chacune des variables.....	26
<input type="checkbox"/> Analyse statistique	28
<input type="checkbox"/> Erreurs à éviter.....	28
Résultats.....	29
<input type="checkbox"/> Mise en pratique.....	29
<input type="checkbox"/> Comparaison des forces générées lors du test.....	29
- Force maximale produite.....	29
- Puissance maximale produite	31
- Comparaisons des forces entre les phases excentrique et concentrique d'un même mouvement	32
<input type="checkbox"/> Informations sur la charge interne	33

- Saturation du muscle en oxygène.....	33
- RPE.....	34
- FC.....	35
Discussion.....	36
Conclusion.....	42
Synthèse de l’opportunité sportive et de l’opportunité scientifique.....	43
Bibliographie.....	45
Résumé.....	1
Abstract.....	1

Liste des figures

Figure 1 : une machine d'entraînement à volant d'inertie (Flywheel), le YoYoMC Ultimate Squat (modèle #215) avec Hooper's Box (D'après Petré, 2018).....	7
Figure 2 : Représentation des résistances variables entre les répétitions et entre la flywheel et l'entraînement avec poids (D'après https://exxentric.com/flywheel-training/advantages/variable-resistance/).....	9
Figure 3 : Image d'une Kbox (https://exxentric.com/)	21
Figure 4 : Image d'un capteur Trigno Galiléo (https://delsys.com/trigno-galileo/).....	21
Figure 5 : Image d'un capteur Moxy (https://www.moxymonitor.com/)	22
Figure 6 : Image d'un capteur Polar H10 (https://www.polar.com/au-en/sensors/h10-heart-rate-sensor).....	22
Figure 7 : Image de la représentation de l'échelle de Borg (https://www.tripassion.fr/rpe-rating-of-perceived-exertion/).....	23
Figure 8 : Graphique du nombre d'unité motrice en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et en fonction du pic d'activité (B) en condition « sans pause » de P04.....	29
Figure 9 : Graphique du nombre d'unité motrice en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et en fonction du pic d'activité (B) en condition « avec pause » de P04	30
Figure 10 : Graphique du pic d'activité en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et des différences de performance (B) en condition « avec pause » de P02	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau représentant les forces moyennes générées par les sujets en fonction des conditions.....	30
Tableau 2 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux conditions.....	31
Tableau 3 : Tableau représentant les puissances moyennes générées par les sujets en fonction des conditions.....	31
Tableau 4 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux conditions.....	31
Tableau 5 : Tableau représentant les différences de forces moyennes générées par les sujets en fonction des phases dans chacune des conditions	33
Tableau 6 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux phases concentriques et excentrique.....	33
Tableau 7 : Tableau représentant les données SmO2 et THb de P01 en fonction des conditions.....	34
Tableau 8 : Résultats statistiques de la différence de SmO2 (A) et THb (B) entre les deux conditions.....	34
Tableau 9 : Tableau représentant la RPE moyenne générée par les sujets en fonction des conditions.....	34
Tableau 10 : Résultats statistiques de la différence de RPE entre les deux conditions	35
Tableau 11 : Tableau représentant les puissances moyennes générées par les sujets en fonction des conditions	35
Tableau 12 : Résultats statistiques de la différence de HR (A) et RR (B) entre les deux conditions.....	35

Introduction

L'université de Newcastle possède une partie recherche, classée 8e au niveau national pour la recherche par Excellence in Research for Australia (ERA). Trente de ses domaines de recherche ont reçu la note la plus élevée de «bien au-dessus de la norme mondiale» lors de la dernière évaluation de l'ERA. Ici, la recherche stimule l'innovation et les chercheurs sont à la pointe de leur domaine. Ils travaillent avec des partenaires industriels, communautaires et gouvernementaux pour avoir un réel impact. En ce qui concerne les infrastructures, il y a la possibilité d'accéder à un large éventail de technologies et d'installations de recherche spécialement conçues pour favoriser de nouvelles découvertes et innovations. L'objet de recherche sera donc la flywheel, un outil d'entraînement qui parfois fait débat : elle améliore certaines qualités sportives pour les uns, tandis que pour d'autres, elle ne fait rien de plus qu'un entraînement avec des haltères et des poids.

Il est possible de se demander pourquoi les avis divergent à ce sujet et si cela n'est pas dû à l'utilisation de la flywheel plus qu'à la flywheel en elle-même. La phase excentrique joue un rôle important dans l'utilisation de cet outil, et un élément est clé notamment, concernant les adaptations physiologiques à l'entraînement : la surcharge excentrique. L'impact du placement de la surcharge excentrique sur le recrutement des unités motrices et la force exercée va donc être observé dans deux mouvements différents de squat afin de savoir si c'est la manière d'utiliser la flywheel qui la rend plus ou moins efficace. Cette problématique fait le lien entre les processus sportif et scientifique, avec l'analyse des données scientifiques dans le but d'améliorer les performances des athlètes. C'est une problématique de terrain.

Dans ce mémoire, seront retrouvés les recherches et tests effectués au cours de l'année centrée sur un outil : la flywheel. Pour commencer, la littérature scientifique sur le sujet sera abordée, ce qui induira une problématique à laquelle il faudra tenter de répondre. Ensuite, le test mis en place pour cela sera expliqué, les variables étudiées, avant la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations afin de répondre au mieux à la problématique.

Revue de la littérature

- **Introduction**

L'entraînement en résistance est le nom communément donné aux différents types d'exercices réalisés contre une résistance externe dans le but d'augmenter différentes dimensions de la force comme la force maximale, la puissance, l'endurance de force, l'hypertrophie, mais aussi des caractéristiques physiques comme l'équilibre, la flexibilité et la mobilité articulaire (**Kraemer & Ratamess, 2004**). La résistance externe peut provenir de machines, d'haltères, du poids corporel ou de tout autre objet qui provoque la contraction musculaire. L'objectif spécifique de l'entraînement d'une modalité de force se fera en modulant des paramètres de programmation de séance tels que volume, fréquence, intensité, et durée de la période de repos. Les bénéfices associés au développement de la force sur la santé ont été largement démontrés dans la littérature scientifique et dépassent simplement le cadre de la performance sportive, y compris pour des sports d'endurance (**Kraemer et al., 2002**). L'entraînement de la force permet d'améliorer la composition corporelle (**Beato et al., 2019**), le bien-être psychologique (**Kraemer et al., 2002**), et de préserver la capacité fonctionnelle dans la maladie et le vieillissement (**Frontera & Bigard, 2002**).

Une forme d'entraînement en résistance avec des caractéristiques intéressantes a récemment connu un regain d'intérêt : la *flywheel* ou entraînement iso-inertiel. Une flywheel est un dispositif où la résistance est créée par l'inertie d'un volant lesté, qui est accéléré ou décéléré en utilisant l'énergie cinétique transférée par le travail musculaire du sujet (**Petré et al., 2018**). Un intérêt majeur de la flywheel est d'augmenter la part de travail musculaire excentrique dans les exercices complexes (poly-articulaires) de manière contrôlée (**Kraemer et al., 2002**). En effet, contrairement à l'entraînement en résistance traditionnel effectué à l'aide de poids, la flywheel permet d'accentuer la charge à certains moments spécifiques du mouvement comme aux points de faiblesse où le muscle n'opère pas à sa longueur optimale (**Beato & Dello Iacono, 2020**). Cela ne veut pas dire que la surcharge excentrique n'est pas entraînable par l'entraînement traditionnel : elle est obtenue par l'augmentation du temps lors de la phase excentrique (pause, tempo). L'entraînement en flywheel quant à lui permet de créer une surcharge excentrique correspondant au pic de force lors du mouvement, et donc de maximiser les adaptations spécifiques à ce type d'entraînement (**Beato et al., 2020**).

- **Design et intérêt de la flywheel**

L'élément central d'une flywheel est le volant d'inertie. La plupart des équipementiers proposent à la vente des volants ayant des inerties allant de 0.005 kg/m^2 pour les débutants à 0.070 kg/m^2 pour les experts. En effet, plus l'inertie est grande, plus elle va nécessiter de force pour l'accélérer et la décélérer (McErlain-Naylor & Beato, 2021). Le volant d'inertie est mis en mouvement par un câble court enroulé autour de son axe qui s'enroule de nouveau une fois sa longueur maximale atteinte, sur le principe du yo-yo. En utilisant des poulies, le renvoi du câble de la flywheel peut être adapté pour de nombreux mouvements spécifiques aux membres supérieurs comme inférieurs, ainsi que des exercices corps entier. C'est la version spécifique aux membres inférieurs dans un mouvement de squat qui est la plus utilisée et documentée dans les articles scientifiques (Figure 1).



Figure 1 : une machine d'entraînement à volant d'inertie (Flywheel), le YoYoMC Ultimate Squat (modèle #215) avec Hooper's Box (D'après Petré, 2018)

Dans le cas du squat, c'est l'activation musculaire concentrique (vers le haut) qui va transférer l'énergie cinétique à la flywheel (Beato et al., 2021). Lorsque le câble est tiré à sa longueur maximale, la flywheel continue de tourner et enroule à nouveau le câble autour de son axe afin

de le raccourcir : c'est l'action musculaire excentrique (vers le bas) qui va permettre de ralentir la flywheel (**Allen et al., 2021; Petré et al., 2018; Vicens-Bordas et al., 2018**). Il est important de noter que l'inertie du volant est théoriquement illimitée, contrainte uniquement par la capacité de la personne utilisant la flywheel à l'accélérer et donc par la quantité de force transmise au volant par unité de temps. Cet entraînement à résistance variable calibrée par l'utilisateur lui-même convient donc à tous les types d'entraînement en résistance, de la rééducation à la musculation lourde, pour des personnes âgées ou des athlètes d'élite.

L'intensité de l'entraînement à la flywheel n'étant pas fixée par une mesure absolue (comme la charge à soulever dans le cas de l'entraînement en résistance traditionnel aux haltères par exemple), l'individu peut contrôler le niveau de résistance tout au long de la répétition et de la série sans avoir à modifier son équipement. L'entraînement en flywheel permet donc de constamment adapter l'intensité de l'exercice, par exemple afin de suivre les effets de la fatigue dans le cas de répétitions réalisées à effort maximal. Ainsi, il est aisé de comprendre que la flywheel n'est pas en elle-même un outil d'entraînement en excentrique, mais c'est l'utilisation de cet outil qui permettra la surcharge excentrique (**Muñoz-López et al., 2020**). Vues les caractéristiques que nous venons de décrire, l'entraînement en flywheel accentuant la surcharge excentrique sera donc dicté par la nécessité de réaliser des mouvements à intensité maximale ou proches du maximum de l'individu (**Maroto-Izquierdo et al., 2017**). Il est également essentiel de comprendre que la conservation de l'inertie du volant au cours de la série nécessitera d'utiliser le phénomène de rebond à la suite de la première répétition, au risque de ne plus avoir de câble enroulé autour de l'axe du volant d'inertie au moment de commencer une nouvelle contraction concentrique. Ceci a deux conséquences : premièrement, l'entraînement à la flywheel maximise la sollicitation du cycle étirement-raccourcissement et donc ressemble à un travail pliométrique (**Maroto-Izquierdo et al., 2017**) et deuxièmement, l'entraînement à la flywheel favorise donc des séries longues caractérisées par une forte fatigue intra-série (**Muñoz-López et al., 2021**) (**Figure 2**).

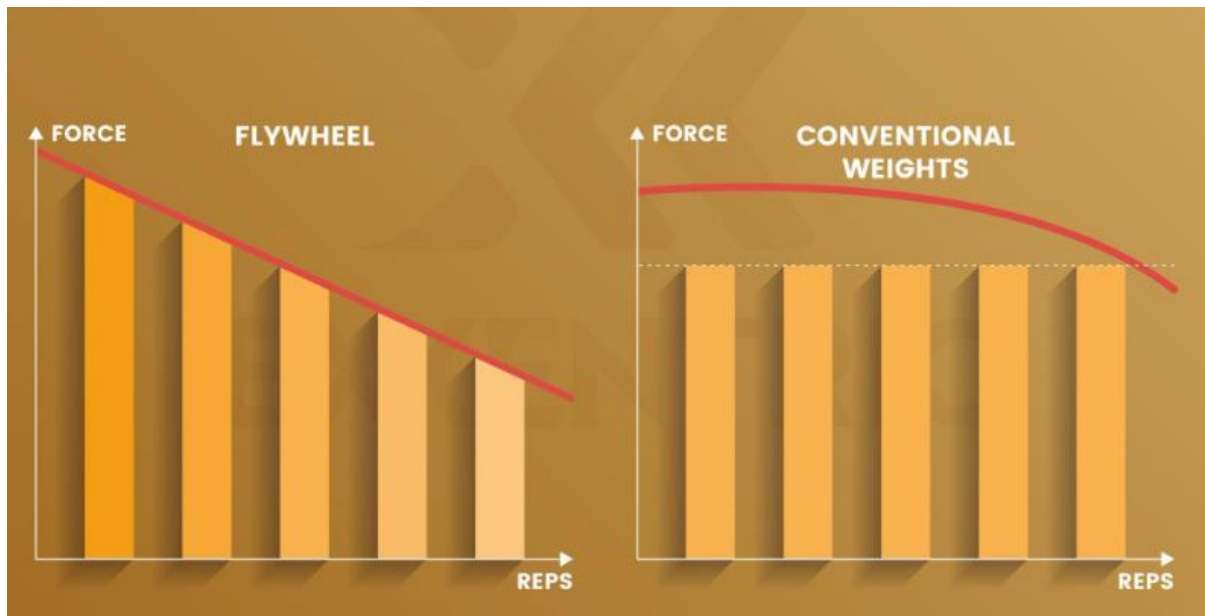


Figure 2 : Représentation des résistances variables entre les répétitions et entre la flywheel et l'entraînement avec poids (D'après <https://exxentric.com/flywheel-training/advantages/variable-resistance/>)

De fait, il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des effets de la fatigue induite par l'exercice à haute intensité concernant les méthodes d'entraînement en force. En effet, la magnitude de la fatigue et donc de la récupération nécessaire afin de potentialiser les effets d'une session d'entraînement en résistance dépend du nombre de séries et de répétitions (volume), de la durée des intervalles de repos, de l'action musculaire choisie (concentrique, excentrique et isométrique), de l'amplitude des mouvements (ROM pour *range of motion*), du temps sous tension (TUT pour *time under tension*) ou de l'utilisation de modes spécifiques comme des contractions accentuées ou menant à l'échec (Raeder et al., 2016).

