

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

EFFETS AIGUS DE LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE SUR LA
PERFORMANCE DES LANCEURS DE BASEBALL

MÉMOIRE DE RECHERCHE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
MATHIEU TREMBLAY

JUIN 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Direction de recherche

Martin Descarreaux

Prénom et nom

Directeur de recherche

Jacques Abboud

Prénom et nom

Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Jacques Abboud

Codirecteur de recherche

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Laurie-Ann Corbin-Berrigan

Évaluateur externe

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Martin Lavallière

Évaluateur externe

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Table des matières

Résumé.....	4
Abréviations.....	6
Remerciements.....	7
1. Introduction.....	9
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	11
2. Définition des concepts.....	11
2.1 Le lancer au baseball.....	11
2.2 Facteurs individuels de la performance chez les lanceurs de baseball.....	12
2.3 Fatigue neuromusculaire.....	14
2.3.1 Définition.....	14
2.3.2 Influence de la tâche et des caractéristiques physiques de l'individu lors de la fatigue neuromusculaire.....	16
2.3.3 Effets de la fatigue et des dommages musculaires causés par l'exercice chez les lanceurs de baseball.....	18
2.4 Compromis vitesse-précision.....	22
3. Problématique.....	25
4. Objectifs et hypothèses.....	27
5. Article.....	28
Abstract.....	29
Introduction.....	30
Methods.....	33
Statistical analysis.....	41
Results.....	42
Discussion.....	54
Conclusion.....	58
6. Discussion.....	59
6.1. Rappel de l'objectif.....	59

6.2. Retour sur les principaux résultats	59
6.3. Outils de quantification de la fatigue neuromusculaire chez les lanceurs de baseball	61
6.4. Impact de la fatigue centrale et périphérique sur la diminution de la performance des lancers	63
6.5. Perturbations sensorimotrices lors de lancers répétés au baseball	65
6.6. Les mesures de contrôle de mouvement chez les lanceurs de baseball en lien avec la tâche de lancer.....	68
7. Limites	69
8. Implications pratiques	70
9. Perspective de recherches	71
10. Conclusion	72
Références.....	73
ANNEXE A : certification éthique	78

Liste des figures

Figure 1. Les phases du lancer au baseball ; Phase 1 = Élévation et pivot ; Phase 2 = Équilibre et foulée ; Phase 3 = Armement du bras et accélération ; Phase 4 = Décélération ; Phase 5 = Relâchement et suivi. Figure provenant de l'article Mercier et al. (2020).	12
Figure 2. Chaîne de commande la contraction musculaire où la FN centrale et périphérique peuvent survenir. Figure adaptée de Sesboüé & Guincestre (2006).	15
Figure 3. Perspective multifactorielle de la fatigue neuromusculaire adaptée de Williams & Ratel (2009).	17
Figure 4. Cadre théorique adaptée de l'étude de Birfer et al. (2019) représentant la relation entre la FN, les facteurs individuels de la performance et les DME. * Amplitude de mouvement	21
Figure 5. Schematic experimental set up	35
Figure 6. Dominant arm grip strength evolution across pitching blocks.	47
Figure 7. Perceived muscle soreness measures evolution per muscle sites.	48
Figure 8. Pitching velocity evolution across pitching blocks.	51
Figure 9. Release height evolution across pitching blocks.	52
Figure 10. Radial error evolution across pitching blocks (accuracy).	53

Liste des tableaux

Table 1. Pitchers' descriptive profile.	44
Table 2. Results, rANOVA, and percentage change of neuromuscular fatigue and associated measures across blocks.	45
Tableau 3. Results, rANOVA, and percentage change of pitching performances measures across blocks	49

Résumé

Au baseball, la position de lanceur requiert de l'athlète qu'il répète des lancers à capacité maximale, et ce, le plus précisément possible, selon la situation de match et le lancer désiré, afin d'avoir du succès et de retirer les frappeurs qui lui font face. Les données scientifiques actuelles montrent qu'avec la répétition des lancers, on retrouve une augmentation de la fatigue musculaire chez les lanceurs de baseball. Ce phénomène neurophysiologique se définit par la réduction de la capacité d'un muscle ou d'un groupe de muscle à produire de la force ou de la puissance causée par l'exercice physique. Une meilleure compréhension des effets aigus de la fatigue neuromusculaire sur la performance des lanceurs pourrait jouer un rôle clé et potentiellement améliorer l'utilisation de ces derniers tout en prévenant les effets indésirables sur leur performance, par exemple, les blessures musculosquelettiques au bras effectuant les lancers. L'objectif de ce projet était d'étudier les effets de la fatigue neuromusculaire sur les paramètres de la performance chez des lanceurs masculins élités de baseball ($n = 30$, âge = $21,43 \text{ ans} \pm 8,86$). L'expérimentation consistait en une séance de 75 lancers, divisée en 5 blocs de 15 lancers chacun. Les lancers étaient mesurés à l'aide d'un outil technologique nommé *Rapsodo*® permettant de mesurer la vitesse, les rotations et l'axe de la balle lors des lancers au relâchement de la balle par les athlètes ainsi que la distance de relâchement verticale et horizontale. Les lanceurs avaient comme consigne de viser le centre de la cible placée au-dessus du marbre qui leur sert de repère visuel afin d'effectuer les lancers. Avant le premier bloc de lancers, entre chacun des blocs et après le dernier bloc, des

mesures de l'évolution de la force de préhension, du seuil de douleur minimal à la pression mécanique et la perception de raideurs musculaires selon différents sites musculaires des bras dominant et non dominant (fléchisseurs de l'avant-bras, biceps, deltoïde antérieur, trapèze supérieur) étaient mesurées. Les résultats significatifs démontrent un déclin de la vitesse des lancers, de la hauteur de relâchement de la balle et de l'erreur radiale au point de vue de la précision des lancers. De plus, une diminution de la force de préhension moyenne ainsi qu'une augmentation de la perception de raideur musculaire aux muscles fléchisseurs de l'avant-bras, aux biceps, au deltoïde antérieur et trapèze supérieur étaient présentes au bras dominant et non dominant à travers les blocs de lancers chez les lanceurs.

Abréviations

Dommmages musculaires causés par l'exercice (DME)

Fatigue neuromusculaire (FN)

Neuromuscular fatigue (NF)

Système nerveux central (SNC)

Remerciements

La fin de mon parcours à la maîtrise en sciences de l'activité physique représente beaucoup plus qu'un diplôme supplémentaire à mon parcours universitaire. En effet, les deux dernières années à réaliser ce mémoire m'auront permis de m'améliorer autant sur les plans personnels et interpersonnels ainsi que sur mon autonomie à réaliser de la recherche universitaire. Cette réalisation n'aurait pas été possible sans l'aide de plusieurs personnes que je désire remercier.

D'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Professeur Martin Descarreaux. De façon anecdotique, mon parcours en recherche au GRAN s'est amorcé à la suite d'une conversation ensemble dans un sous-sol au centre-ville de Trois-Rivières à entraîner de jeunes athlètes de baseball. Merci de m'avoir donné cette chance aussi tôt dans mon cheminement. Je suis particulièrement reconnaissant et me considère chanceux de pouvoir compter sur ton encadrement et tes conseils afin de cheminer dans le domaine académique.

Ensuite, je désire remercier mon co-directeur, Professeur Jacques Abboud. Merci d'avoir accepté de me co-diriger et d'amener une perspective différente à nos projets sur la performance des lanceurs de baseball. Merci de ta disponibilité et aussi de ta présence fréquente au sein du laboratoire. Je crois que ton parcours à l'intérieur du laboratoire inspire les étudiants présents aux cycles supérieurs et nous permet de croire qu'il est possible d'arriver à nos buts dans le domaine académique.

Pour continuer, je désire remercier mes parents, Carl et Myriam, ainsi que ma sœur, Anne-Sophie, de leur soutien inconditionnel depuis toujours dans tout ce que j'ai entrepris jusqu'à présent, autant sur le plan sportif qu'académique. Je serai à jamais reconnaissant du soutien au fil du temps. Merci également à ma copine Marie-Élisabeth du soutien et de l'accompagnement lors des deux dernières années dans ce parcours à la maîtrise. Nos fins de semaine passées dans des cafés de Trois-Rivières et Sherbrooke en auront valu le coup.

Enfin, je désire remercier mes collègues du laboratoire du GRAN pour les nombreuses discussions (parfois farfelues), les activités sociales et le soutien dans la réalisation de nos différents projets. L'ambiance et l'entraide qui règnent au labo ont clairement eu un rôle à jouer dans la réussite de mon parcours au 2^e cycle.

1. Introduction

Selon le rapport annuel de l'année 2021 de la fédération de Baseball Québec, c'est 33 042 joueurs et joueuses ainsi que 7 538 entraîneurs, regroupés dans 160 associations de baseball mineur et répartis dans 15 régions administratives, qui ont foulé les terrains de baseball sous la supervision et l'encadrement de la fédération à l'été 2021 (Baseball Québec, 2021). Toujours selon ce rapport, la Mauricie est l'une des régions où le sport est en forte croissance et où on retrouvait 1450 inscriptions en 2021 pour une augmentation de 13,35 % comparativement à la saison 2020. Au niveau amateur et élite, on y retrouve des équipes de différents groupes d'âge associées aux organisations régionales telles que les Aigles AA de la Mauricie (11U à 18U), les Estacades de Trois-Rivières AAA (15U et 18U), les Aigles de Trois-Rivières Junior Élite (22U) et les Cascades de Shawinigan de la ligue de baseball majeure du Québec (23 ans et +).

Au baseball, le lanceur remplit un rôle particulier, par son rôle défensif, ainsi que par les caractéristiques et habiletés individuelles requises pour avoir du succès à cette position. Une revue de la portée publiée récemment par les chercheurs du Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques de l'Université du Québec à Trois-Rivières (Mercier, Tremblay, Daneau, & Descarreaux, 2020) a permis d'identifier les mesures de la performance des lanceurs au baseball qui furent définies par la vitesse et la précision des lancers ainsi que par les statistiques individuelles de parties. Cette même revue exploratoire a montré que ces mesures de la performance des lanceurs peuvent être influencées par plusieurs facteurs individuels incluant la cinématique et la

cinétique du mouvement, de mesures anthropométriques ainsi que la performance des lanceurs à des tests physiques, pour n'en nommer que quelques-uns. Cependant, bien que les facteurs énumérés précédemment aient un rôle important dans la performance aiguë d'un lanceur, le facteur neurophysiologique de la fatigue neuromusculaire (Birfer, Sonne, & Holmes, 2019) et le compromis vitesse-précision du contrôle moteur (Freeston, Ferdinands, & Rooney, 2015; Nasu & Kashino, 2021; Schmidt, Lee, Winstein, Wulf, & Zelaznik, 2018) pourraient jouer un rôle dans la capacité à maintenir et répéter la performance à cette position dans une séance de plusieurs lancers.

La prochaine section du mémoire présente une revue de la littérature concernant les facteurs individuels associés à la performance des lanceurs de baseball, les phénomènes physiologiques et mécanismes qui sous-tendent la fatigue neuromusculaire et le compromis vitesse-précision que les lanceurs ont à gérer lors de la répétition des lancers au baseball.

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2. Définition des concepts

2.1 Le lancer au baseball

Au baseball, la séquence du lancer se produit selon cinq phases distinctes : la phase 1 qui consiste en la phase d'élévation et de pivot ; la phase 2 qui consiste en la phase d'équilibre et de foulée ; la phase 3 qui consiste en la phase d'armement du bras et de son accélération ; la phase 4 qui consiste en la phase de décélération et la phase 5 qui consiste en la phase de relâchement et suivi de la balle (Diffendaffer et al., 2023). Sur le plan des facteurs de la cinématique du lancer selon ses phases énumérées, l'adduction horizontale antérieure à l'épaule ainsi que la flexion antérieure de la partie supérieure du tronc (R. Escamilla, Fleisig, Barrentine, Andrews, & Moorman III, 2002; Oyama et al., 2013; Solomito, Garibay, & Nissen, 2018; Stodden, Fleisig, McLean, & Andrews, 2005), la rotation externe maximale à l'épaule (Chen, Liu, & Yang, 2016; R. Escamilla et al., 2002), l'angle de rotation de la partie supérieure du tronc et la latéroflexion du tronc controlatérale au bras lanceur (Oyama et al., 2013; Solomito, Garibay, Woods, Öunpuu, & Nissen, 2015; Stodden, Fleisig, McLean, Lyman, & Andrews, 2001) en terminant par l'angle de flexion du genou en appui à l'atterrissage du pied au sol et l'inclinaison antérieure du tronc (Dun, Fleisig, Loftice, Kingsley, & Andrews, 2007; R. Escamilla et al., 2002; Matsuo, Escamilla, Fleisig, Barrentine, & Andrews, 2001; Oyama et al., 2013; Stodden et al., 2001) sont tous des facteurs associés à une vitesse plus élevée chez les lanceurs de baseball. La figure 1 présente les cinq phases du lancer au baseball.