L'encombrement réduit et l'origine inertielle (et non gravitationnelle) de la résistance induite par la flywheel pourraient optimiser l'entraînement en résistance dans de nombreuses situations. L'entraînement à la flywheel utilisant la surcharge excentrique engendre en effet une fatigue neuro-musculaire significative (Beato et al., 2020; Raeder et al., 2016) et pourrait être une alternative viable à l'exercice en résistance traditionnel : c'est une méthode plus sécuritaire et plus facile à mettre en place (faible encombrement) que les méthodes traditionnelles d'entraînement en résistance pour les praticiens puisque ne nécessitant pas l'aide d'une tierce personne ni le déplacement de nombreux poids lourds (de Keijzer et al., 2021) mais avec des gains de force et des adaptations hypertrophiques comparables chez les individus non entraînés, modérément entraînés et bien entraînés (Petré et al., 2018).

L'entraînement iso-inertiel est également une alternative incontournable afin de répondre aux contraintes des voyages spatiaux (Norrbrand et al., 2010) où l'absence (ou la réduction drastique) des forces de gravité sur un véhicule spatial ou une station lointaine limite l'utilisation de la grande majorité des appareils d'exercice en résistance (Tesch et al., 2017). En effet, les astronautes sont confinés dans des espaces réduits et souffrent des effets de la microgravité : perte musculaire, dysfonctionnements vasculaires et neuromusculaires sont les problèmes principaux reconnus par la National Aeronautics Space and Administration (NASA) et la communauté internationale de la médecine spatiale. Dans ce cadre, l'exercice en résistance est la solution permettant de tenter de compenser ces dysfonctionnements lors d'une exposition prolongée à la microgravité (Sjöberg et al., 2021).

- **Intérêt dans le renforcement de certaines parties du mouvement**

La flywheel permet de renforcer certaines parties du mouvement par surcharge excentrique (de Keijzer et al., 2021; Maroto-Izquierdo et al., 2017). Sachant que l'étirement musculotendineux est un stimulus permettant la croissance des muscles squelettiques (par mécanotransduction) et que la phase excentrique génère des forces plus importantes que la phase concentrique, les actions musculaires excentriques peuvent être accentuées dans les protocoles d'entraînement en résistance visant à contrôler l'augmentation de la taille des muscles et la force (Presland et al., 2020), donc la surcharge excentrique pourrait amplifier les stimuli de croissance (de Keijzer et al., 2021). De nombreuses études suggèrent que les exercices en résistance implémentant une surcharge excentrique induisent des augmentations de force plus importantes que l'entraînement avec une charge constante pendant l'action concentrique uniquement ou lors d'action couplées concentrique-excentrique (Norrbrand et al., 2008). Ces bénéfices pourraient être liés notamment à la typologie musculaire.

Dans ce contexte, l'utilisation de la flywheel paraît prometteuse. En effet, une majorité des études a évalué les effets de l'entraînement avec une surcharge excentrique (EOT) sur la masse musculaire des membres inférieurs chez les sujets sains et actifs, ces études ont utilisé des entraînements avec une charge de travail moyenne de 4 séries de 7 répétitions maximales pendant 5 à 15 semaines. En résumé, elle entraînerait un gain de 5 à 13 % de la masse musculaire, de 11 à 39% de la force maximale volontaire, de 12 à 25% de la répétition

maximale (1 RM), de 21 à 90% de force maximale excentrique, de 10 à 33% de puissance maximale, de 6 à 15% de capacité de saut, de 2 à 10% de vitesse de course et jusqu'à 35% d'activité électromyographique (**Maroto-Izquierdo et al., 2017**). Il semble d'ailleurs plus conseillé d'utiliser une flywheel avec de faibles moments d'inertie et donc de hautes vitesses d'exécution afin de favoriser la surcharge excentrique (**Muñoz-López et al., 2020**).

Les déterminants des effets d'un programme de résistance à la flywheel sont la charge de travail d'entraînement se basant sur la charge externe (ex : poids) et permettant de caractériser la production mécanique, et le volume d'entraînement comprenant le nombre de série et de répétition, correspondant à la perte mécanique. Par conséquent, il est intéressant de faire des mesures en temps réel des résultats mécaniques afin de guider les décisions concernant le volume d'exercice approprié à utiliser, **Sabido et al., en 2018**, ont étudié cela sur l'entraînement à la flywheel montrant une diminution de la puissance avec des répétitions élevées (**Sabido et al., 2018**). Dans le même sens, lorsque l'on parle d'entraînement basé sur la vitesse pour déterminer le nombre de répétitions, il est suggéré qu'une perte de vitesse plus élevée dans l'ensemble entraînera une fatigue aiguë plus élevée (**González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010**). Afin de surveiller ces deux facteurs dans les exercices d'extension des jambes, il est possible d'utiliser l'accélération maximale puisqu'elle a une interaction significative dans les performances mécaniques (**Muñoz-López et al., 2021a**). Il est ainsi possible de se demander s'il y a un réel impact de la flywheel sur certaines parties du mouvement. Afin de répondre à ce questionnement, la biomécanique va être utilisée. En effet, le but de cet exercice, pour qu'il y ait une surcharge excentrique, est de résister au maximum à la traction du câble lors de la phase excentrique afin de freiner la descente en squat par exemple, ceci va produire une résistance linéaire élevée pendant la phase excentrique (**Allen et al., 2021**). Ensuite, l'augmentation du moment d'inertie de la flywheel lors d'un exercice de squat, entraîne la réduction de la vitesse verticale et angulaire du genou, donc une augmentation de la force exercée par le sujet : ceci se traduit par une diminution de la vitesse du flywheel (**Muñoz-López, et al., 2021b**). Afin de quantifier l'intensité maximale de la charge dans un exercice de squat à la flywheel, nommée charge maximale du flywheel (MFL), plusieurs modèles ont été testés. Le modèle le plus fiable permet de coupler le moment d'inertie à l'accélération angulaire moyenne, c'est un modèle logarithmique. MFL est une valeur théorique et abstraite, puisqu'elle représente l'inertie à laquelle l'accélération du volant d'inertie serait nulle (**Muñoz-López et al., 2021b**). De plus, la méthode valable pour quantifier la charge et individualiser la prescription de l'entraînement du flywheel est le contrôle de la vitesse linéaire concentrique

moyenne pendant l'exercice de flywheel, celle-ci dépend donc de l'individu et de l'énergie cinétique produite (**Martin-Rivera et al., 2022**). D'autre part, durant l'exercice, il a été vu qu'une fatigue musculaire était produite, celle-ci est plus élevée autour du pic concentrique pour les variables telles que la vitesse, l'accélération et la puissance, mais la variable la plus sensible pour détecter la fatigue est l'accélération angulaire du flywheel (**Muñoz-López et al., 2021a**). Enfin, lorsque l'on fait la comparaison entre les séries (1 à 3) de la vitesse, de l'accélération et de la puissance, une diminution significative de toutes les variables est aperçue mais avec des amplitudes différentes (vitesse < accélération < puissance), ceci peut être expliqué par l'apparition de la fatigue (**Muñoz-López et al., 2021a**).

- **Les effets sur le système neuromusculaire**

L'entraînement à la flywheel a un effet mesurable sur la fonction neuromusculaire et entraîne de nombreuses adaptations positives à l'entraînement en favorisant le travail excentrique. Par rapport au travail musculaire concentrique, le travail excentrique isolé permet d'induire un pic de force plus élevé avec une activation musculaire et un coût métabolique plus faibles, ainsi qu'une sollicitation plus élevée des fibres de type IIX, et une plus grande activité corticale électromyographique (**Beato & Dello Iacono, 2020; Hody et al., 2019; Maroto-Izquierdo et al., 2017**). D'autre part, elle permet de générer une force plus importante, les forces développées à des vitesses plus élevées permettent de meilleures réponses de puissances musculaires (**Beato & Dello Iacono, 2020**), et un étirement musculo-tendineux simultané (contraction excentrique), ce mécanisme est impliqué dans la synthèse des protéines musculaires et permet une augmentation de la surface de la section transversale des fibres musculaires (CSA) (**Beato & Dello Iacono, 2020**). En comparaison aux contractions concentriques, les contractions excentriques nécessitent une moindre activation des unités motrices et consomment moins d'oxygène et d'énergie pour une même force (**Hody et al., 2019**) : le coût métabolique est environ quatre fois plus faible pour un exercice donné et les réponses cardiorespiratoires et hémodynamiques sont réduites (**Meyer et al., 2003; Overend et al., 2000**). Elle permet aussi une régulation à la hausse préférentielle de l'activité des cellules satellites et des voies transcriptionnelles dans les fibres musculaires à contraction rapide, ces fibres étant les plus endommagées lors de la contraction excentrique (**Beato et al., 2019; Beato & Dello Iacono, 2020**) et *in fine*, une amélioration des performances dans des actions à haute

intensité, par exemple en saut (Beato et al., 2019; K. de Keijzer et al., 2021). Une autre utilisation de la flywheel pourrait être de faciliter une plus grande potentialisation de la réponse motrice (réponse PAP) utilisée notamment comme stratégie d'échauffement. L'amélioration de la réponse musculaire lors de la réponse PAP entraîne une sensibilité accrue des protéines contractiles au calcium libéré par le réticulum sarcoplasmique (**Beato et al., 2019; Beato & Dello Iacono, 2020**) et donc l'augmentation du nombre de ponts d'union par la phosphorylation des chaînes légères régulatrices de la myosine pendant la contraction musculaire (**Beato et al., 2020**). Toutes ces adaptations sont favorables à l'utilisation de la flywheel pour l'entraînement en résistance mais il n'y a pas les détails exacts de son utilisation, il est donc possible de se demander si ces adaptations se font pour tout type de mouvement.

En ce qui concerne l'entraînement avec une surcharge excentrique (EOT), il amène une synthèse de protéines myofibrillaires plus élevée, une plus grande accumulation d'hormones anabolisantes et une activation accrue des cellules satellites. Par conséquent, il est supérieur à un entraînement en force pour l'hypertrophie musculaire et le gain de force, mais il entraîne un niveau de fatigue plus élevé suivi d'un processus de récupération prolongé (**Maroto-Izquierdo et al., 2017; Norrbrand et al., 2010**). Durant l'exercice en résistance, on remarque également une augmentation de la pression mécanique intramusculaire qui réduit le flux sanguin musculaire et est relative au manque d'oxygène, ce qui est la cause d'une diminution de la saturation en oxygène du muscle, mais celle-ci revient à la normale en période de repos, il ne faut donc pas négliger ces périodes (**Timon Andrada et al., 2017**). Une séance d'entraînement de force à haute intensité libère les mécanismes de fatigue centraux et périphériques, amène une augmentation transitoire des marqueurs moléculaires locaux et circulants de l'inflammation et des dommages musculaires tels que la créatine kinase et le lactate déshydrogénase et ce, dès la première séance (**Beato & Dello Iacono, 2020**). Il y a donc une baisse transitoire de l'activation neuronale, de la force musculaire et des performances, et donc un niveau élevé de dommages musculaires et de douleurs après l'exercice (**Maroto-Izquierdo et al., 2017**). Ainsi, l'EOT amène une diminution des performances de saut et de force, une augmentation de l'activité de la créatine kinase (CK) et des sensations de raideur musculaire ou de douleur musculaire (24 à 48h après l'exercice). La réduction progressive de la charge d'entraînement après une fatigue musculaire volontaire avec des intervalles de repos inter-séries très courts peut être une solution afin de permettre une augmentation du TUT et donc une plus grande fatigue des unités motrices avec un stress métabolique et ischémie plus élevée, et ainsi une plus grande réponse hypertrophie. En conclusion, pour un exercice de force, si l'exercice est mono

articulaire et avec un volume d'entraînement trop élevé, il y a une fatigue à court terme qui s'installe (**Raeder et al., 2016**).

Il existe de nombreux mouvements possibles avec la flywheel, mais lesquels vont être les plus efficaces pour développer les qualités physiques souhaitées ? Nombreux auteurs ont comparé différents mouvements effectués à l'aide de la flywheel et lorsque l'on parle du squat, il en ressort que l'amplitude EMG des quadriceps est largement similaire entre les squats basé sur l'entraînement inertiel à la flywheel et ceux avec une résistance externe constante dynamique lorsqu'ils sont adaptés à la vitesse de mouvement (**Bollinger, 2022a**), que l'amplitude moyenne de l'EMG était significativement plus grande pendant la phase concentrique que pendant la phase excentrique pour le vaste latéral (VL) et le vaste médial (VM), mais pas pour le droit fémoral (RF) (**Bollinger, 2022a**). Ensuite, concernant le soulever de terre, certains facteurs comme la distance entre la charge et le centre de masse, les plans de flexion du genou ou l'intensité totale conditionnent l'activation musculaire et diffèrent selon les variantes de l'exercice (**Flández et al., 2021**). Il faut aussi savoir que le deadlift conventionnel est une meilleure technique pour entraîner le rectus femoris et le gluteus maximus que le deadlift roumain puisque les valeurs EMG et NJT sont supérieures (**Lee et al., 2018**).

Lors des études sur l'exercice du squat, certains muscles étudiés sont retrouvés régulièrement. Afin d'évaluer de manière fiable les adaptations d'entraînement pour la force musculaire des jambes et pour mieux distinguer les mécanismes neuronaux et morphologiques responsables des adaptations, il a fallu capturer les signaux des muscles vaste latéral, vaste médial, droit fémoral et biceps fémoral à au moins trois charges de volant d'inertie (**Spudić et al., 2020a**). Dans l'étude de **Bollinger et al de 2022**, c'est l'activité EMG de surface du vaste latéral (VL), du vaste médial (VM) et du droit fémoral (RF) qui a été étudié (**Bollinger, 2022a**). Tandis que lorsque l'on parle des muscles étudiés pour un deadlift, on va plus s'intéresser au rectus femoris et au gluteus maximus (**Lee et al., 2018**).

- **Limites des recherches**

Les recherches sur la flywheel comportent tout de même certaines limites, c'est un outil qui n'a pu encore être étudié dans sa totalité et certaines de ses fonctionnalités restent à éclaircir. En effet, l'intensité de la charge dépend des poids libres utilisés lors d'un exercice en résistance au poids tandis qu'un exercice en résistance avec la flywheel est fonction du moment d'inertie du volant et du diamètre de l'axe, il y a donc une relation entre le moment d'inertie utilisé et le résultat mécanique. Les composants utilisés pour mesurer cela sont la force maximale, la force moyenne, la vitesse linéaire maximale, la vitesse linéaire moyenne, la puissance moyenne et la puissance maximale. Cependant, la gravité interagit peu dans l'entraînement en résistance avec la flywheel et les composantes de frottement ont un faible effet sur la charge mécanique, donc tant que la force exercée est supérieure à zéro le mouvement se produira. Ceci laisse tout de même un problème : puisque la charge d'entraînement ne peut pas être programmée en pourcentage de 1RM comme c'est le cas avec les poids libres, ceci rend difficile l'établissement d'une charge de travail relative appropriée à utiliser pour l'entraînement avec la flywheel. De plus, les avis divergent sur la relation linéaire existante entre la force et la vitesse : **Carroll et al. en 2019** ont montré une relation linéaire négative entre la vitesse linéaire concentrique maximale ou moyenne et le moment d'inertie dans les entraînements à la flywheel, tandis que **Spudić et al. en 2020** ont trouvé un profil force-vitesse linéaire se produisant à l'identique des entraînements avec les poids libres (**Rahmani et al., 2018**). **Worcester et al. en 2020** ont montré que la vitesse verticale et angulaire de l'articulation du genou a été réduite lorsque le moment d'inertie a été augmenté, par conséquent, lorsque la force augmente, la vitesse du volant diminue. On sait également que dans les exercices d'haltérophilie, la force est le produit de la masse de la charge et de l'accélération linéaire alors que dans les exercices avec flywheel, c'est le produit du moment d'inertie et de l'accélération angulaire qui est calculé à la place de la force (**Sabido et al., 2018**). Donc la caractérisation de la production mécanique sur des ensembles et des charges peut fournir des informations intéressantes par rapport à la quantification de la charge d'entraînement : dans les entraînements avec flywheel, ce sont les vitesses angulaires et l'accélération angulaire qui déterminent cela (**Muñoz-López et al., 2020**). Traduire un moment de force rotative en force linéaire reste donc une manipulation complexe.

Afin de calculer toutes ces variables, des outils de mesure sont nécessaires, ces outils sont très coûteux et donc pas accessibles à tous, ce qui est une nouvelle limite à l'utilisation de la flywheel. Néanmoins, ces outils sont essentiels pour comprendre le fonctionnement de la flywheel. Il est possible de prendre l'exemple des capteurs Trigno-galileo, fréquemment utilisés, puisqu'ils permettent de mesurer les décharges neuronales et l'activation musculaire pour une approche intégrée du mouvement humain, donc une analyse de la contraction musculaire et de la conduction nerveuse. Ces capteurs sont pratiques d'utilisation puisqu'ils sont petits et discrets. Le capteur Trigno Galileo est un réseau EMG à 4 canaux qui peut détecter les signaux EMG à partir de différentes positions géométriques et il prend également en compte différentes fonctionnalités telles que celles d'IMU. Ainsi, l'unité de mesure inertielle (IMU) permet de récolter des informations d'accélération, de rotation et de champ magnétique terrestre (compas) afin de discerner les mouvements synchronisés avec les signaux EMG. C'est un outil valide et fiable pour mesurer la vitesse angulaire dans l'entraînement de force avec une flywheel (**Pino Ortega et al., 2022**). D'un autre côté, l'EMG permet d'évaluer de manière fiable les adaptations d'entraînement pour la force musculaire des jambes et de mieux distinguer les mécanismes neuronaux et morphologiques responsables des adaptations (**Spudić et al., 2020a**). Il est important de trouver le bon emplacement de l'EMG, afin de garantir son fonctionnement, il doit se positionner le long de la ligne médiane longitudinale du muscle désiré avec la flèche parallèle aux fibres musculaires, entre un point moteur (zone d'innervation) et l'insertion du tendon ou entre deux points moteurs.

- **Les effets sur l'entraînement**

L'entraînement en résistance à la flywheel amène de nombreuses adaptations d'après les études. En effet, lorsqu'il est couplé avec une surcharge excentrique, il peut entraîner des adaptations aiguës et chroniques (**de Keijzer et al., 2021**). Cet entraînement permet de développer la force musculaire de l'athlète (**Askling et al., 2003; K. de Keijzer et al., 2021, 2022; Kraemer et al., 2002; Naczki et al., 2016; Norrbrand et al., 2010; Petré et al., 2018; Raya-González et al., 2020**), et a un effet hypertrophique bénéfique (**Beato & Dello Iacono, 2020; Kraemer et al., 2002; Norrbrand et al., 2010; Petré et al., 2018**). Ensuite, il y a une amélioration de l'activation musculaire (plus grande vitesse et force), améliorant ainsi les performances spécifiques aux tâches tels que les changements de direction (**Beato et al., 2019**;

K. de Keijzer et al., 2021), le saut vertical (**De Hoyo et al., 2015; K. L. de de Keijzer et al., 2020; K. de Keijzer et al., 2022; Kraemer et al., 2002; Maroto-Izquierdo et al., 2017b; Naczk et al., 2016**), et la puissance (**de Keijzer et al., 2022; Naczk et al., 2016; Petr  et al., 2018**). Néanmoins une qualité fait encore débat : le sprint, la plupart des études disent que l'entraînement à la flywheel à un effet bénéfique (**Askling et al., 2003; De Hoyo et al., 2015; Maroto-Izquierdo et al., 2017b**), mais dans l'étude de **Beato et al., 2019** il est noté qu'il n'y a pas d'effet sur le sprint (**Beato et al., 2019**). En ce qui concerne les blessures, la flywheel pourrait permettre de réduire (**Askling et al., 2003; De Hoyo et al., 2015; K. de Keijzer et al., 2021**) et de prévenir les blessures musculaires, (**Askling et al., 2003; De Hoyo et al., 2015; K. de Keijzer et al., 2021; Raya-González et al., 2020**). Pour les blessures aux ischios-jambiers, ceci peut s'expliquer par des adaptations architecturales : il a été remarqué une augmentation significative de la longueur du fascicule BFlh lors de l'entraînement à la flywheel (**Presland et al., 2020**). Enfin, la résistance maximale sur toute l'amplitude du mouvement (**Petr  et al., 2018; Vicens-Bordas et al., 2018**) et donc la surcharge excentrique pourrait expliquer une plus grande amplitude EMG globale de l'exercice et les résultats EMG concentriques presque maximaux à la fois avant et après l'entraînement (**Norrbrand et al., 2010**).

Afin de voir toutes ces adaptations, il est nécessaire de déterminer les modalités d'exercice : intensité, volume et récupération (**Beato et al., 2020**). En se penchant sur les études, on remarque un avis général sur le fait que l'entraînement en résistance à la flywheel doit durer entre 4 à 10 semaines (**Maroto-Izquierdo et al., 2017a**), faire 2 à 3 séries minimum (**Beato & Dello Iacono, 2020; K. L. de de Keijzer et al., 2020; Maroto-Izquierdo et al., 2017a**), de 6 à 8 répétitions (**Maroto-Izquierdo et al., 2017a**), ces modalités sont les plus utilisées dans les protocoles des articles sur le sujet. En ce qui concerne le temps de repos, et donc le PAP, l'amélioration des performances des membres inférieurs se fait après 3 minutes de récupération suite à un exercice de flywheel, puisque la fenêtre optimale est de 3 minutes à 6-9 minutes (**Beato et al., 2019, 2020; K. L. de de Keijzer et al., 2020**), donc les intervalles de repos d'environ 6 minutes pourraient optimiser les effets PAP (**de Keijzer et al., 2020**). **Morencos, 2022**, fait l'hypothèse que la plupart des effets d'entraînement à la flywheel signalés dans les protocoles traditionnels d'une durée minimale de 5 à 6 semaines se produisent au cours des premières semaines d'entraînement (**Morencos et al., 2022**).

Les relations linéaires individualisées entre l'inertie et la vitesse concentrique maximale permettent d'expliquer que pour un entraînement basé sur l'inertie comme le flywheel, il vaut mieux utiliser la vitesse par rapport à la puissance (**McErlain-Naylor & Beato, 2021**). En effet, le contrôle de la vitesse linéaire concentrique moyenne (MCLV) pendant l'exercice de la flywheel peut être proposé comme une méthode valable pour quantifier la charge, individualiser la prescription de l'entraînement du volant d'inertie, ainsi que comme indicateur de la gestion de la fatigue (**Balsalobre-Fernández & Torres-Ronda, 2021; Martin-Rivera et al., 2022**), cette méthode se nomme la velocity-based training (VBT). Cette méthode d'entraînement en résistance utilise la vitesse de mouvement pour améliorer le processus d'entraînement et renforcer les effets de l'entraînement, via une compréhension plus approfondie du signal d'entrée (charge d'entraînement réelle) et du signal de sortie (changements de performance) (**Blanco & Loturco, 2022**). Ce style d'entraînement basé sur la VBT est une nouvelle approche qui permet un contrôle plus précis, fréquent et objectif de l'intensité et du volume de l'entraînement en résistance, induisant des gains de performance physique (**Blanco & Loturco, 2022; Riscart López et al., 2020**). Plusieurs appareils VBT pour mesurer la vitesse concentrique moyenne et maximale des haltères ont été validés puisque les effets du placement de l'appareil sont détectables, mais probablement suffisamment faibles ($SEE < 0,1 \text{ m/s}$) pour être négligeables dans les contextes d'entraînement (**Fritschi et al., 2021**). L'accéléromètre par exemple permet de mesurer la vitesse des mouvements dans les exercices de résistance (**Balsalobre-Fernández & Torres-Ronda, 2021**). Plus précisément, durant l'exercice, l'application de perte de vitesse de 10 à 20 % peut aider à induire des adaptations neuromusculaires et à réduire la fatigue neuromusculaire (**Wlodarczyk et al., 2021**). Dans le cas des squats effectués à une vitesse maximale, s'arrêter à une perte de vitesse inférieure à 40 % pourrait améliorer considérablement la répétition maximum, augmenter la vitesse moyenne pendant une série de squats, ainsi que les performances de saut vertical (**Dahlin, 2018**). Si l'on prend le problème dans l'autre sens, pour les exercices de développement de puissance, la vitesse peut être utilisée pour mesurer l'intensité (**Dahlin, 2018**).

Afin de voir si l'entraînement à la flywheel est réellement innovateur, il a été comparé à l'entraînement traditionnel avec poids dans de nombreuses études. En ce qui concerne le protocole PAP, les résultats positifs sont comparables (**de Keijzer et al., 2021**) tandis que l'augmentation de la puissance maximale est similaire pour les jambes, mais les adaptations musculaires ont été provoquées avec moins de répétition pour le FW. Il permet un travail plus efficace : la force utilisée est plus élevée, mais la dépense énergétique est moindre (**Beato &**

Dello Iacono, 2020; García Gutiérrez et al., 2019; Vicens-Bordas et al., 2018). Du côté physiologique, le taux de lactate est significativement plus élevé avec le flywheel (**Raeder et al., 2016**), cependant la fatigue neuromusculaire est constante jusqu'à 48 heures après l'exercice pour les deux modalités d'entraînement avec une plus grande stimulation neuromusculaire pour l'entraînement traditionnel (**Raeder et al., 2016**). L'entraînement à la flywheel est donc un entraînement alternatif dans les programmes périodiques qui visent à améliorer les performances sportives (**Arsenis et al., 2020**).

- **Synthèse**

La flywheel est un outil d'entraînement en résistance utilisant l'accélération d'un volant d'inertie de masse ajustable. Cet outil comporte de nombreuses caractéristiques intéressantes pour l'optimisation de l'entraînement notamment en comparaison à l'entraînement en résistance traditionnel. En effet, il est possible d'effectuer des exercices typiques (comme le squat) avec une surcharge excentrique, pourvu que la personne confère suffisamment de vitesse de rotation au volant et se place dans une position de faiblesse relative dans le mouvement choisi, de manière à maximiser les adaptations liées à la surcharge excentrique. De plus, la flywheel opère selon le principe du yo-yo, il faudra enchaîner les mouvements et ainsi l'entraînement typique en flywheel sera assimilé à celui d'un travail en endurance de force.