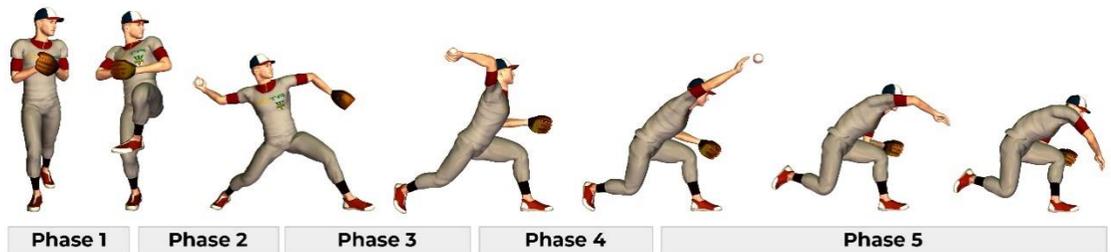


Figure 1. Les phases du lancer au baseball ; Phase 1 = Élévation et pivot ; Phase 2 = Équilibre et foulée ; Phase 3 = Armement du bras et accélération ; Phase 4 = Décélération ; Phase 5 = Relâchement et suivi. Figure provenant de l'article Mercier et al. (2020).

2.2 Facteurs individuels de la performance chez les lanceurs de baseball

À ce jour, il est difficile d'identifier des prédicteurs indépendants de la performance chez les lanceurs de baseball. Une revue de type exploratoire de la littérature a été réalisée par le groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques, de l'Université du Québec à Trois-Rivières, sur les facteurs potentiellement associés à la performance des lanceurs (Mercier, Tremblay, Daneau, & Descarreaux, 2020). Cette étude montre qu'il n'existe pas de données scientifiques robustes et que les études sur les facteurs individuels de la performance sont hétérogènes. Cette étude a pu catégoriser les différents facteurs associés à la performance des lancers selon les catégories suivantes ; cinématique, cinétique, paramètres temporels, tests physiques et anthropométriques ainsi que les autres paramètres individuels.

Dans le cadre de mon projet de maîtrise, nous nous intéresserons davantage à la cinématique du lancer et plus particulièrement à la résultante de la séquence de mouvements par son effet sur les paramètres de la physique de la balle et la distance horizontale et verticale lors de son relâchement. Bien que la vitesse des lancers soit la variable de performance des lancers la plus étudiée, elle peut aussi être utilisée pour quantifier l'impact de la fatigue musculaire chez les lanceurs. La précision des lancers est également une mesure de la performance chez les lanceurs de baseball (Mercier et al., 2020) et sera également mesurée dans ce projet.

Enfin, comme le lancer est répété plusieurs fois et que le nombre de lancers total peut s'élever à plus de 100 lancers lors d'une partie, la fatigue musculaire semble réduire la performance des lancers et se manifeste dans certains facteurs individuels liés à la biomécanique et la séquence du lancer comme la cinématique, la cinétique et les paramètres temporels chez les lanceurs de baseball.

2.3 Fatigue neuromusculaire

2.3.1 Définition

Chez l'humain, la fatigue neuromusculaire (FN) peut être définie comme une réduction de la capacité d'un muscle ou d'un groupe de muscles à produire de la force ou de la puissance, causée par l'exercice et par une ou plusieurs contractions musculaires (Taylor, Amann, Duchateau, Meeusen, & Rice, 2016). Taylor et al. (2016) mentionnent que ce mécanisme neurophysiologique qu'est la FN peut altérer négativement la performance humaine en fonction de la tâche et de ses modalités. Toujours selon cette étude, on peut identifier et définir deux types de FN selon leurs mécanismes neurophysiologiques distincts. Ces deux types de FN sont la fatigue centrale, qui se produit à l'intérieur du système nerveux central (SNC) en amont de la jonction neuromusculaire et la fatigue périphérique, qui touche les mécanismes physiologiques en aval à la jonction neuromusculaire. La figure 2 adaptée de la mise au point sur la fatigue musculaire de Sesboüé & Guinestre (2006) illustre bien les étapes de la chaîne de commande du système nerveux, en lien avec la contraction musculaire, qui peuvent être influencées par la FN lors de l'exercice (Sesboüé & Guinestre, 2006).

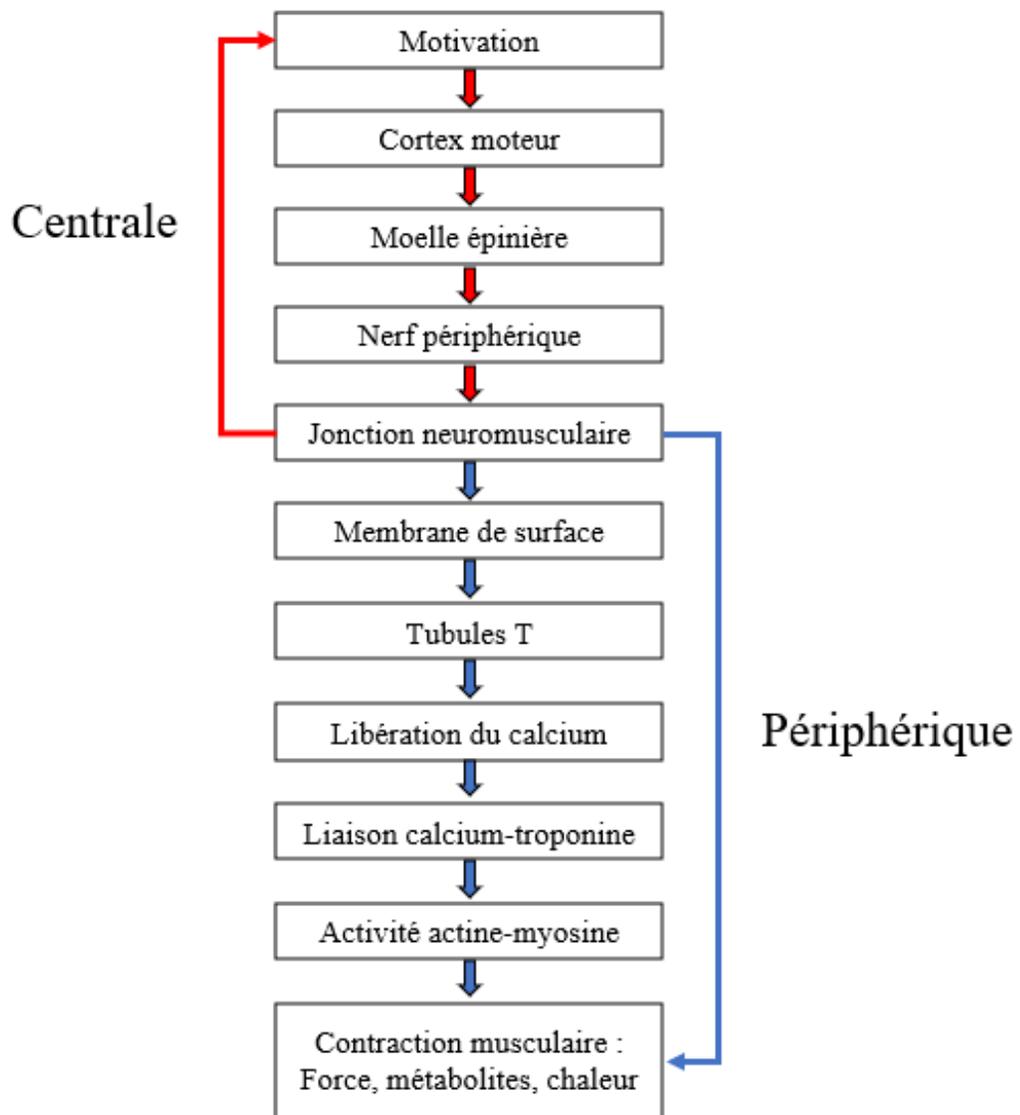


Figure 2. Chaîne de commande la contraction musculaire où la FN centrale et périphérique peuvent survenir. Figure adaptée de Sesboüé & Guincestre (2006).

2.3.2 Influence de la tâche et des caractéristiques physiques de l'individu lors de la fatigue neuromusculaire

Maintenir ou répéter un exercice physique pendant un certain temps mènera à une réduction de la capacité à produire volontairement de la force par l'appareil musculosquelettique (Carroll, Taylor, & Gandevia, 2017). Comme mentionné précédemment, Taylor et al. (2016) expliquent que la FN est influencée par le type de tâche exécutée ainsi que ses modalités. De façon similaire, Williams & Ratel (2009) vont dans ce sens considérant que la FN est un processus multifactoriel et complexe (Williams & Ratel, 2009). De plus, ces chercheurs considèrent que les interactions entre le type de tâche, les caractéristiques physiques de l'individu et la localisation de la FN dans la chaîne de commande du système nerveux permettent de mieux comprendre et interpréter la relation entre les échanges d'énergie sur le plan du métabolisme énergétique, la proportion de fatigue centrale et périphérique accumulée ainsi que la réduction de la capacité de produire de la force par les muscles. La figure 3 adaptée de Williams & Ratel (2009) schématise la perspective multifactorielle de la FN.

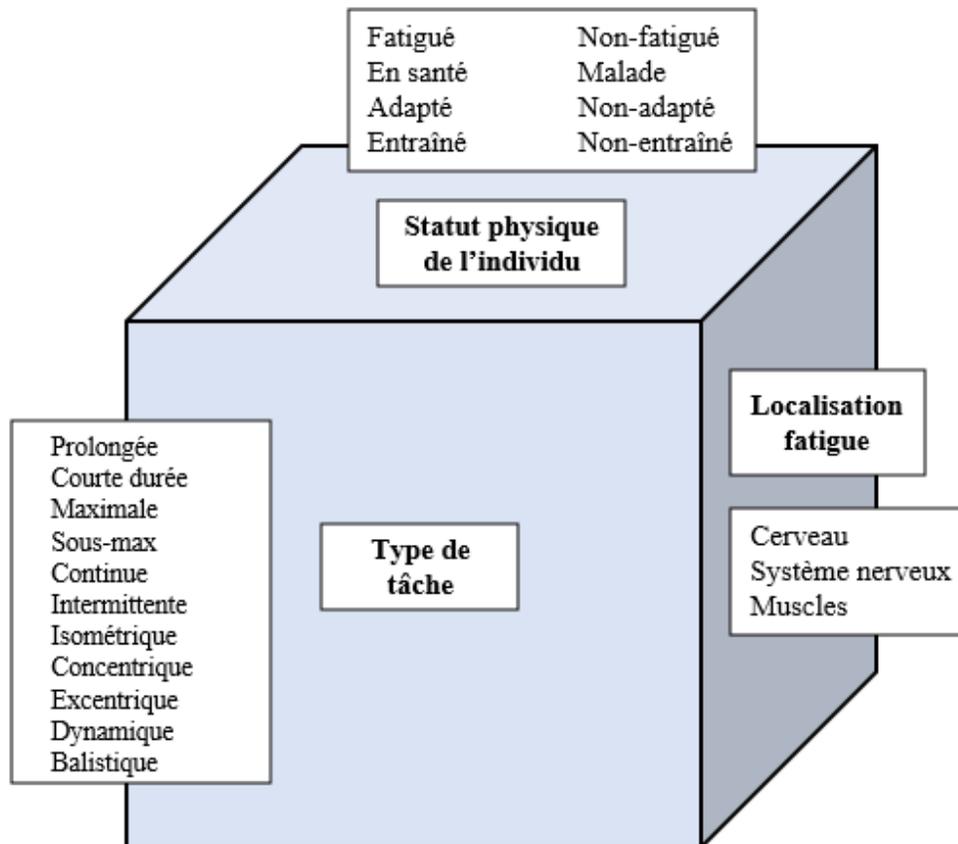


Figure 3. Perspective multifactorielle de la fatigue neuromusculaire adaptée de Williams & Ratel (2009).

Cette figure facilite la compréhension de l'aspect multifactoriel de la FN à considérer lors de l'étude de ce phénomène. À partir de ce modèle, il devient donc intéressant d'étudier la FN chez les lanceurs de baseball considérant que leur statut physique individuel peut varier selon leur passé athlétique et leurs habitudes de vie, que la tâche de lancer en est une balistique à intensité maximale et intermittente incluant différentes contractions musculaires et que la localisation de la fatigue peut se retrouver à

n'importe quel niveau de la chaîne de commande du système nerveux du cerveau jusqu'aux muscles.

2.3.3 Effets de la fatigue et des dommages musculaires causés par l'exercice chez les lanceurs de baseball

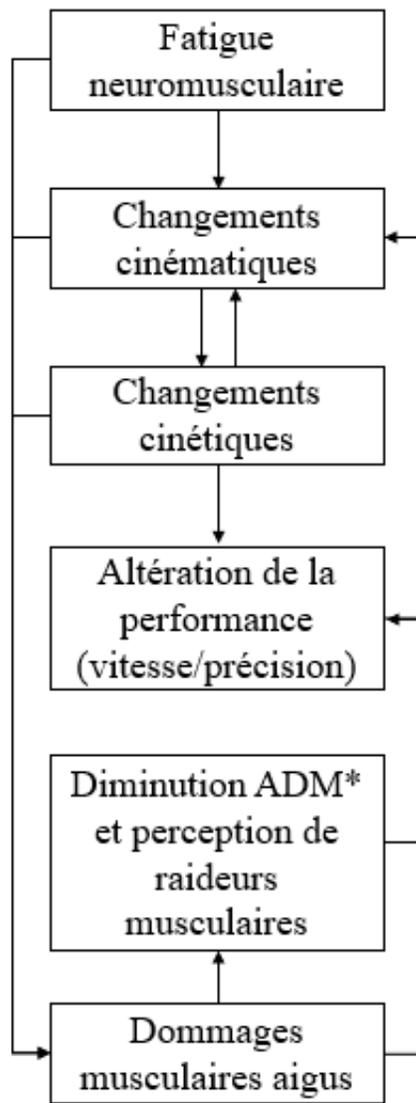
Une revue systématique récente, portant sur la manifestation de la FN chez les lanceurs de baseball, a montré que les résultats des études incluses étaient constants et qu'une codépendance existerait entre la cinématique et le déclin de la performance en lien avec l'accumulation de la FN lors de la tâche de lancer chez les lanceurs (Birfer et al., 2019). Afin d'expliquer cette codépendance en lien avec la FN, Tripp et al. (2007) ont montré un déclin de l'acuité sensorimotrice chez des lanceurs collégiaux. Ce déclin a été mesuré par un test de reproduction de position multi-articulaire de façon active à la suite d'une séance de lancers répétés aux 5 secondes et a montré une diminution de la proprioception du membre supérieur aux articulations scapulo-thoracique, gléno-humérale, du coude et du poignet lors de différentes phases du lancer (Tripp, Yochem, & Uhl, 2007). Ces résultats peuvent potentiellement s'expliquer par l'activation de métabo-récepteurs sensibles aux métabolites, induits par l'exercice physique, comme le lactate, l'adénosine triphosphate et les protons (Taylor et al., 2016; Wan, Qin, Wang, Sun, & Liu, 2017) qui s'accumulent dans le milieu intracellulaire lorsque le phénomène de la FN est présent. Ces mêmes métabo-récepteurs influencent la rétroaction sensitive des fibres afférentes musculaires du groupe III/IV en diminuant la décharge du motoneurone, ce qui compromet les contractions musculaires subséquentes et influence la performance de

l'exercice. Ils jouent donc un rôle d'inhibition du SNC et régulent l'activité motrice. En plus, ceux-ci viennent limiter le développement de la FN périphérique à un seuil tolérable afin de protéger l'organisme d'effets indésirables et potentiellement dangereux de la FN lors de l'exercice (Amann, 2012; Amann, Sidhu, Weavil, Mangum, & Venturelli, 2015). Il est intéressant de noter que les fibres afférentes du groupe III sont particulièrement sensibles aux stimuli mécaniques, aux contractions et étirements musculaires et que celles du groupe IV, incluant certaines du groupe III, sont davantage sensibles aux changements métaboliques ainsi qu'aux stimuli mécaniques nuisibles générant de la douleur (Taylor et al., 2016).

Ensuite, puisque que la FN implique un déclin de force ou de puissance causé par l'exercice en lien avec une ou des contractions musculaires (Taylor et al., 2016), des dommages musculaires peuvent se produire immédiatement après la tâche exécutée produisant une variation dans la performance d'une ou d'autres tâches produites subséquentement (Clarkson & Hubal, 2002), une perte d'amplitude de mouvement (Reinold et al., 2008) et une perception de raideurs musculaires plus élevée (Birfer et al., 2019; Freeston, Adams, Ferdinands, & Rooney, 2014). En théorie, les contractions musculaires lors de la phase excentrique d'un mouvement sont celles qui causent le plus de dommages musculaires et altèrent le plus la performance d'un individu post-exercice (Proske & Morgan, 2001).

Les dommages musculaires causés par l'exercice (DME) peuvent également perturber la performance des lanceurs lors d'une séance impliquant plusieurs lancers. Selon Reinold et al. (2018), chez les lanceurs, les DME se produisent immédiatement

après le travail excentrique des muscles impliqués, lors des différentes phases du lancer, se produisant à haute vitesse et qui perdurent au moins jusqu'à 24h après la séance de lancers (Reinold et al., 2008). Ils affectent principalement les muscles rotateurs externes de l'épaule, les muscles fléchisseurs de l'avant-bras et le muscle trapèze (Reinold et al., 2008). De façon intéressante, les marqueurs indirects généraux des DME lors de la tâche de lancer sont similaires à ceux observés lors d'une tâche non spécifique incluant des contractions excentriques inhabituelles (Clarkson & Hubal, 2002) comme la perte de force, de puissance ou de vitesse, l'augmentation de raideurs musculaires ressenties, la perte d'amplitude de mouvement ainsi que la proportion de protéines en circulation dans le sang après l'exercice comme la créatine kinase (Freeston et al., 2014; Mirabito, Topley, & Thomas, 2022; Wang, Tsai, Lin, Chiang, & Chang, 2009). Aussi, dans leur étude, Freeston et al. (2014) mentionnent que la mesure de précision des lancers pourrait également être utilisée comme indicateur de la FN chez les athlètes de baseball. La figure 4, adaptée de Birfer et al. (2019), explique le lien entre la FN, les mesures (vitesse et précision) et les facteurs individuels (la cinématique et la cinétique) de la performance des lancers ainsi que les DME.



*Figure 4. Cadre théorique adaptée de l'étude de Birfer et al. (2019) représentant la relation entre la FN, les facteurs individuels de la performance et les DME. * Amplitude de mouvement*

2.4 Compromis vitesse-précision

De nos jours, les technologies permettant de mesurer les paramètres de la performance des lancers sur le terrain lors des entraînements et de quantifier la performance des lanceurs de baseball sont de plus en plus accessibles (Liebermann et al., 2002; Murray et al., 2017; Omoregie, 2016). La technologie *Rapsodo*® permet maintenant aux entraîneurs de mesurer les paramètres de la balle lors de son relâchement en mesurant la distance horizontale et verticale, ses rotations par minute, son axe de rotation ainsi que les interruptions verticales et horizontales de la balle causées par ces différentes rotations (Lin, Shih, & Wang, 2019).

Ces paramètres au relâchement de la balle peuvent également prédire le résultat concernant la précision du lancer. Les technologies mesurant ces paramètres produisent également des rapports d'analyse de la séance de lancers incluant une reconstruction de la cible et de son résultat. Il est donc maintenant possible de quantifier ces mesures de précisions et de les analyser afin d'améliorer cet aspect chez un lanceur et de l'utiliser à des fins pratiques et pédagogiques.

Comme mentionné dans les sections précédentes, la précision du lancer est un élément nécessaire afin de mesurer la performance du lancer (Kawamura et al., 2017; Mercier et al., 2020). Par contre, il existe un compromis entre la vitesse et la précision d'un mouvement qui s'explique par le fait que plus la vitesse d'un mouvement est élevée, plus on y retrouvera une marge d'erreur élevée dans les résultats désirés en matière de précision (Fitts, 1954). Ce concept peut s'étudier par des mesures d'erreur en lien avec le

résultat comme les mesures d'erreur constante, absolue et variable (Schmidt et al., 2018). Schmidt et al. (2018) définissent l'erreur constante comme l'erreur moyenne en lien avec la cible à atteindre incluant la direction de l'erreur. De son côté, l'erreur absolue y est définie comme une mesure d'erreur moyenne de précision, mais ne tenant pas en considération la direction et donc du signe positif ou négatif associé aux résultats en lien avec la cible. Enfin, l'erreur variable, mesurant l'inconsistance des résultats, y est définie comme la variabilité de la performance d'un individu comparée à la moyenne de ses résultats.

Au baseball, par le type et la modalité de la tâche décrite précédemment, Freeston et al. (2015) ont tenté de confirmer l'hypothèse du compromis vitesse-précision, la « Launch window hypothesis » (Calvin, 1983). Celle-ci explique qu'il y aurait un moment précis auquel le relâchement d'un objet devrait se produire afin d'effectuer un lancer précis et serait influencé par trois facteurs, dont la grosseur, la distance de la cible ainsi que la vitesse du lancer (Freeston et al., 2015). Leur étude s'est attardée au compromis vitesse-précision selon des pourcentages de la vélocité maximale établie initialement. Les lanceurs devaient reproduire deux séries de 10 lancers, une série à $80 \pm 5\%$ et une seconde à $100 \pm 5\%$ de la vélocité maximale où des mesures de cinématiques du mouvement et de la trajectoire de la balle étaient mesurées. Les résultats montrent un compromis entre la vitesse et la précision des lancers entre ceux à 100% et ceux à 80%. Les chercheurs ont observé que les lancers à 80% étaient plus constants en précision, par une plus petite erreur absolue constante dans les résultats des lancers. Aussi, la fenêtre de temps requise pour effectuer un lancer précis était plus grande pour les lancers à 80% comparé à ceux à 100%

contrairement aux lancers à capacité maximale (0,12 milliseconde vs 0,08 milliseconde). La composante verticale du lancer, qui représente la hauteur de celui-ci à l'arrivée à la cible, était celle qui variait le plus lorsque les lancers étaient effectués à capacité maximale comparativement à ceux à capacité sous-maximale. En effet, lorsque les lancers étaient exécutés à capacité maximale, l'erreur verticale était plus grande avec des lancers qui étaient plus haut relativement à la cible. Cependant, la composante horizontale était constante pour les deux pourcentages de vitesse des lancers. L'utilisation du pourcentage de vitesse pourrait donc être un moyen intéressant d'enseigner aux lanceurs afin de maintenir une performance en précision selon l'évolution du nombre de lancers lors d'une séance ou partie.