Le principal défi à relever afin de pouvoir utiliser la flywheel de manière adaptée réside dans la capacité à quantifier la charge d'entraînement. En effet, il n'existe pas de méthodologie à bas coût pouvant être intégrée au design d'un équipement sportif déjà onéreux, comme le pourraient être des plateformes de force ou des jauges de contrainte. Certaines variables indirectes sembleraient être utiles pour quantifier la charge d'entraînement à la flywheel, comme l'accélération maximale permettant de surveiller la charge de travail d'entraînement et le volume d'entraînement dans les exercices d'extension des jambes ou encore celui de l'accélération angulaire de la flywheel permettant de détecter la fatigue lors de l'exercice.

Objectifs et problématique

Avec les données récoltées dans la littérature, on peut voir que la flywheel est un outil d'entraînement comportant de nombreux avantages. Ceci est notamment dû à la place importante de la phase excentrique dans le mouvement effectué qui va permettre de nombreuses adaptations physiologiques.

Par conséquent, si l'on peut dire que la surcharge excentrique joue un rôle décisif dans les adaptations des muscles squelettiques à l'exercice de résistance, il reste à savoir à quel moment la surcharge excentrique pendant l'entraînement avec la flywheel amplifierait davantage la réponse musculaire, et comment la mesurer simplement afin de pouvoir guider l'entraînement.

On va donc se demander à quel moment du mouvement il est bénéfique d'utiliser la surcharge excentrique dans un entraînement à la flywheel.

Le but de ce mémoire sera donc de voir à quel moment du mouvement la surcharge excentrique est la plus efficace et aide à l'amélioration des adaptations.

Hypothèses envisagées

Plusieurs hypothèses ont pu être envisagées grâce à la littérature scientifique en réponse à la problématique :

- ➔ La force générée dans la phase excentrique sera plus forte que celle générée dans la phase concentrique.
- ➔ Le recrutement des unités motrices sera plus important au moment de la surcharge excentrique.
- ➔ La RPE et la FC seront plus élevées lorsque la surcharge excentrique sera placée au milieu de la phase excentrique et cette condition sera plus coûteuse en énergie.

Méthodologie générale

Comparaison de 2 squats : avec une pause entre la phase concentrique et la phase excentrique et sans pause entre les 2 phases

➤ Matériels

- Flywheel



Figure 3 : Image d'une Kbox (<https://exxentric.com/>)

C'est un volant d'inertie comportant un dispositif mécanique qui utilise la conservation du moment cinétique pour stocker l'énergie de rotation durant la phase concentrique du mouvement et la renvoyer proportionnellement durant la phase excentrique.

- Trigno galilé (EMG et IMU)



Figure 4 : Image d'un capteur Trigno Galilé (<https://delsys.com/trigno-galileo/>)

Ces capteurs permettent de mesurer les décharges neuronales et l'activation musculaire pour une approche intégrée du mouvement humain, c'est-à-dire pour analyser la contraction musculaire et la conduction nerveuse. Ce capteur est petit et discret, il contient la fonctionnalité

« IMU » afin d'apporter des informations d'accélération, de rotation et de champs magnétique terrestre pour discerner les mouvements synchronisés avec les signaux EMG.

- Moxy



Figure 5 : Image d'un capteur Moxy (<https://www.moxymonitor.com/>)

Le capteur Moxy est un appareil portatif et peu invasif permettant de mesurer en temps réel l'oxygénation du muscle : SmO₂. Cet outil est notamment utilisé par les athlètes et les chercheurs voulant utiliser l'oxygénation du musculaire comme référence physiologique dans l'entraînement.

- Polar H10



Figure 6 : Image d'un capteur Polar H10 (<https://www.polar.com/au-en/sensors/h10-heart-rate-sensor>)

Ce cardiofréquencemètre permet de mesurer la fréquence cardiaque en temps réel et d'enregistrer la fréquence cardiaque pour une analyse ultérieure. Cet outil amènera une information sur la charge interne.

- Tablette

La tablette permettra de prendre en vidéo le mouvement effectué par le sujet et donc de visualiser l'entièreté de celui-ci. Le logiciel Polar sera géré à partir de la tablette.

- Echelle de Borg

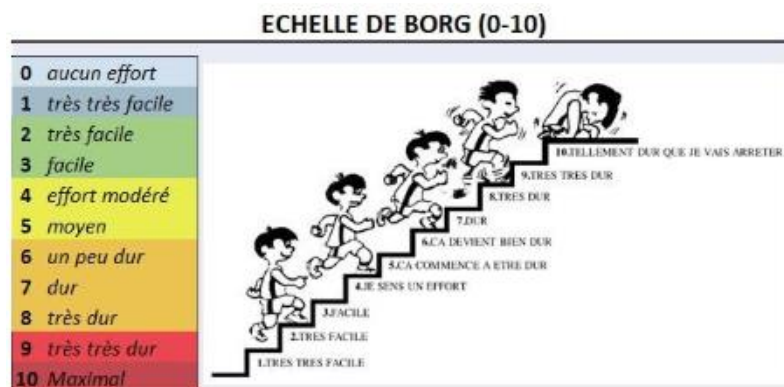


Figure 7 : Image de la représentation de l'échelle de Borg (<https://www.tripassion.fr/rpe-rating-of-perceived-exertion/>)

Cet outil connu sous le nom de « Rate of Perceived Exertion » est un outil quantitatif qui permet d'évaluer de façon subjective le niveau d'effort fourni au cours d'un exercice physique. Elle est notamment utilisée par les sportifs afin d'évaluer l'intensité des efforts produits afin de connaître leurs limites, la difficulté d'exécution et la fatigue accumulée.

➤ **Lieu**

Les expérimentations ont eu lieu dans la salle de biomécanique de l'« University of Newcastle » comportant un ordinateur avec le logiciel Neuromap qui nous a permis d'utiliser les capteurs Trigno Galileo. Cette salle est spacieuse et peut accueillir la flywheel.

➤ **Population**

L'expérimentation se fera sur des sportifs occasionnels faisant en moyenne 400 minutes de sport par semaine, il y aura 3 femmes et 3 hommes. Ils ont en moyenne $26,2 \pm 6,2$ ans, une masse de $78,9 \pm 13,5$ Kg et une taille de $178,6 \pm 6,8$ m. Aucun des participants n'a un entraînement régulier à la flywheel, ils ont tous eu une phase de familiarisation afin de comprendre le fonctionnement de cet outil.

Les participants ont reçu une explication verbale des procédures expérimentales et ont signé des documents de consentement éclairé avant le test.

➤ **Durée**

Ce protocole est peu invasif, puisqu'il dure en moyenne 1h par participant, ce temps comprend l'installation des capteurs sur le sujet, la familiarisation avec l'outil, l'explication du test, les réglages de la flywheel, le test et la désinstallation du sujet.

➤ **Mise en place**

- Préparation de l'environnement

Il faut commencer par placer la flywheel au centre de la salle puis mettre une chaise derrière pour le confort du sujet et éviter une chute en arrière. Ensuite, il va falloir ouvrir les logiciels permettant de récolter les données. EMGWork sera sur l'ordinateur et le déroulement du protocole sera rentré afin de guider le test. Le logiciel relié à la flywheel sera mis sur l'ordinateur et permettra de savoir à quel moment les 6 squats ont été effectués. Les logiciels Polar pour la fréquence cardiaque, Moxy pour la SmO2 et la caméra seront reliés à la tablette. Enfin, le chronomètre sera placé sur la table.

- Installation du sujet

Il faut commencer par préparer les Trigno Galileo afin de les placer ensuite sur les sujets : les capteurs sont collés sur du scotch double face pour ensuite être placés sur les repères anatomiques du sujet, et du scotch sera mis par-dessus pour être sûr qu'ils restent en place. Les capteurs seront positionnés sur la jambe forte du sujet, avec le premier IMU sur le sacrum et son EMG sur le grand fessier et le deuxième IMU sur le quadriceps avec son EMG sur le vaste médial. Le capteur Moxy sera placé sur l'autre jambe par faute de place, au centre du quadriceps. Ensuite, le cardiofréquencemètre sera placé sur une ceinture thoracique et donc juste en-dessous des pectoraux. Enfin, il faudra régler la longueur de la sangle de la flywheel de façon à ce que l'athlète ait un angle de genou à 120 degrés avant le test MVC et un angle de 180 degrés avant le test.

➤ **Déroulement du test**

- Familiarisation

Quelques squats à vitesse faible seront effectués afin d'habituer le sujet à cet outil et qu'il comprenne son fonctionnement.

- Vérification du bruit des EMG

Le sujet fera 3 ou 4 squats à vide, le mouvement permettra de voir un signal EMG sur l'ordinateur et donc de savoir si le bruit est trop élevé (Supérieur à 15mV) et s'il faut replacer les capteurs.

- MVC

La sangle, pour être réglée, doit être tendue lorsque l'athlète a un angle de genou de 120 degrés. Durant 5 secondes, le sujet devra pousser sur le sol pour tenter de se lever. Juste après ce test, la RPE sera demandée.

- Test

Le test se déroulera en 2 phases. Dans chacune des conditions, les mouvements seront faits avec la même amplitude de mouvement, mais la surcharge excentrique ne sera pas au même moment. Il faut veiller à ce que la charge mécanique soit exactement la même pour chacun des mouvements : distance parcourue par la barre, tempo, répétitions. La réalisation de chacune des répétitions se fera à inertie maximale, afin d'avoir la même quantité d'inertie entre les 2 conditions pour un même athlète, la phase concentrique se fera à vitesse maximale et il y aura un contrôle de la phase excentrique jusqu'à ce que le squat ait une amplitude complète. L'ordre d'exécution des mouvements par les participants sera randomisé.

→ condition 1 : squat sans pause avec surcharge excentrique, et rebond en bas pour une puissance maximale à la flywheel

→ condition 2 : squat avec pause lorsque l'athlète est debout, attendre l'imposition de la surcharge excentrique en haut pour entamer la phase excentrique, et rebond en bas pour une puissance maximale à la flywheel

Il y aura 3 séries de 6 répétitions avec 2 minutes de repos entre chaque série et 5 minutes de repos entre les 2 conditions. La RPE sera également demandée à la fin de chaque série.

➤ **Variables observées**

L'EMG maximal sera observé avec les force et puissance moyenne générées, pour savoir quelle condition produit le plus de force. Ensuite, les forces générées dans les phases concentrique et

excentrique seront comparées ainsi que les pics de force afin de connaître la phase produisant le plus de force. Puis, la RPE va permettre de voir la difficulté d'exécution, et la fatigue accumulée par le sujet. La saturation du muscle en oxygène informera sur la condition la moins coûteuse en O₂ et enfin la fréquence cardiaque sera un indicateur de la charge interne.

➤ **Outils d'analyse**

- EMGWorks

C'est un logiciel relié aux capteurs Trigno Galiléo permettant l'acquisition des données qui seront par la suite analysées par un autre logiciel. Ce logiciel permet de rentrer les différentes phases du protocole, la position des capteurs et ce que l'on veut analyser précisément.

- Neuromap

Ce logiciel permet le traitement des données, c'est-à-dire de les récolter, puis de les analyser et les visualiser grâce à plusieurs logiciels tels que Neuromap Report ou Neuromap Explorer. Il est possible de comparer plusieurs phases d'un même mouvement.

➤ **Protocole d'analyse pour chacune des variables**

Afin de respecter l'anonymat des différents joueurs et faciliter l'exploitation des données, le nom des joueurs sera modifié et remplacé par un numéro : P01, P02, P03...

- EMG Max

Pour commencer, il va être intéressant de savoir laquelle des 2 conditions peut produire le plus de force. La première analyse de l'EMG max se fera à l'aide de Neuromap report, en se penchant sur les données de la deuxième série puisque le sujet aura eu le temps de s'adapter à la flywheel et n'aura pas accumulé trop de fatigue. Ensuite, dans cette série, on va se centrer sur les données des squats entre le 2ème et le 6ème, on ne prend pas le premier squat puisqu'il faut un temps d'adaptation à la flywheel, de mise en route. En choisissant la fonctionnalité "Motor Unit", il sera possible d'évaluer les unités motrices impliquées avec la distribution des

amplitudes MUAP et le pic d'activité des unités motrices. Une comparaison de ces variables entre les 2 conditions sera effectuée.

Dans un second temps, les pics de force et de puissance seront récoltés à l'aide du logiciel relié à la flywheel et répertoriés dans un fichier excel. Les moyennes des conditions seront calculées afin de comparer les résultats de chacune.

- Comparaison des forces générées

Afin de comparer les forces générées durant la phase excentrique et durant la phase concentrique, il va falloir dans un premier temps délimiter les 2 phases, à l'aide du signal IMU. Ensuite, on va utiliser la fonctionnalité "Sports Performance" de Neuromap Report afin de caractériser le comportement des unités motrices et de comparer ce comportement entre les 2 phases. Une régression comparant l'amplitude maximale de MUAP (axe des x) et le pic d'activité (axe des y) sera effectuée.

Puis, pour accentuer ces résultats, les données récoltées par la flywheel, pics excentrique et concentrique, seront comparées dans un fichier excel.

- RPE

Chacune des données RPE a été recueillie dans un tableau excel et des moyennes de chacune des conditions pour chaque sujet ont été calculées afin de voir quelle condition est la plus difficile à exécuter.