3. Problématique

Considérant les connaissances théoriques et appliquées aux lanceurs de baseball sur la cinématique, la cinétique, les paramètres temporels, les tests physiques ainsi que les caractéristiques et paramètres individuels autres, il semble pertinent d'étudier davantage les effets aigus de la FN, au cours d'une même séance de lancers, en lien avec les mesures de performance des lancers comme la vitesse et la précision des lancers (Mercier et al., 2020). De plus, il semble aussi approprié d'étudier l'évolution de ces mesures mentionnées lors d'une séance de lancers, car celles-ci n'ont été que très peu étudiées dans une population de jeunes athlètes comparativement à ceux collégiaux ou professionnels. Ainsi, comprendre l'évolution de la FN chez les lanceurs permettra d'outiller les entraîneurs afin de gérer la charge d'entraînement et d'optimiser leur utilisation lors des entraînements ou des parties. Actuellement, des recommandations de lancers selon le volume de lancers effectués par jour incluant des journées de récupération sont proposées par différentes organisations (Baseball Quebec 2021; Fazarale, Magnussen, Pedroza, & Kaeding, 2012). De plus, Fazarale et al. (2012) mentionne dans leur étude que seulement 43% des entraîneurs ont répondu correctement à leur sondage concernant leurs connaissances des recommandations du nombre de lancers chez des athlètes de 9 à 15 ans. Un résultat encore plus intéressant de cette étude indique que 53% des entraîneurs croient que les entraîneurs qu'ils affrontent ne respectent pas ces recommandations. Ces résultats sont inquiétants considérant que les données scientifiques récentes montrent une augmentation des blessures musculosquelettiques au coude et à l'épaule chez les lanceurs et que ceux lançant fréquemment sous état de fatigue seraient

36 fois plus à risque de subir une blessure en comparaison à ceux ne lançant pas sous état de fatigue (Erickson, Chalmers, Axe, & Romeo, 2017; Olsen, Fleisig, Dun, Loftice, & Andrews, 2006). En plus, les lancers en préparation de parties ou des séances d'entraînement ne sont souvent pas comptabilisés et considérés dans la gestion du nombre de lancers lors d'une partie suivante (Zaremski et al., 2018).

Pour continuer, connaître l'effet de la fatigue neuromusculaire aiguë sur le compromis vitesse-précision permettra d'évaluer à quel moment il serait préférable d'intervenir dans une partie ou lors de pratiques afin d'optimiser le développement de l'athlète à la position de lanceur. Des mesures individuelles de sensibilité à la douleur et de perception de raideurs musculaires à différents muscles permettraient d'en apprendre sur l'évolution de ces variables lors d'une même séance de lancers et ainsi d'adapter les recommandations, les techniques d'activation et de récupération après les séances.

En bref, approfondir les connaissances sur le concept de la FN et son association avec la performance des lancers permettra d'améliorer l'encadrement des athlètes et d'optimiser leur développement à long terme dans le sport.

4. Objectifs et hypothèses

L'objectif de mon mémoire est donc de quantifier les effets de la fatigue neuromusculaire sur la performance des lanceurs de baseball lors d'une séance de 75 lancers séparée en cinq blocs de 15 lancers.

Pour ce projet, nous émettons les hypothèses suivantes :

1. Entre les blocs de lancers demandés aux lanceurs, la fatigue neuromusculaire, le seuil de douleur à la pression mécanique et la perception de raideur musculaire vont augmenter.
2. Avec l'accumulation des blocs de lancers demandés aux lanceurs, la précision et la vitesse des lancers diminueront.

5. Article

Effects of neuromuscular fatigue on baseball pitchers' performance

Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques

Mathieu Tremblay^{1,2}, Samuel Anderson Sirois^{1,2}, Jacques Abboud^{1,2},

Martin Descarreaux^{1,2,3}

¹ Department of Human Kinetics, Université du Québec à Trois-Rivières

² Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques

*Corresponding author: Martin Descarreaux, 3351, boul. des Forges, Trois-Rivières

G8Z 4M3, martin.descarreaux@uqtr.ca, 819 376-5011, ext. 3791

* Submitted to the Journal of Sports Sciences (20/03/2023)

Abstract

In baseball pitching, neuromuscular fatigue (NF) and its associated measures, such as muscles soreness and pain, are known to affect pitching performance. The objective of this study was to quantify the effects of NF on baseball pitchers' performance throughout a 75 pitches session divided in five blocks of 15 pitches. Thirty elite male baseball pitchers aged between 13 and 50 years old were recruited. Pitchers had to throw fastballs and to aim at the center of a target throughout the pitching session. Repeated measure ANOVAs ($p < 0.05$) were used to identify statistical mean differences for pitching performance measures (i.e., velocity, ball spins, release angle, side, height, and accuracy errors) and NF and associated measures in both arms (i.e., grip strength, perceived muscle soreness, pain threshold). Results revealed that perceived muscle soreness in both dominant and non-dominant arms increased in multiple muscle sites with NF accumulation across the pitching blocks ($p < 0.05$). Pitching performance measures such as pitching velocity, release height and radial error accuracy assessments showed a significant decrease across pitching blocks ($p < 0.05$). In summary, a pitching session of 75 pitches suggests an increase in NF concomitant with a decrease in pitching performance.

Key Words: accuracy, kinematics, movement variability, muscle soreness, pain, spin rate.

Introduction

Neuromuscular fatigue (NF) is a common phenomenon affecting athletes. Undeniably, sports and associated training requires athletes to repeat motor skills often involving synergy in muscles coordination resulting in significant energy expenditure to successfully accomplish these skills (Sparrow & Newell, 1998). In humans, NF is defined as a reduction in a muscle or muscle group capacity to produce power or strength during exercise engaging one or multiple muscles contractions (Taylor et al., 2016). NF being task dependent, the amount of perceived and measured NF is mostly related to the type and duration of the performed task (Weavil & Amann, 2019). From a neurophysiological perspective, NF originates most probably from a combination of central and peripheral mechanisms occurring in the nervous system (Taylor et al., 2016). The central mechanisms affect mostly the central nervous system and the neural drive forwarded by the brain to muscle fibers in order to generate muscle contractions occurring proximally to the neuromuscular junction whereas peripheral fatigue is due to neurophysiological mechanisms occurring distally of the neuromuscular junction and mostly involve muscle contraction physiological mechanisms associated with the depolarization of the muscle fiber membrane (Taylor et al., 2016). When considering the impact of NF on motor performance, both mechanisms are intrinsically linked and potentially affect subsequent movement performance (Carroll et al., 2017).

In baseball, pitching is a throwing skill that needs to be repeated numerous times by pitchers, both in games and during training, and involves a sequence of complex movements involving several body segments, including both upper and lower limbs

simultaneously, in the task (Dale, Kovaleski, Ogletree, Heitman, & Norrell, 2007; Molina, Bott, & Stodden, 2019). Pitching performance is influenced by several factors such as kinematics, kinetics, physical tests and individual characteristics that are associated with optimal pitching performance (Mercier et al., 2020; Tremblay, Tétreau, Corbin-Berrigan, & Descarreaux, 2022). Scientific evidence related to the manifestation of NF in baseball pitchers has recently been synthesized in a systematic review investigating associations between NF, kinematics changes, performances changes, pain, and injury (Birfer et al., 2019). Interestingly, the review showed that a co-dependance exists between kinematics and decline in pitching performance caused by NF mechanism. Moreover, pain and soreness are observed in pitchers throughout a season and seems to be associated to future injury. Furthermore, NF was also tracked across a collegiate baseball season (Stone & Schilling, 2020) and studied across other settings such as simulated games and experimental laboratory-based protocols (Dale et al., 2007; Erickson et al., 2016; Tripp et al., 2007). In baseball pitching, kinematic parameters mostly related to ball velocity are among the most studied parameters in studies investigating pitching performance (Mercier et al., 2020). Nowadays, pitch-tracking technologies analyzing instantaneous pitching performance (Lin et al., 2019) allow coaches and organizations to cumulate information about their players and use technologies' information to provide athletes with feedback about their own performance and to optimize future performance as well (Kos, Wei, Tomažič, & Umek, 2018). For example, kinematics parameters and ball flight trajectories estimated at ball release are increasingly used to assess pitchers' performance in practice (Lin et al., 2019). Besides, these data are also useful to predict pitchers'

outcomes in ball accuracy also referred to as pitch location (Kusafuka et al., 2020; Nasu & Kashino, 2021).

Given established evidence regarding the various associations between baseball pitching performance and kinematics, kinetics, timing outcomes, physical tests, and individuals' characteristics, it seems relevant to investigate the acute effects of NF on male baseball pitchers' performance within a pitching session. There is currently a paucity of evidence describing the effects of NF on pitching performance measures and scarce are those including both velocity and accuracy in pitchers. In younger athletes, recommendations exist to control the number of pitches thrown during a game and days needed for post pitching recovery (Baseball Quebec 2021; Fazarale et al., 2012) but such recommendations do not consider pitches done during warm-up sessions before and during the game (Zaremski et al., 2018). Pitching repetition and its link with NF phenomenon are therefore critical to understand given the evidence showing a link between increased number of pitches thrown and increased risk of injury and perceived pain at the shoulder and elbow joint (Erickson et al., 2017; Olsen et al., 2006). Consequently, investigating the effect of pitching repetition on pitching performance measures could yield a better understanding of the NF impact on baseball pitchers' motor behaviours during pitching.

Therefore, the objective of this study is to quantify the effects of NF on baseball pitchers' performance throughout a 75 pitches session. Given the evidence suggesting that the repetitive throwing action induces NF, it was hypothesized that pitching performance

measures would decrease during repetitive throwing, whereas NF and associated measures would increase.

Methods

Participants

Athletes and their parents or tutors (if under 16 years old) were informed of the risks and benefits before providing their written informed consent to participate in the study. Male ($n = 30$) baseball pitchers volunteered to participate in this study. Based on moderate effect size, a power of .9, p value of .05 and according to our repeated measure ANOVA, the minimal sample size requirement was 24 baseball pitchers. The study was approved by the university's local ethics committee (no. CER-22-288-07.14). To be included in this study, athletes must have played at least a complete season of organized elite baseball in their age group. Athletes must identify pitcher as the primary or one of their playing positions, be injury free and able to participate in baseball-related activities without any restrictions. Athletes who reported injury or pain before or while doing the experimentation were excluded from the study. A sociodemographic questionnaire describing the self-reported player's profile was completed by players and their parents or tutors if they were under 16 years of age, or by the athletes if they were over 16 years old before experimentation.

Procedures

Pitchers performed a 75 fastball pitches session divided in five blocks of 15 pitches aiming at the center of a target and throwing as hard as possible to achieve this goal throughout the pitching session. The number of pitches was chosen based on the Baseball Quebec federation recommendations for safe number of pitches allowed in a single day for the 13U age category (Baseball Quebec, 2021). Five minutes of rest were allowed between pitching blocks. The sessions took place from September 2021 to March 2022 and from September 2022 to November 2022 during the athletes' off-season. All testing was made at the same facility and all pitchers pitched from a pitching mound positioned 60 feet and six inches from the home plate. The target consisted of a net divided by nine pockets (Pitcher's Target Pocket Pro, Prostock Athletic Supply Ltd © 2023) positioned over the home plate. Figure 1 presents the schematic experimental set up. Prior to the pitching session, athletes were asked to follow their own usual dynamic body warm-up and to be ready for pitching at the beginning of the protocol as they would before a practice or a game. Before each session, the evaluators calibrated the center of the target (the center pocket of the target) with the The Rapsodo® Pitching 2.0 system used to measure pitching performance and validate that the center pocket of the target was also the center of the target displayed on Rapsodo system application (Lin et al., 2019). Evaluators were professional kinesiologists or kinesiology students trained for various experimental tasks and assessments before the start of the study. They kept their assigned assessments until completion of the project.

Figure 5. Schematic experimental set up

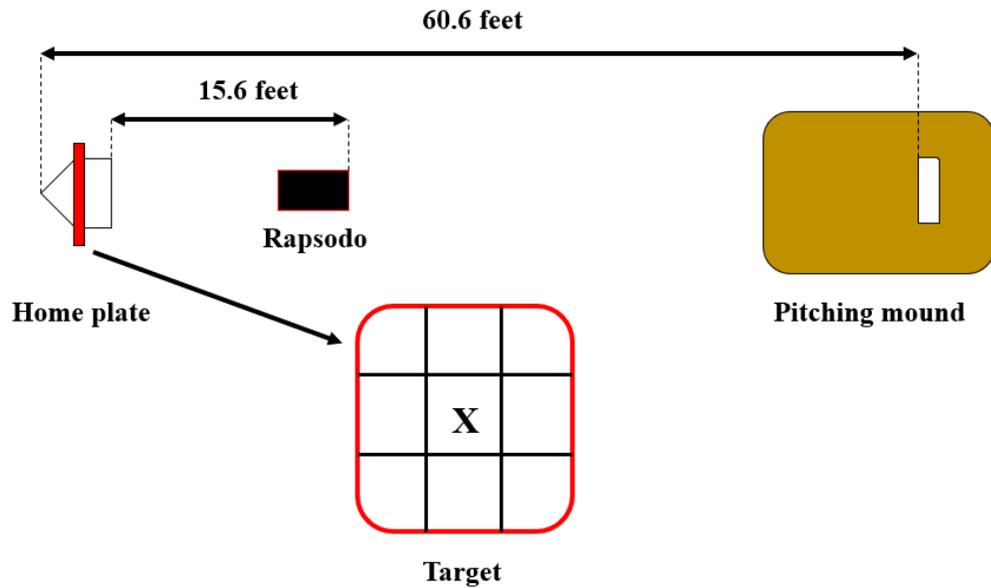


Figure 1. Schematic figure of the experimental set up. Between block of pitches, grip strength, perceived muscle soreness and pressure point threshold measures were taken.

Anthropometric measurements

Height and weight

The height was determined using a SECA 213 mobile stadiometer that was positioned on a flat surface against a wall. Pitchers were asked to stand barefoot on the device and height was recorded to the nearest 0.1 cm (Li et al., 2016). Body weight was measured using a portable SECA 876 scale which was positioned on a solid floor. Pitchers were asked to step on the scale without shoes and the weight was recorded to the nearest 0.1 kg (Li et al., 2016).

Neuromuscular fatigue and associated measures

Grip strength

Grip strength was assessed twice on both the dominant and non-dominant throwing arm sides where measures were taken before, between blocks of pitches and after the pitching session with a Jamar Dynamometer where the results were taken in kilograms (Härkönen, Harju, & Alaranta, 1993). Grip strength assessment was shown to be associated with pitching velocity in other studies in large sample of athletes of different age groups (Nakata, Nagami, Higuchi, Sakamoto, & Kanosue, 2013; Tremblay et al., 2022) and was used to assess forearm muscle fatigue throughout the pitching session. Grip strength required participants to hold and squeeze the dynamometer as hard as possible for three seconds alternating arms between measures to avoid muscle fatigue. The mean of the two measures in kilograms taken before, between blocks of pitches and after the pitching session was used for statistical analysis.

Pressure pain threshold

Pressure pain threshold was assessed using a hand-held algometer (Model 01163; Lafayette Instrument Company, Lafayette IN USA) with a 12 mm diameter circular tip probe. Other studies assessing pressure pain threshold have also used this instrument (Abboud, Lessard, & Descarreaux, 2021; Abboud, Lessard, Piché, & Descarreaux, 2019). The same evaluator through the study applied a steady and progressive pressure on participants' muscle sites such as the forearm flexors, the biceps, the anterior deltoid, and the upper trapezius muscles on the dominant and non-dominant throwing arm sides.

Measures were taken twice on each muscle site before, between blocks of pitches, and after the pitching session. Mailloux et al. (2021) studied within-session test-retest reliability of pressure point threshold in different muscle sites, in healthy subjects, and found that two measures have an excellent relative reliability (ICC for the forearm flexors CI 95% 0.88 (0.74-0.95)) (Mailloux, Beaulieu, Wideman, & Masse-Alarie, 2021). Standardized verbal instructions were given to the athletes and were the same as those provided in the Mailloux et al. (2021) study. Athletes were asked to warn the evaluator when they felt the first painful sensation and were told that the assessment was not a pain tolerance test but a pain threshold test. The mean of the two measures for each muscle site in kilograms taken before, between blocks of pitches, and after the pitching session was used for statistical analysis.

Muscle soreness perception

Perceived muscle soreness intensity was expressed once verbally by the participants according to a numerical scale of 0-10 (Lau, Muthalib, & Nosaka, 2013) on the same muscle sites as pressure point threshold measures i.e. forearm flexors, biceps, anterior deltoid, and upper trapezius muscles on the dominant and non-dominant throwing arm sides. Measures were expressed before, between blocks of pitches and after the pitching session. One measure expressed before, between blocks of pitches, and after the pitching session was used for statistical analysis.

Pitching performance measures

The Rapsodo system was the technology used to collect data measuring pitching performances across the pitching blocks. The Rapsodo system, a monocular camera-based system, was positioned 15 feet and 6 inches in front of home plate on the ground facing the pitcher. This technology has been used in recent studies to assess pitchers' performances (Diffendaffer, Slowik, Lo, Drogosz, & Fleisig, 2019; Lin et al., 2019; Tremblay et al., 2022). Pitchers used a regular 5 oz baseball to perform the pitching session. Pitchers had the choice to throw from a stretch or windup position. They were asked to stay consistent throughout the protocol and to place their backfoot on the center of the rubber. To be included in the study, pitching blocks needed to be collected at least 10 out of 15 pitches and the mean was used for statistical analysis. The next section will describe the included pitching performance measures that were collected across the pitching blocks as their definitions found in the Rapsodo® pitching 2.0 user manual available on its website (Rapsodo, 2022).

In this study, pitching velocity was measured in miles per hour and is described as the release speed of the ball as the ball leaves the pitcher's fingers. Pitching velocity is also a measure used to assess muscle fatigue in pitchers (Birfer et al., 2019). Spin rate was measured in revolutions per minute of the pitched ball at ball release and is the addition of backspin, topspin, sidespin, and gyroscopic spin that the pitcher put on the ball. True spin was obtained by the multiplication between spin rate and spin efficiency. Vertical and horizontal break trajectory were measured in inches and describe how much the

baseball has moved when it crosses the strike zone compared to its position if there was no spin applied on the ball. Release height was measured in feet as the vertical distance between home plate and the pitcher's vertical release point. Release side was measured in feet as the horizontal distance between the center of the pitching rubber to the pitcher's horizontal release point. Release angle was measured in degrees and represents the vertical degree of the ball as the pitcher is releasing it, where negative angles indicate a downward trajectory whereas positive angles indicate upward trajectory.

Ball accuracy and error

Pitch location measures consisted of strike zone height (vertical coordinate) and strike zone side (horizontal coordinate) and was measured in inches. The coordinates of the strike zone height and side of the reference pitch were used to compare the accuracy of thrown pitches for the participant across the pitching blocks. To assess participants' accuracy behavior across the pitching session, error measurements between thrown pitches and pitch reference were computed (Schmidt et al., 2018). The mean of the x and y coordinate for each error measurements of each pitching blocks were used for statistical analysis. Error measurements definitions such as constant error, absolute error, variable error, and total variability are presented below (Schmidt et al., 2018). Because pitch location contains two-dimensions, radial error was also computed across pitching blocks.

Constant error

Constant error measured the average error in pitch location across a pitching block between pitch location and the target. This error measurement was computed for the X and Y axis separately.

Absolute error

Absolute error measured the overall accuracy in performance across a pitching block and is the absolute deviation without regards to direction or sign, between pitch location and the target. This error measurement was computed for the X and Y axis separately.

Radial error

Radial error measured the average amount of error between the target and actual pitch location considering both the X and Y axis.

Variable error

Variable error measured the inconsistency in pitch location across a pitching block between pitch location and the target. This error measurement was computed for the X and Y axis separately.

Total variability

Total variability (root mean square error) measured the overall error of the pitch location across a pitching block. This error measurement was computed for the X and Y axis separately.

Statistical analysis

Descriptive data including mean \pm standard deviation of pitchers' characteristics and assessments were calculated. Normal distribution for studied variables was assessed using the Shapiro-Wilks test and visual inspection. A repeated measure analysis of variance (rANOVA) with effect size (partial eta squared η_p^2) was performed to identify differences between pitching blocks for all studied variables. Planned polynomial contrasts analyses were used to assess trends in studied variables across experimentation. Greenhouse-Geisser adjustment was used whenever assumptions of sphericity were not met. If variables were not normally distributed, non-parametric Friedman test with Kendall's concordance coefficient (W) was used to identify differences between pitching blocks and effect size. The significance levels for all analyses were set to $p < 0.05$. Analyses were performed on available data from athletes that completed the protocol. Statistical computations were performed using IBM SPSS Statistics version 28.0.0.

Results

Pitchers' descriptive profile describing their age, height, body weight as well as their playing experience are presented in **table 1**. Four athletes out of 30 athletes did not complete the protocol because of exhaustion or significant feeling of muscle soreness whereas data of one athlete were incomplete because of instrumentations default and data synchronisation default (pressure point threshold and Rapsodo). Results of rANOVA for neuromuscular fatigue and associated measures showed significant differences (decrease) across pitching blocks for dominant ($F(5) = 29.751; p < 0.001; \eta_p^2 = 0.543$) and non-dominant arm grip strength ($F(5) = 6.850; p < 0.001; \eta_p^2 = 0.215$). Significant differences were also found for perceived muscles soreness (increase) in forearm flexors ($F(5) = 33.840; p < 0.001; W = 0.646$), biceps ($F(5) = 34.834; p < 0.001; W = 0.664$), anterior deltoid ($F(5) = 13.783; p < 0.001; W = 0.424$) and upper trapezius ($F(5) = 14.133; p < 0.001; W = 0.499$) of the dominant arm and in the forearm flexors ($F(5) = 5.638; p < 0.001; W = 0.690$), biceps ($F(5) = 7.992; p < 0.001; W = 0.684$), anterior deltoid ($F(5) = 3.739; p < 0.001; W = 0.503$) and upper trapezius ($F(5) = 5.611; p < 0.001; W = 0.425$) of the non-dominant arm. No difference was found for the pressure point threshold assessments in dominant and non-dominant arms in assessed muscle sites. Results for neuromuscular fatigue and associated measures are presented in **table 2**. **Figure 1** presents dominant arm grip strength evolution across pitching blocks and **figure 2** perceived muscles soreness evolution across pitching blocks per muscle sites. Results of rANOVA for pitching performance assessments showed significant differences and decline in pitching velocity ($F(4) = 3.908; p = 0.041; \eta_p^2 = 0.135$), release height ($F(4) = 7.256; p =$

0.004; $\eta_p^2 = 0.232$) and radial error ($F(4) = 3.506$; $p = 0.03$; $W = 0.106$) across pitching blocks. No differences were found across pitching blocks for spin rate, true spin, vertical and horizontal break trajectories, release angle and release side. Results for pitching performance measures are presented in **table 3**. **Figure 3** presents pitching velocity evolution across pitching blocks, **figure 4** release height evolution across pitching blocks and **figure 5** radial error evolution across pitching blocks (accuracy). In addition, planned polynomial contrasts analysis revealed significant negative linear trends for grip strength ($p < 0.001$) in both the dominant and non-dominant arm, release height ($p < 0.001$) and radial error ($p = 0.047$). Positive linear trends were revealed for perceived muscle soreness in forearms flexors ($p < 0.001$), biceps ($p < 0.001$), anterior deltoid ($p < 0.001$) and upper trapezius ($p < 0.001$) in both dominant and non-dominant arms. A negative quadratic trend was revealed for pitching velocity ($p = 0.009$) across pitching blocks.

Table 1. Pitchers' descriptive profile.

Table 1. Pitchers' descriptive profile

Pitchers' descriptive profile

	N	Mean	STD ^a
Age (years)	30	21.43	8.86
Height (Claudino et al.)	30	179.17	8.44
Weight (kg)	30	79.20	12.73
Years of experience playing organized baseball	27	13.48	7.40
Participation in school-related year-round baseball program (%)	N	Yes	No
	28	53	47
Dominant arm			
Right-handed pitcher		25	
Left-handed pitcher		5	

^a STD = Standard deviation

Table 2. Results, rANOVA, and percentage change of neuromuscular fatigue and associated measures across blocks.