- Saturation du muscle en oxygène

Les données récoltées par moxy ont été placées dans un tableau Excel afin de pouvoir comparer laquelle des conditions est la moins coûteuse en O₂ et par conséquent la plus efficace à ce niveau. Le pourcentage de SMO₂ et THb a été recueilli.

- FC

Enfin pour avoir des informations sur la charge interne, le rythme cardiaque (Heart rate, HR) et la fréquence respiratoire (Respiratory rate, RR) ont été récoltés dans des tableaux Excel.

Les moyennes de chacune des conditions ont été calculées et permettent de communiquer des informations sur la difficulté de l'exercice et l'état physique du participant.

➤ **Analyse statistique**

A partir des résultats de la flywheel (force et puissance maximal, pics de force dans les phases excentrique et concentrique), des résultats RPE, des résultats sur la fréquence cardiaque et ceux de Moxy, un test Shapiro Wilk sera effectué afin de connaître la normalité du test et par la suite un T test apparié ou un test Wilcoxon sera fait. Ces tests ont été choisis puisque ce sont les mêmes participants qui ont participé aux deux conditions.

➤ **Erreurs à éviter**

Afin de prélever des données exploitables, lors de l'expérimentation, il faudra tout d'abord veiller à ce que les Trigno Galiléo soient correctement collés et sur les bons repères avant le test : un EMG ou un IMU qui se déplace pourrait fausser les résultats. Ensuite, il faudra valider la qualité du squat, s'il n'est pas validé par la vidéo, il ne pourra pas être analysé par la suite, ces mouvements seront donc écartés. Enfin, il faudra être attentif à bien mettre en route tous les logiciels, puisque si l'on oublie un des appareils durant une série, ceci pourrait modifier tous les résultats suivants.

Résultats

➤ Mise en pratique

Lors des expérimentations, les sujets ont effectué tous les squats correctement, mais seul P01 a pu utiliser Moxy puisque l'appareil ne fonctionnait pas pour les autres sujets, et pour P02 la fréquence cardiaque n'a pas été prise. Ensuite, lors de la récolte des résultats EMG avec le logiciel Neuromap, certaines données ne se sont pas téléchargées et d'autres ne s'ouvraient pas dans Neuromap report. Enfin, les données de la flywheel pour la première série de P01 ne se sont pas enregistrées. Les données de ce mémoire sont donc pauvres, ce qui fait de lui une étude préliminaire et des prémices pour une étude avec plus de sujets.

➤ Comparaison des forces générées lors du test

- Force maximale produite

Les données EMG ayant fonctionné dans les 2 conditions seulement pour P04 sur le grand fessier, une analyse intra participant sera effectuée dans la première partie de cette variable.

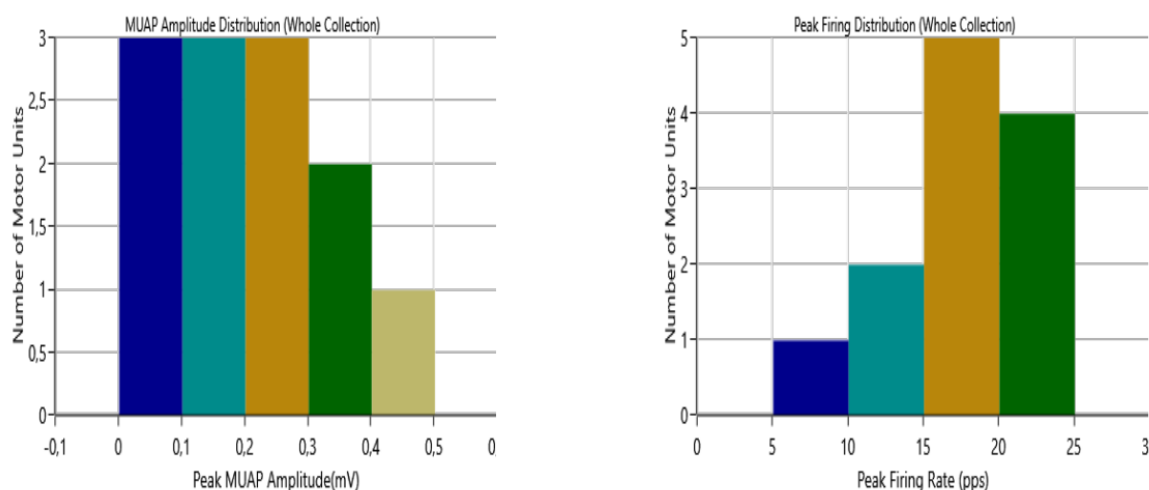


Figure 8 : Graphique du nombre d'unité motrice en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et en fonction du pic d'activité (B) en condition « sans pause » de P04

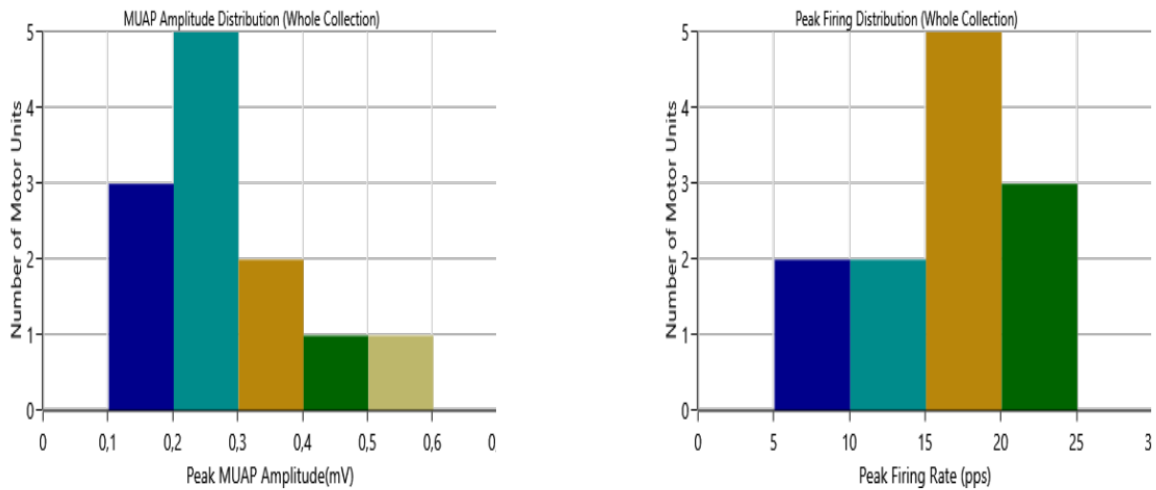


Figure 9 : Graphique du nombre d'unité motrice en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et en fonction du pic d'activité (B) en condition « avec pause » de P04

En comparant les graphiques des 2 conditions, on remarque que le pic d'amplitude MUAP se fait entre 0 et 0,3mV dans la condition « sans pause » avec un pic de 3 unités moteur tandis que dans la condition « avec pause », le pic se fait entre 0,2 et 0,3 avec un pic de 5 unités motrices. Ensuite, lorsque l'on se concentre sur le pic d'activité, on voit que l'activité se fait principalement entre 15 et 25 pps en condition « sans pause » (5 puis 4 unités motrices) et qu'elle se fait entre 15 et 20 pps en condition « avec pause » (5 unités motrices).

Les données retranscrites par la flywheel concernant les moyennes des forces exercées par chacun des sujets durant le mouvement seront analysées ensemble.

	P01	P02	P03	P04	P05	P06
Moyenne Sans pause	909,666667	568,166667	404,222222	496,944444	831,8	576,705882
Moyenne Avec pause	665,888889	630,5	499,666667	435,411765	1093,23529	671,823529
Différence	243,777778	-62,333333	-95,444444	61,5326797	-261,43529	-95,117647
Moyenne NP Générale	631,25098					
Moyenne P Générale	666,087691					
Différence	-34,83671					

Tableau 1 : Tableau représentant les forces moyennes générées par les sujets en fonction des conditions

Paired Samples T-Test					
			statistic	df	p
Pause	Sans pause	Student's t	2.37	101	0.020

Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p
Pause	-	Sans pause	0.959	0.003

Tableau 2 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux conditions

Au regard des résultats, on remarque une différence de force exercée entre les 2 conditions négatives (sans pause – pause) pour tous les participants (sauf pour les participants 1 et 4). La différence de force maximale est significative ($p < 0,05$) entre les deux conditions en faveur de la condition pause (statistic = 2,37).

- Puissance maximale produite

	P01	P02	P03	P04	P05	P06
Moyenne No Pause	327,833333	141,333333	96,0555556	91,9444444	400,066667	183,705882
Moyenne Pause	201,5	135,111111	129,055556	82,0588235	437,823529	197,941176
Différence	126,333333	6,22222222	-33	9,88562092	-37,756863	-14,235294
Moyenne NP G	206,823203					
Moyenne P G	197,248366					
Différence	9,5748366					

Tableau 3 : Tableau représentant les puissances moyennes générées par les sujets en fonction des conditions

Paired Samples T-Test					
			statistic	df	p
Pause	Sans pause	Student's t	-0.524	94.0	0.602

Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p
Pause	-	Sans pause	0.916	< .001

Tableau 4 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux conditions

Lorsque l'on observe les puissances maximales exercées par les sujets, on remarque que la puissance est plus élevée en condition "sans pause" pour les sujets P01, P02 et P04 tandis que pour les autres, elle est plus élevée en condition "avec pause". Lorsque la moyenne des puissances est effectuée, la différence entre les deux conditions est de 9,57W en faveur de la condition "sans pause" mais ces résultats ne sont pas significatifs ($p > 0,05$).

- Comparaisons des forces entre les phases excentrique et concentrique d'un même mouvement

A l'aide du logiciel Neuromap Report les données de performance entre la phase concentrique et excentrique des sujets ont pu être comparées, et tous les résultats montrent une force plus élevée dans la phase excentrique par rapport à la phase concentrique. Le cas P02 a été pris en exemple.

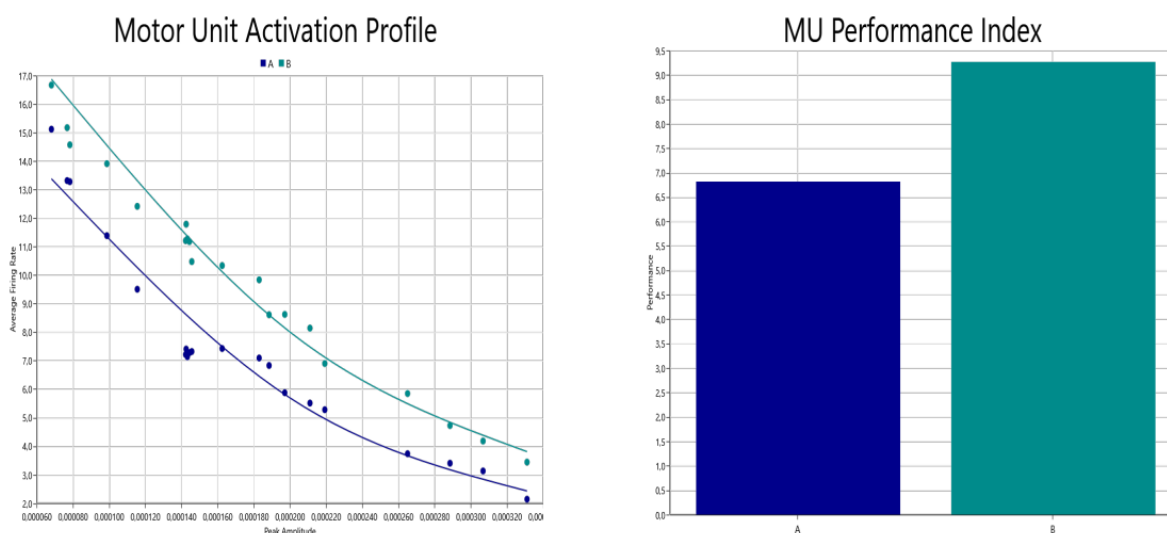


Figure 10 : Graphique du pic d'activité en fonction de l'amplitude du pic MUAP (A) et des différences de performance (B) en condition « avec pause » de P02

On remarque une performance de 6,9 pour la condition A (concentrique) et une performance de 9,3 pour la condition B (excentrique), la différence est donc de 2,4 en faveur de la phase excentrique.

Ensuite, avec les données de la flywheel, les pics de force dans chacune des phases ont été comparés, et une moyenne des pics de tous les sujets a été calculée.

	Concentrique	Excentrique	Différence		D=E-C
Moyenne NP Générale	438,8215686	561,844717	123,023148		Diff = NP-P
Moyenne P Générale	425,2211329	459,084423	33,8632898		
Différence	13,60043573	102,760294	89,1598584		

Tableau 5 : Tableau représentant les différences de forces moyennes générées par les sujets en fonction des phases dans chacune des conditions

Paired Samples T-Test					
			statistic	df	p
Concentrique	Excentrique	Student's t	-7.01	202	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p
Concentrique	-	Excentrique	0.842	< .001

Tableau 6 : Résultats statistiques de la différence de force maximale entre les deux phases concentriques et excentrique

Lorsque l'on observe les résultats une différence significative ($p < 0,001$) de pic de force en faveur de la phase excentrique se fait, avec une différence de 123N en condition sans pause et une différence de 33,9N en condition avec pause.

➤ **Informations sur la charge interne**

- Saturation du muscle en oxygène

La saturation du muscle en oxygène a pu être calculée seulement pour un participant : P01.