Neuromuscular fatigue and associated measures ^a									
	N	Pre	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	% Block 1 – 5	ANOVA p <0.05
Grip strength dominant (kg)	26	55.67 ± 12.32	53.20 ± 12.22	51.83 ± 12.56	50.77 ± 12.27	49.83 ± 12.92	48.62 ± 12.25	-12.94 %	<.001
Grip strength non-dominant (kg)	26	53.81 ± 12.08	51.81 ± 11.67	51.67 ± 11.16	51.40 ± 11.16	50.89 ± 12.44	49.94 ± 11.86	-7.04 %	<.001
PMS flexors dominant (0-10)	26	1.65 ± 1.16	2.38 ± 1.30	2.73 ± 1.51	3.15 ± 1.71	3.92 ± 1.83	4.19 ± 2.02	20.00%	<.001*
PMS biceps dominant (0-10)	26	1.81 ± 1.39	2.27 ± 1.25	2.73 ± 1.37	3.77 ± 1.51	3.96 ± 1.71	4.31 ± 1.85	23.70%	<.001*
PMS ant. delt dominant (0-10)	26	2.19 ± 1.65	2.19 ± 1.30	2.69 ± 1.41	3.04 ± 1.45	3.50 ± 1.53	3.69 ± 1.74	15.00%	<.001*
PMS upper. trap dominant (0-10)	26	2.19 ± 1.74	2.31 ± 1.67	2.35 ± 1.72	2.96 ± 1.93	3.35 ± 1.94	3.38 ± 2.16	11.92%	<.001*
PMS flexors non-dominant (0-10)	26	1.38 ± 1.10	1.46 ± .99	1.50 ± .99	1.65 ± 1.16	1.92 ± 1.35	2.12 ± 1.63	5.00%	<.001*
PMS biceps non-dominant (0-10)	26	1.31 ± 1.26	1.62 ± 1.36	1.85 ± 1.74	2.00 ± 1.41	2.27 ± 1.49	2.42 ± 1.68	11.15%	<.001*
PMS ant. delt non-dominant (0-10)	26	1.54 ± 1.45	1.73 ± 1.22	1.92 ± 1.29	1.96 ± 1.15	2.15 ± 1.46	2.38 ± 1.79	8.46%	<.001*
PMS upper. trap non-dominant (0-10)	26	2.15 ± 1.77	2.08 ± 1.74	2.12 ± 1.77	2.31 ± 1.67	2.65 ± 1.94	2.65 ± 1.94	2.65%	<.001*

PPT flexors dominant (kg)	25	8.19 ± 3.19	8.16 ± 3.45	7.93 ± 3.35	7.76 ± 3.08	7.82 ± 3.06	7.59 ± 2.96	Ø	.144*
PPT biceps dominant (kg)	25	6.32 ± 2.59	6.50 ± 2.50	6.60 ± 2.85	6.65 ± 3.17	6.43 ± 2.87	6.17 ± 2.72	Ø	.753
PPT ant. delt dominant (kg)	25	7.64 ± 3.30	7.80 ± 3.46	7.81 ± 3.69	7.91 ± 3.46	7.91 ± 3.26	7.83 ± 3.47	Ø	.460
PPT upper. trap dominant (kg)	25	8.86 ± 3.97	9.02 ± 4.06	9.25 ± 4.50	8.77 ± 3.94	9.31 ± 4.05	9.19 ± 4.28	Ø	.482*
PPT flexors non-dominant (kg)	25	8.48 ± 3.47	8.66 ± 3.68	9.03 ± 3.90	8.67 ± 3.66	8.64 ± 3.51	8.69 ± 3.53	Ø	.480*
PPT biceps non-dominant (kg)	25	6.14 ± 2.33	6.10 ± 2.50	6.40 ± 2.95	6.33 ± 2.82	6.31 ± 2.69	6.30 ± 2.88	Ø	.750
PPT ant. delt non-dominant (kg)	25	6.83 ± 2.71	7.33 ± 3.13	7.44 ± 3.44	7.24 ± 3.06	7.14 ± 3.33	7.32 ± 3.61	Ø	.429
PPT upper. trap Non-dominant (kg)	25	9.47 ± 4.08	9.12 ± 4.14	9.43 ± 3.90	9.61 ± 4.41	9.59 ± 4.06	9.28 ± 3.99	Ø	.507

^a Data presented as mean ± standard deviation. % percentage presented for significant results only. PPT = pressure point threshold, PMS = Perceived muscle soreness. * Variables not normally distributed, results from Friedman's test.

Figure 6. Dominant arm grip strength evolution across pitching blocks.

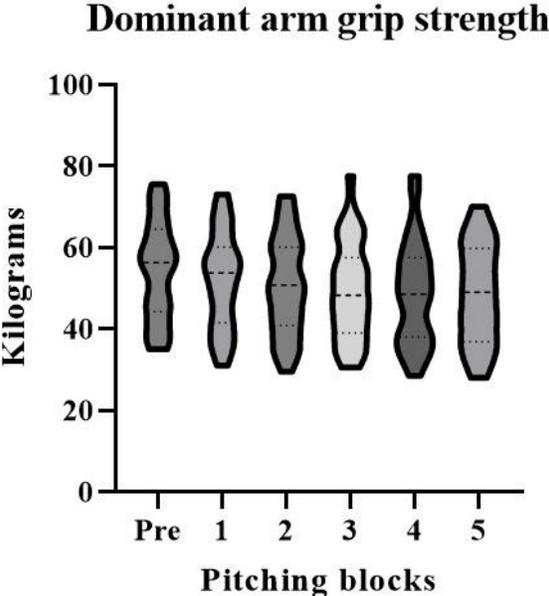


Figure 6. Dominant arm grip strength evolution across pitching blocks. The middle-dotted line represents the mean grip strength across blocks. The lower and upper dotted line represent the 1st and 3rd quartile. The violin boxes represent the data distribution density for each pitching blocks.

Figure 7. Perceived muscle soreness measures evolution per muscle sites.

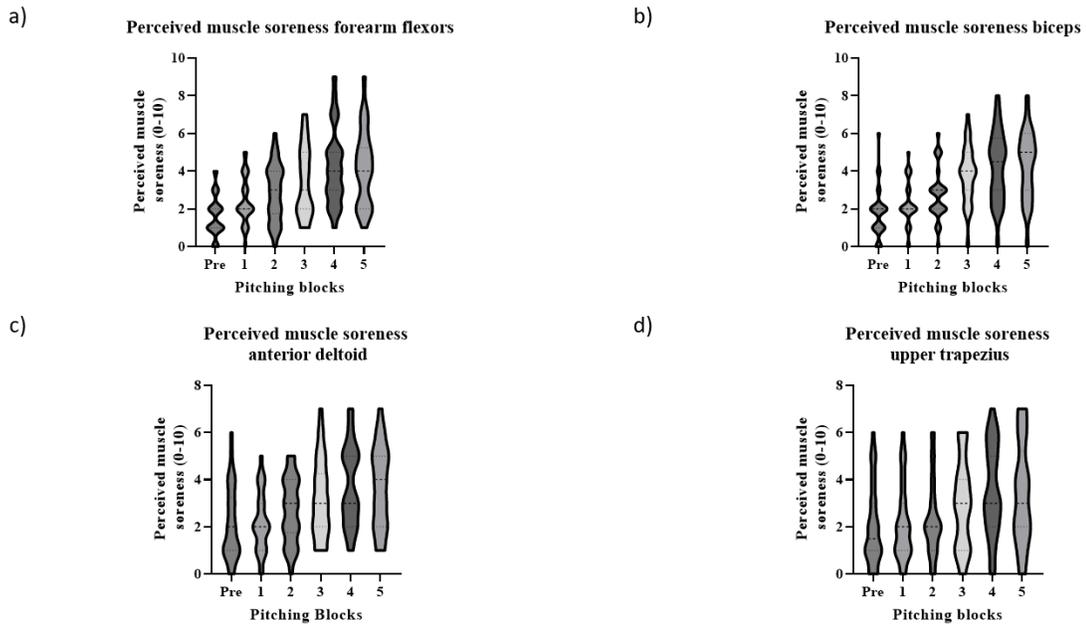


Figure 7. Perceived muscle soreness measures (PMS) evolution per muscle sites. The middle-dotted line represents the mean PMS across blocks. The lower and upper dotted line represent the 1st and 3rd quartile. The violin boxes represent the data distribution density for each pitching blocks.

Tableau 3. Results, rANOVA, and percentage change of pitching performances measures across blocks

Pitching performances assessments ^a								
	N	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	% Block 1 – 5	ANOVA p <0.05
Pitching velocity (mph)	26	74.92 ± 5.00	75.22 ± 4.75	74.85 ± 4.45	74.54 ± 4.35	74.22 ± 4.31	.84 %	.041
Spin rate (rpm)	25	1779.34 ± 193.98	1778.49 ± 155.61	1787.44 ± 151.03	1780.67 ± 147.44	1759.42 ± 158.27	∅	.804*
True spin (rpm)	25	1556.36 ± 235.33	1553.79 ± 233.16	1542.10 ± 237.94	1537.30 ± 223.69	1512.65 ± 258.13	∅	.483
Horizontal break (inches)	25	5.87 ± 8.69	5.90 ± 8.54	5.66 ± 8.30	6.19 ± 8.07	5.80 ± 8.32	∅	.195*
Vertical break (inches)	25	14.96 ± 2.90	14.85 ± 2.88	14.62 ± 2.77	14.92 ± 2.73	14.32 ± 3.72	∅	.232
Release angle (degrees)	25	.52 ± 1.11	.66 ± .94	.82 ± .85	.68 ± .90	.67 ± 1.06	∅	.145
Release height (feet)	25	4.95 ± .36	4.89 ± .36	4.87 ± .34	4.87 ± .36	4.83 ± .36	4.82%	.004
Release side (feet)	25	.84 ± 1.39	.85 ± 1.39	.84 ± 1.37	.88 ± 1.34	.88 ± 1.36	∅	.701*
AE x	25	10.30 ± 3.28	9.47 ± 3.05	9.62 ± 2.49	9.16 ± 2.50	9.15 ± 2.20	∅	.562*
AE y	25	13.53 ± 4.44	12.59 ± 3.14	12.75 ± 3.46	12.70 ± 2.60	12.97 ± 3.34	∅	.647
CE x	25	.90 ± 6.97	-.69 ± 5.16	-.80 ± 4.27	-1.07 ± 4.73	-1.93 ± 4.61	∅	.859*

CE y	25	2.41 ± 10.56	2.99 ± 8.46	4.10 ± 7.15	1.84 ± 7.92	.83 ± 9.09	∅	.097
VE x	25	10.92 ± 2.78	10.58 ± 3.43	11.32 ± 2.68	10.55 ± 2.62	10.42 ± 2.67	∅	.248*
VE y	25	32.40 ± 4.45	31.49 ± 6.93	32.69 ± 4.22	32.62 ± 4.16	32.68 ± 3.94	∅	.891*
TV x	25	12.70 ± 3.67	11.61 ± 3.71	12.03 ± 2.98	11.51 ± 2.90	11.58 ± 2.36	∅	.466
TV y	25	34.19 ± 4.02	32.64 ± 6.80	33.74 ± 3.72	32.83 ± 6.00	33.88 ± 3.95	∅	.916*

^a Data presented as mean ± standard deviation. % percentage presented for significant results only. AE = Absolute error, CE = Constant error, VE = Variable error, TV = Total variability. * Variables not normally distributed, results presented from Friedman's test.

Figure 8. Pitching velocity evolution across pitching blocks.

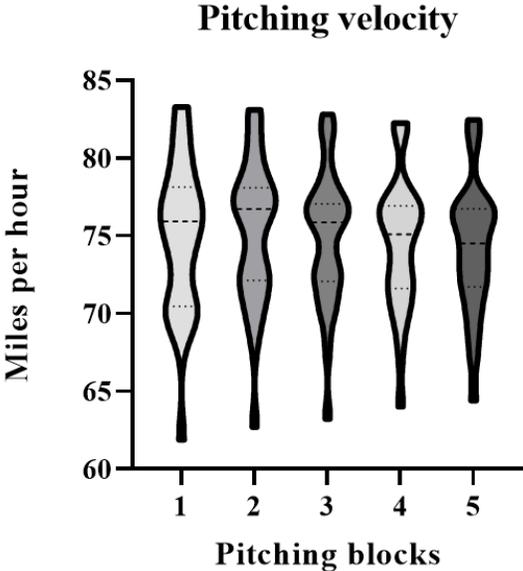


Figure 8. Pitching velocity evolution across pitching blocks. The middle-dotted line represents the mean pitching velocity across blocks. The lower and upper dotted line represent the 1st and 3rd quartile. The violin boxes represent the data distribution density for each pitching blocks.

Figure 9. Release height evolution across pitching blocks.