Pause / No pause	P1	
	SmO2[%]	THb[THb]
NP1	30,6944447	12,2994446
NP2	47,8428568	12,3807143
NP3	50,5173912	12,3291305
P1	52,9750003	12,381875
P2	54,9315786	12,3900001
P3	56,9437506	12,395
Moyenne NP	43,0182309	12,3364298
Moyenne P	54,9501098	12,3889584
Différence	-11,931879	-0,0525286

Tableau 7 : Tableau représentant les données SmO2 et THb de P01 en fonction des conditions

Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
		Statistic	p				Statistic	p	
Pause SmO2	Sans pause SmO2	Wilcoxon W	6.00	0.250	pause THb	Sans pause THb	Wilcoxon W	6.00	0.250

Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)					
		W	p				W	p	
Pause SmO2	- Sans pause SmO2	0.781	0.071		pause THb	- Sans pause THb	0.909	0.416	

Tableau 8 : Résultats statistiques de la différence de SmO2 (A) et THb (B) entre les deux conditions

Au regard des résultats le pourcentage de SmO2 est de 43% en condition « sans pause » et de 55% en condition « avec pause », le pourcentage est donc plus élevé en condition « avec pause ». Le THb est assez similaire, mais légèrement plus élevé en condition « avec pause ». Les résultats ne sont pas significatifs ($p > 0,05$).

- RPE

	P01	P02	P03	P04	P05	P06
Moyenne NP	8	6,66666667	6,33333333	4,66666667	8	7,33333333
Moyenne P	9	7,33333333	4,33333333	3,33333333	6,66666667	5,66666667
Différence	-1	-0,6666667	2	1,33333333	1,33333333	1,66666667
Moyenne NP G	6,83333333					
Moyenne P G	6,05555556					
Différence	0,77777778					

Tableau 9 : Tableau représentant la RPE moyenne générée par les sujets en fonction des conditions

Paired Samples T-Test					
			statistic	df	p
Sans pause	Pause	Student's t	2.30	17.0	0.035

Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p
Sans pause	-	Pause	0.882	0.028

Tableau 10 : Résultats statistiques de la différence de RPE entre les deux conditions

En observant la RPE des sujets, on peut voir qu'elle varie beaucoup en fonction des sujets, mais elle reste significativement différente ($p < 0,05$) en faveur de la condition « sans pause ».

- FC

	HR[bpm]	RR[ms]
Moyenne NP G	105,551182	729,289593
Moyenne P G	104,953179	597,454878
Différence	0,59800287	131,834715

Tableau 11 : Tableau représentant les puissances moyennes générées par les sujets en fonction des conditions

Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					
		Statistic		p				statistic	df	p
Pause	Sans pause	Wilcoxon W	47.0	0.489	Pause	Sans pause	Student's t	-1.40	14.0	0.183

Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p				W	p
Pause	-	Sans pause	0.909	0.130	Pause	-	Sans pause	0.523	< .001

Tableau 12 : Résultats statistiques de la différence de HR (A) et RR (B) entre les deux conditions

En ce qui concerne la fréquence cardiaque, on remarque une légère différence non significative ($p > 0,05$) de HR en faveur de la condition « sans pause », et une différence non significative ($p > 0,05$) de RR élevée (131,8ms) avec une RR plus élevée pour la condition « sans pause ».

Discussion

Le but de cette étude était de démontrer l'application pratique de la surcharge excentrique en examinant certaines variables dans deux conditions différentes, plaçant la surcharge excentrique à deux moments différents du mouvement. Ceci a été fait dans le but de savoir si la manière d'utiliser la flywheel amplifierait ou non la réponse musculaire et permettrait par la suite de guider l'entraînement plus simplement. Pour cela 3 hypothèses ont été énoncées : la force générée dans la phase excentrique sera plus forte que celle générée dans la phase concentrique, le recrutement des unités motrices sera plus important au moment de la surcharge excentrique et, la RPE et la FC seront plus élevées lorsque la surcharge excentrique sera placée au milieu de la phase excentrique, mais cette condition sera plus coûteuse en énergie. Donc en analysant les données récoltées lors des expérimentations, des résultats sont apparus : une force plus élevée en condition "avec pause", mais une puissance moins élevée dans cette même condition, un pic de force plus élevé dans la phase excentrique que dans la phase concentrique, et la condition "avec pause" plus coûteuse en énergie.

Lors d'un exercice de résistance traditionnel effectué à intensité maximale, la phase excentrique n'est pas exploitée à son maximum mais plusieurs études utilisant des protocoles différents ont montré le rôle important de l'action musculaire excentrique pour l'amélioration des caractéristiques contractiles et l'augmentation de la taille des muscles chez l'homme (**Beato & Dello Iacono, 2020; Kraemer et al., 2002; Petré et al., 2018**). Il est donc cohérent de dire que l'application de la surcharge excentrique pendant un exercice de résistance peut augmenter la capacité de production de force et amplifier les stimuli de croissance (**Beato et al., 2019; K. L. de de Keijzer et al., 2020**). En effet, des études utilisant un entraînement avec une surcharge excentrique à la flywheel montrent de forte augmentation de la production de force (**De Hoyo et al., 2015; K. L. de de Keijzer et al., 2020; K. de Keijzer et al., 2021; Kraemer et al., 2002; Maroto-Izquierdo et al., 2017; Naczki et al., 2016; Norrbrand et al., 2010; Petré et al., 2018**) mais aucune de ces études ne parlent du moment auquel placé la surcharge excentrique. Dans cette étude, le pic de l'amplitude du potentiel d'action (MUAP) est relativement similaire mais dans la condition "avec pause" l'amplitude est légèrement plus élevée et 40% des unités motrices ont une amplitude du pic MUAP placé entre 0,2 et 0,3mV alors que dans la condition "sans pause" 75% des unités motrices sont placés entre 0 et 0,3mV. La littérature apprend que l'amplitude moyenne de l'EMG est significativement plus grande

pendant la phase concentrique que pendant la phase excentrique (**Bollinger, 2022a**), ceci pourrait donc signifier que la phase concentrique a été proportionnellement plus longue pendant la condition “avec pause”. Ensuite, lorsque que l’on se penche sur le pic d’activité des unités motrices on remarque qu’il y a légèrement plus d’unités motrices avec une activité élevée dans la condition “sans pause”, ce qui pourrait s’expliquer par une sollicitation plus élevée des unités motrices notamment lors de la surcharge excentrique. En effet, lors d’un exercice de surcharge excentrique il y a une sollicitation plus élevée des fibres de type IIX et une plus grande activité corticale électromyographique (**Beato & Dello Iacono, 2020; Hody et al., 2019; Maroto-Izquierdo et al., 2017a**). En regardant les forces moyennes de cette étude, on remarque qu’en condition “avec pause” la force exercée par les sujets est significativement plus élevée, ce qui peut s’expliquer par une diminution de la vitesse de la flywheel liée à l’augmentation du moment d’inertie de la flywheel, la réduction de la vitesse verticale et angulaire du genou (**Muñoz-López et al., 2020a**), ceci est au stade d’hypothèse pour le moment et reste à prouver.

A l’origine, la flywheel a été créée pour lutter contre la perte de masse musculaire et de force lors de moment de microgravité tel que les missions spatiales (**Sjöberg et al., 2021**). Il est donc normal que l’efficacité de l’entraînement à la flywheel pour réduire l’atrophie musculaire et le déconditionnement neuromusculaire ait été analysé durant ces dernières années (**Beato & Dello Iacono, 2020; Kraemer et al., 2002; Norrbrand et al., 2010; Petré et al., 2018**). Mais une autre variable importante pour la santé et dont les adaptations sont induites par la flywheel a été testé : la puissance musculaire (**Kraemer et al., 2002; Maroto-Izquierdo et al., 2017a; Naczk et al., 2016**). Cette variable permet également d’augmenter les performances sportives (**Naczk et al., 2016**), notamment dans des sports tels que le vélo, le ski de fond ou encore la course à pied. Les améliorations majeures de cette dernière peuvent s’expliquer par les caractéristiques particulières de l’entraînement à la flywheel induisant une surcharge excentrique généralement appliqué dans la dernière partie de l’amplitude de mouvement de la phase excentrique. L’application de la surcharge excentrique dans un squat normal à la flywheel se produit donc principalement à un angle articulaire proche de 90 degrés lors d’un exercice de squat, juste avant que l’action concentrique suivante ne soit initiée. Cette technique permet donc une plus grande production de force pendant la première partie de la phase concentrique et une vitesse plus élevée du mouvement (**Maroto-Izquierdo et al., 2017a**). Au regard des résultats, dans la condition “sans pause” la puissance musculaire est plus élevée, ce résultat est assez cohérent avec la définition de la puissance qui est lié à la répétition rapide

d'un même mouvement. Ce résultat rejoint également les propos de **Maroto-Izquierdo** mais il faut tout de même nuancer ces propos puisque les résultats de cette étude ne sont pas significatifs.

En se centrant sur les phases du mouvement, on sait qu'il y a une plus grande efficacité mécanique et une plus grande capacité à générer de la force dans les actions d'allongement (excentrique) que de raccourcissement (concentrique) (**Norrbrand et al., 2010**). On remarque, dans cette étude, que le pic de force est plus élevé en phase excentrique que dans la phase concentrique ce qui rejoint les propos de **Presland** disant que les forces générées sont plus importantes durant la phase excentrique (**Presland et al., 2020**) et valide l'hypothèse de départ. De nombreuses études suggèrent que les exercices en résistance implémentant une surcharge excentrique induisent des augmentations de force plus importantes que l'entraînement avec une charge constante pendant l'action concentrique uniquement ou lors d'action couplées concentrique/excentrique (**Norrbrand et al., 2008**). Ces bénéfices pourraient être liés notamment à la typologie musculaire puisque lors d'exercice en excentrique les fibres de type IIX sont les plus recrutées (**Beato et al., 2021**). Si l'on fait à nouveau un focus sur les phases du mouvement, on apprend que l'amplitude moyenne de l'EMG est significativement plus grande pendant la phase concentrique que pendant la phase excentrique pour le vaste latéral (VL) et le vaste médial (VM) mais pas pour le droit fémoral (RF) (**Bollinger, 2022a**). Ces résultats ne sont pas tout à fait en accord avec les résultats de cette étude, puisqu'ici la performance liée à l'amplitude moyenne de l'EMG et à la moyenne du pic d'activité des motoneurons est supérieure durant la phase excentrique par rapport à la phase concentrique.

Lors d'un exercice physique, il est intéressant de regarder le coût en oxygène. En effet, l'oxygénation musculaire est une mesure du pourcentage d'hémoglobine totale qui transporte l'oxygène dans les capillaires d'un tissu musculaire, elle permet de mesurer localement la saturation en oxygène qui est influencée par le flux sanguin musculaire, l'intensité de l'exercice et les modifications de la courbe de dissociation de l'oxygène de l'hémoglobine. La mesure qui en résulte est SmO_2 , permettant de voir la condition la moins coûteuse en O_2 et par conséquent la plus efficace à ce niveau. Cette approche diffère des approches mécaniques, de force vu précédemment et amène une explication liée au stress physiologique et venant du muscle squelettique. La fonction principale de ce muscle est de se contracter et de produire un mouvement des articulations : activité très énergivore, il faut donc un flux sanguin élevé pour fournir de l'oxygène et éliminer efficacement les déchets métaboliques, principalement lors

d'un exercice physique de haute intensité tels qu'un exercice en excentrique. Dans cette étude, la condition "sans pause" à un pourcentage SmO₂ plus élevé, donc est plus coûteuse en énergie que la condition "avec pause", ceci peut s'expliquer par le fait que le muscle est toujours en mouvement et n'a pas un moment pour récupérer tandis que dans la condition "avec pause" le muscle à un très léger moment de répit. Une autre hypothèse peut apparaître, en effet on sait que plus il y a de force maximale produite plus le %SmO₂ va être élevé (**Timon Andrada et al., 2017**), mais cette hypothèse est en désaccord avec les résultats de force trouvés précédemment montrant une force produite plus élevée pour la condition "avec pause". Les résultats concernant la SmO₂ sont à nuancer puisque les tests ont été réalisés seulement sur un sujet et ne sont pas significatifs. Ensuite, certains appareils portables ne pouvant pas directement mesurer le débit sanguin, mesurent le taux d'hémoglobine globale appelé THb, c'est une mesure du volume sanguin et non du débit sanguin. Malheureusement cette mesure ne permet pas de déterminer si l'augmentation du volume sanguin est due à une occlusion veineuse, à une vasodilatation hypoxique ou à une combinaison des deux. Au regard des résultats c'est la condition "avec pause" qui a le THb le plus élevé mais la différence est minime et non significative. Ces résultats sont tout de même en accord avec l'hypothèse de départ disant qu'en plaçant la surcharge excentrique au milieu du mouvement le coût énergétique serait plus élevé.