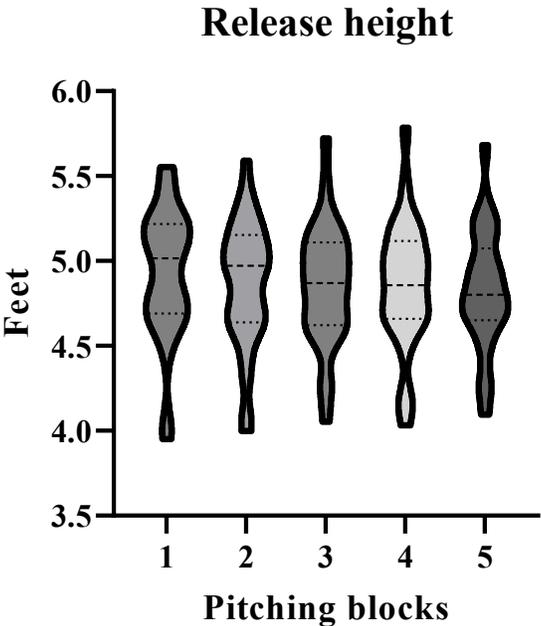


Figure 9. Release height evolution across pitching blocks. The middle-dotted line represents the mean release height across blocks. The lower and upper dotted line represent the 1st and 3rd quartile. The violin boxes represent the data distribution density for each pitching blocks.

Figure 10. Radial error evolution across pitching blocks (accuracy).

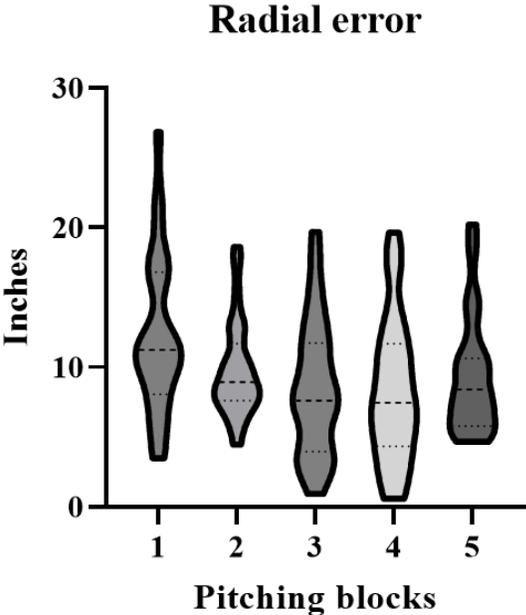


Figure 10. Radial error (accuracy) evolution across pitching blocks. The middle-dotted line represents the mean radial error across blocks. The lower and upper dotted line represent the 1st and 3rd quartile. The violin boxes represent the data distribution density for each pitching blocks.

Discussion

The purpose of the study was to quantify the effects of NF on baseball pitchers' performance throughout a 75 pitches session. The results showed that, with an increase in pitches thrown throughout the blocks of pitches, a significant decrease with moderate to large effect size in grip strength, on both dominant and non-dominant arms, pitching velocity, release height and radial error was found in pitchers. An increase with large effect size in both dominant and non-dominant arms for perceived muscle soreness was also displayed in our sample. Pitching velocity significantly decreased from block 1 to block 5 by a $0.84 \% \pm 3.01$ which represents a small decrease when considering game-related performances. Scientific evidence regarding decreases in pitching velocity linked to neuromuscular fatigue are heterogenous. Erickson et al. (2016) and Escamilla et al. (2007) also reported a small but significant decrease of pitching velocity in their respective study investigating kinematics and kinetics changes throughout a simulated game and the impact of fatigue on pitching mechanics in younger male adolescents (Erickson et al., 2016; R. F. Escamilla et al., 2007). In contrast, Dale et al. (2007) showed a small yet non-significant decrease of pitching velocity in their protocol of 60 full effort pitches divided in innings of 15 pitches (Dale et al., 2007). In the present study, along with pitching velocity, grip strength assessment was used to monitor neuromuscular fatigue across the pitching blocks. Being a factor associated with pitching velocity in different population and age groups (Mercier et al., 2020; Nakata et al., 2013; Tremblay et al., 2022), grip strength assessment reflects mostly the isometric strength and contraction of the forearm muscles. A decrease of 12.94 % ($55.67 \text{ kg} \pm 12.32$ to 48.62 kg

± 12.25) on the dominant arm and 7.04% (53.81 ± 12.08 to $49.94 \text{ kg} \pm 11.86$) on the non-dominant arm showed in this study that grip strength could be considered as a complementary measure to pitching velocity to assess fatigue in games or practices. Grip strength is an easy, inexpensive physical assessment and tool that can be used by coaches or health practitioners in practical settings or games to monitor muscle fatigue induced by repetitive throwing and to manage game decisions related to the athletes' performance and risk of upper extremity injury. The associations between grip strength and pitching performance remain to be studied in game settings.

In addition to a decrease of grip strength and pitching velocity, perceived muscle soreness intensity of the forearm flexors, biceps, anterior deltoid, and upper trapezius increased in both pitchers' arms. Interestingly, pain sensitivity threshold measured by pressure point threshold showed no difference in these same muscle sites across the pitching blocks. To our knowledge, our study is the first to assess the acute perceived muscle soreness and pressure pain threshold on both the throwing dominant and non-dominant arms across a pitching session and through several muscle sites. These findings, along with other studies that showed a decrease in range of motion of the dominant arm (Reinold et al., 2008), and sensorimotor acuity at the wrist, the elbow and the shoulder of the dominant arm (Tripp et al., 2007), suggest that a pitching session at high intensity might influence somatosensory information in male baseball pitchers.

Altogether, changes in perceived muscles soreness, range of motion and sensorimotor acuity could explain the decrease in pitchers' release height at release point across our experimentation. Interestingly, despite clear acute effects of NF shown in overhead

throwing athletes when multiple throws are required, in our study, pitchers seemed to maintain accuracy with only a slight decrease in radial error for ball accuracy meaning pitchers being more accurate toward the target across experimentation. From a motor control theory standpoint, this result could be explained by the motor synergy occurring while pitching in baseball pitchers. Motor synergy implies that multiple muscles are bound together and a central control signal proportionally activate all muscles involved in the synergy related to task demand (Latash, Scholz, & Schöner, 2007). Furthermore, when task demands change, with neuromuscular fatigue accumulation for example, the control signal changes and lead to parallel changes to maintain optimal performance (Latash et al., 2007).

To achieve high velocity and accuracy, the overhead throwing task in baseball implies that pitchers perform an explosive, repetitive and complex sequence of movements, with optimal timing of several limbs and joints (Dale et al., 2007). Such a complex sequence of movements can potentially bring intra and inter-individual variability caused by anthropometric differences and skill expertise. In the context of baseball pitching, it is possible to study the three types of movement variability proposed by the Cowin et al. (2022) study which are (1) the strategy used to complete the desired outcome like pitch type selection (e.g., fastball, curveball, change-up), (2) execution of the movement through kinematic and kinetic components such as velocity and torque as well as through muscle recruitment patterns (Srinivasan & Mathiassen, 2012) and finally (3) outcome variability such as pitch location measures (Cowin, Nimphius, Fell, Culhane, & Schmidt, 2022; Schmidt et al., 2018). Our study limited pitchers' strategic variability

with pitchers only allowed to throw the four-seam fastball aiming at the center of the target. Execution variability was limited to kinematic measures estimated at ball release where only the mean release height was found to decrease with the accumulation of pitches and pitching blocks. Also, outcome variability explained by error measurements showed that only radial error changed over time with a slight decrease through pitching blocks. These results are different from those reported by Freeston et al. (2014) who found that ball accuracy was an indicator of throwing arm fatigue in elite adolescent male baseball players with significant differences and increase for horizontal error, total error and absolute constant error while NF developed according to their experimental protocol (Freeston et al., 2014). The study, however, had a small sample size ($n = 13$), involved athletes that were not specifically pitchers and pitching assessment was not performed from a mound. Comparisons between studies are therefore limited.

Limitations

This study is not without limitations. On the one hand, maturation and age effects were not controlled in this study as athletes age ranged from 13 to 50 years old and age stratification was not possible due to the relatively small sample size. On the other hand, our sample represented pitchers from elite categories across large age groups and had to declare pitcher as one of their primary positions to be included in our study. Besides, the indoor controlled pitching environment may not quite reflect outdoor and game-specific conditions where other parameters could influence NF development and pitching performances. In addition, athletes' readiness to throw a simulated game was not

controlled for in the study even though we only included in the statistical analyses pitchers who were able to complete the protocol of 75 pitches in the results. Finally, our study required athletes to throw only fastballs at the center of a target and executing the same delivery through the pitching session whereas game-specific conditions require pitchers to adapt to game situation and aim and throw different pitches to get batters out.

Conclusion

In brief, our results showed that a pitching session of 75 pitches decreased male baseball pitchers' pitching velocity, grip strength, in both arms, and release height while perceived muscle soreness increased across the pitching session for the dominant and non-dominant arms for the forearm flexors, biceps, anterior deltoid, and upper trapezius muscles. For ball accuracy error results, only the radial error with a slight decrease across the pitching blocks meaning more accuracy was shown in pitchers across pitching blocks.

With the addition of a pitching clock to respect for pitchers in the Major League and Minor League of Baseball games combined with existing evidence showing negative acute effects of NF on pitching performance, further studies should investigate chronic effects of NF over time and days post pitching session such as exercise-induced muscle damage and delayed onset muscle soreness effects on repeated pitching performance and injury risks of the upper extremity considering the rule change.

Funding details: This research was supported by the *Chaire de recherche internationale en santé neuromusculosquelettique*.

Disclosure of interest: The authors declare no conflicts of interest.

6. Discussion

6.1. Rappel de l'objectif

Cette étude avait comme objectif de quantifier les effets de la fatigue neuromusculaire sur la performance des lanceurs de baseball lors d'une séance de plusieurs lancers, séparée en cinq blocs de 15 lancers, pour un total de 75 lancers. Les hypothèses étaient que, entre les blocs de lancers demandés aux lanceurs, la fatigue et le seuil de douleur à la pression mécanique allaient augmenter. Pour terminer, entre les blocs de lancers demandés aux lanceurs, la précision et la vitesse des lancers allaient diminuer.

6.2. Retour sur les principaux résultats

Notre étude montre que chez les lanceurs de baseball, une séance de 75 lancers entraîne une accumulation de FN et une diminution des paramètres de la performance des lanceurs. En effet, les résultats significatifs montrent que la répétition de lancers réduit la vitesse des lancers (diminution de 0,84 %), la force de préhension des bras dominant et non dominant (diminution de 12,94 % pour le bras dominant et 7,04 % pour le non-dominant) ainsi que la hauteur de relâchement de la balle (diminution de 4,82%), du début à la fin du protocole. De plus, la perception de raideur musculaire des fléchisseurs de l'avant-bras, du biceps, du deltoïde antérieur et du trapèze supérieur augmente significativement chez les lanceurs élités masculins, que ce soit pour le bras dominant ou non dominant, lors de la répétition de lancers. L'augmentation la plus marquée a été au biceps du bras dominant avec une augmentation de 23,70% du début à la fin du protocole.

De manière intéressante, les effets de la FN et de ses phénomènes associés sont également ressentis dans le bras non dominant chez les lanceurs, suggérant un effet controlatéral. Ces résultats sont intéressants considérant que le bras dominant, qui est le bras utilisé pour lancer la balle, est celui qui subit le plus d'impact sur les structures musculosquelettiques impliquées lors du lancer.

Contrairement à notre hypothèse initiale, aucun changement n'a été observé pour les mesures du seuil de douleur à la pression mécanique mesurées aux mêmes sites musculaires que ceux de la perception de raideur musculaire. Ensuite, les mesures d'erreurs calculées afin de mesurer la précision des lancers tout au long de la séance ont montré que l'erreur radiale diminuait, représentant le vecteur des axes X et Y combiné, suggérant une précision plus élevée des lanceurs. Il faut mentionner qu'à notre connaissance, peu d'études se sont intéressées à l'effet de la FN sur la précision des lancers chez des lanceurs de baseball. Nos résultats sont donc contraires à ceux retrouvés dans l'étude de Freeston et al. (2014) suggérant que la précision est un marqueur de la fatigue neuromusculaire lors de la répétition de lancers au baseball (Freeston et al., 2014). Cette étude n'a cependant pas mesuré la précision des lancers chez les lanceurs spécifiquement. De plus, les lancers n'étaient pas effectués sur un monticule comparativement à notre étude. Cette dernière étant spécifique à la demande lors des parties à cette position.