Lorsque que l'on parle d'entraînement en excentrique notamment avec surcharge excentrique, on pense souvent aux courbatures qui suivront, aux douleurs musculaires d'apparition retardées (DOMS) et à la douleur ressentie lors de l'exercice. En effet, après un exercice avec surcharge excentrique, notamment lors du premier entraînement, il y a une augmentation transitoire des marqueurs moléculaires locaux et circulants de l'inflammation et des dommages musculaires tels que la créatine kinase et la lactate déshydrogénase qui apparaissent (Beato & Dello Iacono, 2020). Il faut savoir que lorsqu'un athlète souffre de DOMS il est souvent incapable de s'entraîner à intensité maximale dans les jours suivants ce qui peut compromettre la qualité des programmes d'entraînement. Même si les conséquences fonctionnelles négatives des dommages musculaires induits par l'exercice sont transitoires et peuvent être bénéfiques par la suite, il semble important d'éviter leur apparition notamment si l'athlète à des compétitions importantes par la suite. Il est également recommandé de ne pas effectuer d'exercice à haute intensité, en particulier explosif, puisque ceci augmente le risque de blessures telles que les déchirures musculaires ou les ruptures ligamentaires en raison de la perturbation de la fonction musculaire et de la fragilité mécanique (**Hody et al., 2019**). L'entraîneur doit donc être vigilant

lorsqu'il prépare le programme d'entraînement. Des solutions existent afin de guider les décisions concernant le volume d'exercice approprié, par exemple il est intéressant de faire des mesures en temps réel des résultats mécaniques (**Sabido et al., 2018**). La RPE est un indicateur subjectif de la difficulté de l'exercice, de son intensité mais aussi de la fatigue accumulée par l'athlète. Pour cela il est intéressant de le coupler à un indicateur de la charge interne tel que la fréquence cardiaque comportant HR et RR. Dans cette étude la RPE est légèrement plus élevée dans la condition "sans pause", ceci peut s'expliquer puisque dans cette condition c'est la vitesse d'exécution qui est le facteur prédominant et lorsque l'on parle d'entraînement basé sur la vitesse, il est suggéré qu'une perte de vitesse plus élevée dans l'ensemble entraînera une fatigue aiguë plus élevée (**González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010**), la vitesse d'exécution étant plus rapide dans la condition "sans pause", la vitesse diminue plus rapidement. Mais ceci peut également s'expliquer par le profil des sujets, leur ressenti et l'ordre d'exécution des conditions. En regardant les résultats HR et RR on remarque qu'ils sont plus élevés en condition "sans pause" ce qui rejoint les données RPE. Ces résultats contredisent l'hypothèse de départ disant que lorsque la surcharge excentrique est placée au milieu de la phase excentrique la RPE et la FC seront plus élevés, ces résultats sont tout de même à nuancer puisque la RPE est influencée par l'ordre de passage (le second passage a toujours la RPE la plus forte) et les résultats HR et RR ne sont pas significatifs.

Certaines limites sont apparues tout au long de cette étude. En effet, peu d'athlètes y ont participé (6) et de nombreux problèmes liés aux appareils utilisés sont apparus tout au long des expérimentations, mais la taille de l'échantillon a pu être légèrement atténuée par l'augmentation du nombre de mouvements qui était de 18 par condition et par participant. Cette étude reste tout de même une étude préliminaire avec l'objectif d'écrire un papier sur un panel de personnes plus grand et avec une présence plus importante de variables biomécanique afin de supporter les résultats physiologiques présents dans cette étude. Durant cette étude seul un capteur sur les deux a pu être récolté par Neuromap, et ce logiciel n'a pu ouvrir tous les fichiers récoltés, ce qui réduit à nouveau le panel des résultats récoltés. Ensuite, il faut savoir que la validation éthique a mis du temps à arriver, réduisant le temps pour faire les expérimentations et récolter les données à 2 semaines. Enfin, les sujets ne sont pas tous sportifs et ne sont pas habitués à la flywheel malgré la familiarisation avant les tests, les athlètes ne maîtrisent pas totalement l'outil ce qui entraîne des pauses non voulues durant le test, des petites chutes et des squats souvent difficiles à exécuter correctement. De plus, il est difficile d'évaluer son ressenti quand on ne se sent pas à l'aise sur un outil. Il pourrait donc être intéressant de faire l'étude sur

des sujets connaissant, maîtrisant cet outil et sur des sujets ayant une condition physique adaptée à ce genre d'entraînement.

Conclusion

Cette étude a démontré que la surcharge excentrique est importante pour les adaptations physiologiques et la production de force, éléments nécessaires dans de nombreux sports. La force est plus importante dans la phase excentrique du mouvement, notamment au moment de la surcharge excentrique. Maintenant la question du placement de la surcharge excentrique dans le mouvement reste à creuser puisque l'on a vu que la force maximale était plus élevée lorsque la surcharge excentrique était placée au milieu de la phase excentrique (condition avec pause) mais que la puissance était plus importante lorsque la surcharge excentrique était à la fin de la phase excentrique (condition sans pause). Ensuite, la RPE et la FC sont plus importantes lorsque la surcharge excentrique se place à la fin du mouvement mais cet exercice est potentiellement moins coûteux en énergie.

Le placement de la surcharge excentrique pourrait donc se faire en fonction des qualités que l'on cherche à développer. Ces propos sont tout de même à nuancer puisque tous les résultats ne sont pas significatifs et ne sont donc qu'une indication sur des résultats probables. Il pourrait donc être intéressant de faire ces expérimentations sur un panel de sujet sportif en ajoutant des indicateurs biomécaniques rapportant des données sur l'angulation exacte du genou au moment de la surcharge excentrique, sur la vitesse d'exécution du mouvement et sur la fatigue du sujet. En effet c'est l'accumulation de facteurs différents jouant sur un mouvement qui entraîne des adaptations physiologiques et une amélioration de la performance sportive.

Synthèse de l'opportunité sportive et de l'opportunité scientifique

Cette étude arrive dans un contexte où les professionnels sportifs tels que les entraîneurs et les chercheurs se questionnent sur l'intérêt de la flywheel comme outil d'entraînement mais aussi dans un contexte où ils cherchent à améliorer la performance des sportives rapidement, efficacement, avec des outils faciles à utiliser et transportables. De nos jours se sont les détails qui font la différence au vue des performances des athlètes meilleures de jour en jour, des records dans de nombreux sports dépassés. La surcharge excentrique est notamment un des éléments permettant de nombreuses adaptations physiologiques et donc d'augmenter la performance sportive, ceci peut être travailler à l'aide de la flywheel évitant le déplacement de poids lourd, de faire l'exercice avec un assureur et d'avoir besoin d'un grand espace. Cet outil permet également à l'athlète de réguler son propre entraînement et de donner le tempo, chaque répétition peut donc être faite à intensité maximum, se fait avec une surcharge excentrique et s'adapte à l'état de forme de l'athlète. Il est donc important de savoir à quel moment il est plus efficace de placer la surcharge excentrique. La problématique s'inscrit dans une démarche de performance. Comprendre le fonctionnement de la flywheel permettra un entraînement plus adapté à l'athlète et donc une amélioration des performances plus élevée. Les différentes variables liées à la performance pourront être observées grâce à du matériel scientifique (capteurs, flywheel, caméra...) des laboratoires M2S et de l'université de Newcastle mais de nombreux outils de récoltes des données seront nécessaires, ceci amène une contrainte supplémentaire puisqu'il sera nécessaire de faire les expérimentations dans un laboratoire possédant une flywheel et tous les logiciels nécessaires aux expérimentations. Cette problématique fait le lien entre les processus sportif et scientifique, avec l'analyse des données scientifiques dans le but d'améliorer les performances des athlètes. C'est une problématique de terrain permettant d'améliorer la compréhension d'un outil pouvant améliorer la performance des athlètes. Ce protocole va permettre un retour scientifique et plus précis sur l'intérêt réel de la flywheel, et de savoir sur quelle variable il va falloir se centrer par la suite.

Les mesures seront faites sur un panel de sujet disponible pour les manipulations, pouvant se déplacer au laboratoire et n'ayant pas de contraintes sportives dans les jours suivants l'expérimentation. Afin de ne pas être trop contraignant au vu des emplois du temps des sujets, le protocole ne sera pas trop lourd, il n'y aura besoin de venir au laboratoire qu'une fois pour

une durée de 2h maximum, l'athlète a besoin de seulement assister à sa manipulation. Le protocole ne sera pas pénible à mettre en place pour les sujets puisque ce sont les chercheurs qui installent le matériel et les capteurs sur le sujet. Une validation éthique du protocole est également nécessaire afin de démarrer les expérimentations en toute sécurité.

Dans ce protocole des points forts ressortent. En effet, il sera rapide de récolter les données des EMG, il y aura également une meilleure comparaison des données puisque le protocole sera le même pour tous les sujets, il y aura aussi un nombre de mouvements limités, et une randomisation du sens des mouvements à effectuer pour éliminer le facteur fatigue. Ensuite, le protocole est basé sur des séances types d'entraînement au Flywheel et donc se rapproche le plus possible de la réalité. Mais ce protocole a tout de même des points faibles puisque l'on ne peut pas prédire l'état de forme des athlètes durant l'expérimentation. L'utilisation de la Flywheel posera également problème, il ne faut pas que la non-maîtrise de l'appareil par le sujet impacte les données. De plus, il faut bien placer les EMG et les placer exactement au même endroit pour tous les sujets. Enfin, l'athlète doit forcément commencer par une condition et aura donc accumulé de la fatigue pour le deuxième mouvement malgré la randomisation des données ceci peut fausser les résultats.

Un formulaire de consentement est signé par les athlètes avant d'effectuer l'expérimentation afin d'expliquer la mesure, le risque encouru par l'athlète, les bénéfices généraux et individuels.

Bibliographie

- Allen, W., de Keijzer, K., Raya-González, J., Castillo, D., Coratella, G., & Beato, M. (2021). Chronic effects of flywheel training on physical capacities in soccer players : A systematic review. *Research in Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1080/15438627.2021.1958813>
- Arsenis, S., Gioftsidou, A., Smilios, I., Malliou, P., & Chatzinikolaou, A. (2020). The effect of periodized flywheel training on power of lower limbs. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 61. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.11940-6>
- Askling, C., Karlsson, J., & Thorstensson, A. (2003). Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(4), 244-250. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00312.x>
- Balsalobre-Fernández, C., & Torres-Ronda, L. (2021). The Implementation of Velocity-Based Training Paradigm for Team Sports : Framework, Technologies, Practical Recommendations and Challenges. *Sports*, 9, 47. <https://doi.org/10.3390/sports9040047>
- Beato, M., Bigby, A. E. J., Keijzer, K. L. D., Nakamura, F. Y., Coratella, G., & McErlain-Naylor, S. A. (2019). Post-activation potentiation effect of eccentric overload and traditional weightlifting exercise on jumping and sprinting performance in male athletes. *PLOS ONE*, 14(9), e0222466. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222466>
- Beato, M., De Keijzer, K. L., Leskauskas, Z., Allen, W. J., Dello Iacono, A., & McErlain-Naylor, S. A. (2021). Effect of Postactivation Potentiation After Medium vs. High Inertia Eccentric Overload Exercise on Standing Long Jump, Countermovement Jump, and Change of Direction Performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(9), 2616-2621. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003214>
- Beato, M., & Dello Iacono, A. (2020). Implementing Flywheel (Isoinertial) Exercise in Strength Training : Current Evidence, Practical Recommendations, and Future Directions. *Frontiers in Physiology*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2020.00569>
- Beato, M., McErlain-Naylor, S. A., Halperin, I., & Iacono, A. D. (2020). Current Evidence and Practical Applications of Flywheel Eccentric Overload Exercises as Postactivation Potentiation Protocols : A Brief Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(2), 154-161. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0476>
- Blanco, F., & Loturco, I. (2022). *Velocity-Based Training for Monitoring Training Load and Assessing Training Effects* (p. 153-179). https://doi.org/10.1007/978-3-030-81989-7_9

- Bollinger, L. (2022). Effects of Relative Inertial Load on Quadriceps Electromyography during Maximal Effort Flywheel-based Iso-Inertial Training (FIT) Squats. *International Journal of Strength and Conditioning*, 2. <https://doi.org/10.47206/ijsc.v2i1.123>
- Bollinger, L., Brantley, J., Carpenter, R., Haydon, M., Best, S., Abel, M., & Abbasi, Z. (2022). Quadriceps electromyography during flywheel-based inertial training (FIT) and dynamic constant external resistance (DCER) squats at similar tempo. *Sports Biomechanics*. <https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2071330>
- Carroll, K. M., Wagle, J. P., Sato, K., Taber, C. B., Yoshida, N., Bingham, G. E., & Stone, M. H. (2019). Characterising overload in inertial flywheel devices for use in exercise training. *Sports Biomechanics*, 18(4), 390-401. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1433715>
- Dahlin, M. (2018). *The use of velocity-based training in strength and power training- A systematic review*.
- De Hoyo, M. de, Pozzo, M., Sañudo, B., Carrasco, L., Gonzalo-Skok, O., Domínguez-Cobo, S., & Morán-Camacho, E. (2015). Effects of a 10-Week In-Season Eccentric-Overload Training Program on Muscle-Injury Prevention and Performance in Junior Elite Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(1), 46-52. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0547>
- De Hoyo, M., Sanudo, B., Carrasco Páez, L., Domínguez-Cobo, S., Mateo-Cortes, J., Cadenas-Sánchez, M., & Nimphius, S. (2015). Effects of Traditional Versus Horizontal Inertial Flywheel Power Training on Common Sport-Related Tasks. *Journal of human kinetics*, 47, 155-167. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0071>
- de Keijzer, K. L. de, McErlain-Naylor, S. A., Iacono, A. D., & Beato, M. (2020). Effect of Volume on Eccentric Overload–Induced Postactivation Potentiation of Jumps. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(7), 976-981. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0411>
- de Keijzer, K., McErlain-Naylor, S., Brownlee, T., Raya-González, J., & Beato, M. (2021). Perception and application of flywheel training by professional soccer practitioners. *Biology of Sport*. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2022.109457>
- de Keijzer, K., Raya-González, J., & Beato, M. (2022). The effect of flywheel training on strength and physical capacities in sporting and healthy populations : An umbrella review. *PLOS ONE*, 17, e0264375. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264375>
- Flández, J., Gene-Morales, J., Jueas, Á., Saez-Berlanga, Á., Miñana, I., & Colado, J. C. (2021). A systematic review on the muscular activation on the lower limbs with five different variations of the deadlift exercise. *Journal of Human Sport and Exercise*, 15, S1262-S1276. <https://doi.org/10.14198/jhse.2020.15.Proc4.27>

- Fritschi, R., Seiler, J., & Gross, M. (2021). Validity and Effects of Placement of Velocity-Based Training Devices. *Sports*, 9, 123. <https://doi.org/10.3390/sports9090123>
- Frontera, W. R., & Bigard, X. (2002). The benefits of strength training in the elderly. *Science & Sports*, 17(3), 109-116. [https://doi.org/10.1016/S0765-1597\(02\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0765-1597(02)00135-1)
- García Gutiérrez, M. T., Lunberg, T. R., Mandic, M., Lilja, M., & Fernandez Gonzalo, R. (2019). Regional and muscle-specific adaptations in knee extensor hypertrophy using flywheel versus conventional weight-stack resistance exercise. *Revista: Applied Physiology, Nutrition and Metabolism, Periodo: 3, Volumen: 44, Número: 8, Página Inicial: 1, Página Final: 7*. <https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0774>
- González-Badillo, J. J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement Velocity as a Measure of Loading Intensity in Resistance Training. *International Journal of Sports Medicine*, 34(3), 347-352. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248333>
- Hody, S., Croisier, J.-L., Bury, T., Rogister, B., & Leprince, P. (2019). Eccentric Muscle Contractions : Risks and Benefits. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00536>
- Kraemer, W. J., Kent Adams, P. D., & Enzo. (2002). Progression Models in Resistance Training for Healthy Adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(2), 364-380.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of Resistance Training : Progression and Exercise Prescription: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(4), 674-688. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000121945.36635.61>
- Lee, S., Schultz, J., Timgren, J., Staelgraeve, K., Miller, M., & Liu, Y. (2018). An electromyographic and kinetic comparison of conventional and Romanian deadlifts. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2018.08.001>
- Maroto Izquierdo, S., McBride, J., Gonzalez, N., García-López, D., González-Gallego, J., & de paz, jose antonio. (2022). Comparison of Flywheel and Pneumatic Training on Hypertrophy, Strength, and Power in Professional Handball Players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 93. <https://doi.org/10.1080/02701367.2020.1762836>
- Maroto-Izquierdo, S., García-López, D., Fernandez-Gonzalo, R., Moreira, O. C., González-Gallego, J., & de Paz, J. A. (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*, 20(10), 943-951. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.03.004>
- Maroto-Izquierdo, S., García-López, D., & Paz, J. A. de. (2017). Functional and Muscle-Size Effects of Flywheel Resistance Training with Eccentric-Overload in Professional Handball Players. *Journal of Human Kinetics*, 60(1), 133-143. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0096>

- Martin-Rivera, F., Beato, M., Alepuz-Moner, V., & Maroto Izquierdo, S. (2022). Use of concentric linear velocity to monitor flywheel exercise load. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.961572>
- McErlain-Naylor, S. A., & Beato, M. (2021). Concentric and eccentric inertia–velocity and inertia–power relationships in the flywheel squat. *Journal of Sports Sciences*, 39(10), 1136-1143. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1860472>
- Meyer, K., Steiner, R., Lastayo, P., Lippuner, K., Allemann, Y., Eberli, F., Schmid, J., Saner, H., & Hoppeler, H. (2003). Eccentric Exercise in Coronary Patients : Central Hemodynamic and Metabolic Responses. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(7), 1076-1082. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000074580.79648.9D>
- Morencos, E., González-Frutos, P., Rivera, C., & Veiga, S. (2022). Effects of Six Weeks of Flywheel Single-Leg Romanian Deadlift Training on Speed, Jumping and Change of Direction Performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 1200. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031200>
- Muñoz-López, A., Floria, P., Sanudo, B., Pecci, J., Pérez, J., & Pozzo, M. (2021). The Maximum Flywheel Load : A Novel Index to Monitor Loading Intensity of Flywheel Devices. *Sensors*, 21, 8124. <https://doi.org/10.3390/s21238124>
- Muñoz-López, A., Fonseca, F., Ramirez-Campillo, R., Gantois, P., Nuñez, F., & Nakamura, F. (2020). The use of real-time monitoring during flywheel resistance training programs : How can we measure the eccentric overload? A systematic review and meta-analysis. *Biology of Sport*.
- Muñoz-López, A., Galiano, C., Nuñez, F., & Floría, P. (2022). The Flywheel Device Shaft Shape Determines Force and Velocity Profiles in The Half Squat Exercise. *Journal of Human Kinetics*, 81, 15-25. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0002>
- Muñoz-López, A., Pozzo, M., & Floria, P. (2021). Real-time mechanical responses to overload and fatigue using a flywheel training device. *Journal of Biomechanics*, 121, 110429. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110429>
- Naczka, M., Naczka, A., Brzenczek-Owczarzak, W., Arlet, J., & Adach, Z. (2016). Impact of Inertial Training on Strength and Power Performance in Young Active Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2107-2113. <https://doi.org/10.1097/JSC.0000000000000217>
- Norrbrand, L., Fluckey, J. D., Pozzo, M., & Tesch, P. A. (2008). Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *European Journal of Applied Physiology*, 102(3), 271-281. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0583-8>

- Norrbrand, L., Pozzo, M., & Tesch, P. A. (2010). Flywheel resistance training calls for greater eccentric muscle activation than weight training. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 997-1005. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1575-7>
- Norrbrand, L., Tous, J., Vargas, R., & Tesch, P. (2011). Quadriceps Muscle Use in the Flywheel and Barbell Squat. *Aviation, space, and environmental medicine*, 82, 13-19. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2867.2011>
- Overend, T. J., Versteegh, T. H., Thompson, E., Birmingham, T. B., & Vandervoort, A. A. (2000). Cardiovascular Stress Associated With Concentric and Eccentric Isokinetic Exercise in Young and Older Adults. *The Journals of Gerontology: Series A*, 55(4), B177-B182. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.4.B177>
- Petré, H., Wernstål, F., & Mattsson, C. M. (2018). Effects of Flywheel Training on Strength-Related Variables : A Meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, 4(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0169-5>
- Pino Ortega, J., Belmonte, A., Bastida-Castillo, A., Gómez-Carmona, C., & Rojas-Valverde, D. (2022). Accuracy and Reliability of Inertial Devices for Load Assessment During Flywheel Workout. *MHSALUD Revista en Ciencias del Movimiento Humano y Salud*, 19, 1-11. <https://doi.org/10.15359/mhs.19-1.1>
- Presland, J. D., Opar, D. A., Williams, M. D., Hickey, J. T., Maniar, N., Lee Dow, C., Bourne, M. N., & Timmins, R. G. (2020). Hamstring strength and architectural adaptations following inertial flywheel resistance training. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(11), 1093-1099. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.04.007>
- Raeder, C., Wiewelhove, T., Westphal-Martinez, M. P., Fernandez-Fernandez, J., de Paula Simola, R. A., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Ferrauti, A. (2016). Neuromuscular Fatigue and Physiological Responses After Five Dynamic Squat Exercise Protocols. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(4), 953-965. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001181>
- Rahmani, A., Samozino, P., Morin, J.-B., & Morel, B. (s. d.). A Simple Method for Assessing Upper-Limb Force–Velocity Profile in Bench Press. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 200-207. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0814>
- Raya-González, J., de Keijzer, K., bishop, C., & Beato, M. (2020). *Effects of flywheel training on strength-related variables in female populations. A systematic review.* <https://doi.org/10.31236/osf.io/b75z9>
- Riscart López, J., Rendeiro Pinho, G., Mil-Homens, P., Soares-daCosta, R., Loturco, I., Blanco, F., & León-Prados, J. (2020). Effects of Four Different Velocity-Based Training Programming

Models on Strength Gains and Physical Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003934>

Sabido, R., Hernández-Davó, J., Capdepon, L., & Tous, J. (2020). How Are Mechanical, Physiological, and Perceptual Variables Affected by the Rest Interval Between Sets During a Flywheel Resistance Session? *Frontiers in Physiology, 11*, 663. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00663>

Sabido, R., Hernández-Davó, J. L., & Pereyra-Gerber, G. T. (2018). Influence of Different Inertial Loads on Basic Training Variables During the Flywheel Squat Exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 13*(4), 482-489. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0282>

Sjöberg, M., Eiken, O., Norrbrand, L., Berg, H., & Gutierrez-Farewik, E. (2021). Lumbar Loads and Muscle Activity During Flywheel and Barbell Leg Exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004163>

Spudić, D., Pori, P., & Smajla, D. (2020). *EMG-force relationship during squats by increasing the Flywheel load – pilot study*. 68, 155-160.

Spudić, D., Smajla, D., & Sarabon, N. (2020). Intra-session reliability of electromyographic measurements in flywheel squats. *PLoS ONE, 15*, 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243090>

Spudić, D., Smajla, D., & Šarabon, N. (2020). Validity and reliability of force–velocity outcome parameters in flywheel squats. *Journal of Biomechanics, 107*, 109824. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109824>

Stojanovic, M., Mikić, M., Drid, P., Calleja Gonzalez, J., Maksimovic, N., Belegišanin, B., & Sekulović, V. (2021). Greater Power but Not Strength Gains Using Flywheel Versus Equivolumed Traditional Strength Training in Junior Basketball Players. *International Journal of Environmental Health Research, 18*, 1181. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031181>

Suarez-Arrones, L., Núñez, F. J., Lara-Lopez, P., Salvo, V. D., & Méndez-Villanueva, A. (2020). Inertial flywheel knee- and hip-dominant hamstring strength exercises in professional soccer players : Muscle use and velocity-based (mechanical) eccentric overload. *PLOS ONE, 15*(10), e0239977. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239977>

Tesch, P. A., Fernandez-Gonzalo, R., & Lundberg, T. R. (2017). Clinical Applications of Iso-Inertial, Eccentric-Overload (YoYo™) Resistance Exercise. *Frontiers in Physiology, 8*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2017.00241>

- Timon Andrada, R., Ponce-González, J., Gonzalez Montesinos, J., Olcina, G., Perez Bey, A., & Castro-Piñero, J. (2017). Inertial flywheel resistance training and muscle oxygen saturation. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07793-3>
- Vicens-Bordas, J., Esteve, E., Fort-Vanmeerhaeghe, A., Bandholm, T., & Thorborg, K. (2018). Is inertial flywheel resistance training superior to gravity-dependent resistance training in improving muscle strength? A systematic review with meta-analyses. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.10.006>
- Włodarczyk, M., Adamus, P., Zieliński, J., & Kantanista, A. (2021). Effects of Velocity-Based Training on Strength and Power in Elite Athletes—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 5257. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105257>
- Worcester, K. S., Baker, P. A., & Bollinger, L. M. (2022). Effects of Inertial Load on Sagittal Plane Kinematics of the Lower Extremity During Flywheel-Based Squats. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(1), 63. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003415>

Résumé

Cette étude a été faite dans le but de mieux comprendre l'intérêt d'un outil tel que la flywheel et surtout à quel moment il était conseillé de placer la surcharge excentrique, dans le but d'améliorer l'entraînement avec une surcharge excentrique et donc la performance sportive.

Ceci a été démontré grâce à l'utilisation de capteur Trigno Galileo dans un exercice de squat comportant deux conditions plaçant la surcharge excentrique à la fin de la phase excentrique et au milieu de la phase excentrique. Plusieurs variables ont été observées telles que la force et la puissance générées, les pics de force dans les différentes phases ou encore la RPE, la saturation en oxygène et la fréquence cardiaque. Ce protocole a été réalisé sur 6 sujets, 3 femmes et 3 hommes, pratiquant du sport mais pas familiariser avec l'outil. Les données une fois récoltées ont été généralisées afin de se centrer essentiellement sur l'importance de la flywheel et non sur les performances individuelles.

Donc en analysant les données récoltées lors des expérimentations, des résultats sont apparus : la force est plus importante dans la phase excentrique que dans la phase concentrique, notamment au niveau de la surcharge excentrique, la force générée est plus importante lorsque la surcharge excentrique se place au milieu de la phase excentrique tandis que la puissance est plus importante quand elle se place à la fin de la phase excentrique, la RPE et la FC sont plus importantes lorsque la surcharge excentrique se place à la fin du mouvement mais cet exercice est potentiellement moins coûteux en énergie.

Ces résultats jouent un rôle dans l'utilisation de la flywheel et permettent par la suite de créer des programmes plus spécifiques aux qualités voulant être développées par l'athlète.

Mots clés : flywheel, surcharge excentrique, force musculaire, puissance musculaire

Abstract

This study was made with the aim of better understanding the interest of a tool such as the flywheel and especially when it was advisable to place the eccentric overload, with the aim of improving training with an eccentric overload and therefore sports performance.

This was demonstrated through the use of the Trigno Galileo sensor in a squat exercise with two conditions placing the eccentric overload at the end of the eccentric phase and in the middle of the eccentric phase. Several variables were observed such as the force and power generated, the force peaks in the different phases or even the RPE, oxygen saturation and heart rate. This protocol was carried out on 6 subjects, 3 women and 3 men, practicing sports but not familiar with the tool. The data once collected was generalized to focus primarily on the importance of the flywheel and not on individual performance.

So by analysing the data collected during the experiments, results appeared: the force is greater in the eccentric phase than in the concentric phase, in particular at the level of the eccentric overload, the force generated is greater when the eccentric overload takes place in the middle of the eccentric phase while the power is greater when it is placed at the end of the eccentric phase, the RPE and the HR are more important when the eccentric overload is placed at the end of the movement but this exercise is potentially less costly in terms of energy.

These results play a role in the use of the flywheel and allow then to create programs more specific to the qualities that the athlete wants to develop.

Keywords: flywheel, eccentric overload, muscle strength, muscle power