6.3. Outils de quantification de la fatigue neuromusculaire chez les lanceurs de baseball

Les résultats des travaux de recherche présentés dans ce mémoire suggèrent que la force de préhension et la perception de raideur musculaire sont des variables qui permettraient de quantifier, de façon indirecte, la FN et la charge externe induite par une séance de lancers répétés spécifique aux lanceurs de baseball. Les résultats concernant la force de préhension chez les lanceurs montrent un déclin significatif autant des bras dominant que non dominant. De son côté, la perception de raideur musculaire a augmenté significativement chez chacun des sites musculaires mesurés (fléchisseurs de l'avant-bras, biceps, deltoïde antérieur et trapèze supérieur). Ces outils qui permettent de quantifier ces variables sont peu dispendieux et faciles d'utilisation pour les intervenants de la santé attirés aux équipes sportives. En préparation physique, afin de gérer le volume d'entraînement des athlètes, les concepts de charge interne et externe sont souvent utilisés par les intervenants pour suivre le niveau de fatigue et de la charge d'entraînement des athlètes (Halson, 2014). D'un côté, la charge interne se réfère au stress physiologique et psychologique imposé par l'entraînement et se mesure par les paramètres internes de l'individu comme la perception de l'effort perçue (Foster, 1998), les mesures de fréquence cardiaque (Borresen & Lambert, 2008) ou encore les taux de métabolites sanguins dans le sang post-entraînement (Beneke, Leithäuser, & Ochentel, 2011). De l'autre côté, la charge externe se réfère au travail accompli par l'athlète lors de l'entraînement, comme le volume d'entraînement en répétition reflété par des mesures de puissance et de vitesse (Jobson, Passfield, Atkinson, Barton, & Scarf, 2009) et aussi par des mesures de la

fonction neuromusculaire avant, après ou pendant l'entraînement (Alba-Jiménez, Moreno-Doutres, & Peña, 2022).

En lien avec nos résultats, les mesures de la force de préhension et de perception de raideur musculaire seraient des évaluations pour mesurer la charge externe et interne respectivement et seraient spécifiques à la tâche de lancer qu'ont à effectuer les lanceurs au baseball. Comme mentionné dans les sections précédentes de la recension des écrits du mémoire, la FN est un phénomène qui est influencé par le type et les caractéristiques de la tâche ainsi que le statut physique de l'individu la réalisant. Les conclusions de la revue narrative de Alba-Jiménez et al. (2022) expliquent que l'utilisation et la sélection de mesures de FN spécifique à la tâche du sport qui devraient être choisies afin de suivre la charge d'entraînement chez les athlètes (Alba-Jiménez et al., 2022). L'objectif de leur revue était de décrire les tendances et mesures utilisées pour quantifier l'effet de la FN sur la performance sportive et le déclin du contrôle moteur dans les athlètes de sport d'équipe. Leur revue montre qu'il existe plusieurs outils intéressants afin de quantifier la charge interne et externe selon les différentes actions sportives. Les résultats de celle-ci soulèvent la réflexion sur les forces, les limites et leur acceptabilité par les athlètes dans le milieu sportif. Toujours selon eux, les mesures les plus fréquemment utilisées pour suivre la charge d'entraînement externe chez les athlètes de sports d'équipe se résument aux mesures de sauts verticaux et de sprints. Les outils les plus utilisés pour quantifier ces actions sportives sont les plateformes de force, les tapis de contact, les cellules photoélectriques, les systèmes de géolocalisation et les applications mobiles sur téléphones intelligents.

Il serait donc intéressant, dans de futures études, de comparer les différents résultats de sauts, de sprints et de force de préhension chez des lanceurs de baseball afin d'identifier quels sont les tâches ou tests de performance les plus sensibles à l'accumulation de la FN. De futures études à ce sujet permettraient d'améliorer le suivi du volume d'entraînement autant aigu, à l'intérieur des entraînements et parties, ainsi que chronique, à l'intérieur d'une saison complète ou sur des cycles d'entraînement, dans cette population et selon la tâche spécifique qu'est le lancer au baseball.

6.4. Impact de la fatigue centrale et périphérique sur la diminution de la performance des lancers

Les résultats de notre étude ont montré une diminution de la vitesse des lancers ainsi qu'une diminution de la force de préhension des bras dominant et non dominant à travers les différents blocs de lancers. Ces mesures représentaient autant une mesure de la performance pour la mesure de vitesse des lancers, qu'une mesure permettant de quantifier la FN tout au long de la séance de lancers. Comme discuté précédemment, la FN peut être d'origine centrale ou périphérique et les deux types de fatigue peuvent être présents au même moment et à différentes proportions dans le système nerveux (Taylor et al., 2016). Carroll et al. (2017) se sont intéressés à la récupération de la FN centrale et périphérique après l'exercice (Carroll et al., 2017). Les études incluses dans leur revue montrent que la récupération de la fatigue centrale diffère comparativement à celle d'origine périphérique. D'une part, la fatigue centrale peut prendre plusieurs heures voir jusqu'à plusieurs jours avant de récupérer complètement. D'une autre part, la récupération

de la fatigue périphérique peut se produire dans les minutes suivant l'exercice exécuté. Il faut cependant noter que les études s'intéressant à ces concepts de récupération de la fatigue sont majoritairement des études expérimentales avec des protocoles contrôlés en laboratoire incluant des tâches limitant le type de contraction musculaire et les degrés de liberté de celles-ci. Ces résultats ont des implications importantes pour les athlètes comme les lanceurs de baseball qui effectuent des lancers répétés à intensité maximale. Pour maintenir une performance optimale et éviter les effets délétères comme le risque de blessures musculosquelettiques, la récupération de la FN semble donc nécessaire.

Par ces résultats sur la vitesse des lancers et la force de préhension, la fatigue centrale serait potentiellement le type de fatigue le plus problématique, car celle-ci semble limiter davantage les athlètes à répéter des tâches exigeantes physiquement dans le temps et pourrait avoir un lien avec le déclin de la vitesse et de la force de préhension chez les lanceurs de baseball lors de notre étude. Pour mesurer l'effet de la fatigue centrale sur la performance des lanceurs, il serait intéressant de réaliser des séances de lancers répétés sur plusieurs journées consécutives.

Chez les lanceurs de baseball, le risque de blessures musculosquelettiques est toujours un sujet d'actualité dans le sport considérant l'augmentation constante de la vitesse des lancers dans les dernières années ainsi que l'augmentation de blessures aux coudes et à l'épaule chez ceux-ci (Castrovince, 2016; Labott et al., 2023). L'étude de Reinold et al. (2008) a montré que la FN pourrait être un facteur de risque de blessure chez les lanceurs de baseball vu les contractions excentriques répétées et appliquées aux

muscles fléchisseurs de l'avant-bras et ceux de l'épaule lors des différentes phases du lancer.

Considérant ces informations, la récupération de la FN chez les lanceurs de baseball semble cruciale afin de minimiser le risque de blessures et de maintenir des performances optimales sur le monticule. Carroll et al. (2017) suggèrent des méthodes pour améliorer la récupération après des tâches physiquement exigeantes comme le repos, les étirements et la stimulation électrique qui pourraient aider à accélérer la récupération de la fatigue (Carroll et al., 2017). Ces méthodes de récupération sont donc à considérer pour optimiser la récupération des lanceurs après leurs pratiques et parties.

6.5. Perturbations sensorimotrices lors de lancers répétés au baseball

Pour continuer, nos résultats ont montré un effet controlatéral de l'augmentation de la perception de raideur musculaire des sites musculaires du bras non dominant évalués lors de la séance de lancer, soit aux fléchisseurs de l'avant-bras, au biceps, au deltoïde antérieur et au trapèze supérieur. À l'inverse de notre hypothèse de départ, les seuils de douleur à la pression mesurés à ces mêmes sites musculaires n'ont pas changé de façon significative entre le début et la fin de l'expérimentation, autant pour le bras dominant que non dominant. En théorie, il est possible que l'exercice physique puisse causer de l'hypoalgésie qui se définit par une réduction de la sensibilité à la douleur lorsqu'un stimulus nociceptif est présent (Merskey, 1979). Ce même phénomène pourrait donc se produire chez les lanceurs de baseball lors d'une séance de lancers répétés. Plusieurs

études se sont intéressées à l'hypoalgésie causée par l'exercice et ont proposé des mécanismes potentiels pour expliquer ce phénomène (Koltyn, 2002; Naugle, Fillingim, & Riley III, 2012).

Tout d'abord, l'exercice physique semble augmenter le seuil d'apparition de la douleur ainsi que celui de sa tolérance, pendant et après l'exercice physique, dépendamment de son type et de son intensité (Koltyn, 2002). L'étude d'Hoffman et al. (2016), qui a examiné comment une activité de type aérobie influence l'analgésie causée par l'exercice, selon la durée et l'intensité de l'activité, a montré que les niveaux d'endorphines augmentent après l'exercice, en particulier lors d'exercices d'intensité modérée à élevée (Hoffman et al., 2016). De plus, dans leur méta-analyse sur les effets de l'exercice aigu sur la perception de la douleur, Naugle et al. (2012) ont constaté que les exercices en résistance de type intermittent et dynamique peuvent produire une hypoalgésie induite par l'exercice de moyenne à grande amplitude et influencer le seuil et la tolérance chez les adultes en bonne santé (Naugle et al., 2012). Bien que le lancer au baseball ne soit pas considéré comme de l'exercice de type aérobie ou de résistance, il s'agit d'une tâche de lancer dynamique intermittente et d'effort maximal impliquant différentes contractions musculaires, qui pourrait potentiellement employer ce mécanisme de modulation de la douleur. Ces mêmes endorphines sécrétées qui se lient aux récepteurs opioïdes du système endogène opioïde dans le cerveau semblent être le mécanisme sous-jacent de cette réduction de perception de douleur lors de l'exercice (Koltyn & Arbogast, 1998). La sérotonine et la noradrénaline seraient celles responsables de ce phénomène et pourraient également augmenter l'activité des systèmes inhibiteurs de la douleur dans le

SNC. Les études incluses dans la méta-analyse de Naugle et al. (2014) ont montré que l'exercice peut augmenter la densité des récepteurs opioïdes dans le cerveau et la moelle épinière réduisant donc la perception de la douleur (Naugle et al., 2014).

Ces résultats sur l'évolution de la douleur chez les lanceurs de baseball s'ajoutent aux connaissances actuelles qui montrent que lorsqu'il y a manifestation de la FN chez les lanceurs de baseball, des perturbations sensorimotrices sont observées. En effet, des études ont montré qu'avec la répétition de lancers, on retrouve une diminution de la proprioception et de l'amplitude de mouvement (Reinold et al., 2008; Tripp et al., 2007) chez les lanceurs de baseball.

En bref, l'hypoalgésie observée chez les lanceurs de baseball après l'exercice peut s'expliquer par une combinaison de sécrétion d'endorphines, de l'augmentation de l'activité des systèmes inhibiteurs de la douleur dans le SNC et des changements dans la sensibilité des récepteurs de la douleur dans le cerveau et la moelle épinière. Ensemble, ces mécanismes neurophysiologiques peuvent expliquer en partie pourquoi les lanceurs de baseball peuvent continuer à jouer malgré la perception élevée de raideur musculaire et articulaire associée à la répétition de lancers.

6.6. Les mesures de contrôle de mouvement chez les lanceurs de baseball en lien avec la tâche de lancer

Dans le domaine de la performance sportive, il y a récemment un intérêt croissant pour la variabilité des mouvements dans les études de contrôle moteur liées à la performance sportive et aux tâches motrices complexes. Cowin et al. (2022) définissent la variabilité des mouvements comme les variations normales de la performance motrice lorsqu'une tâche est répétée plusieurs fois (Cowin et al., 2022). Les auteurs ont proposé un cadre théorique pour décrire la variabilité des mouvements spécifiquement dans les tâches sportives et ont décrit trois types de variabilité possible. Le premier type concerne la variabilité stratégique expliquant les différentes méthodes ou choix de mouvements utilisés par un individu pour accomplir une tâche. Chez les lanceurs de baseball, ce concept pourrait se référer, par exemple, au type de lancer choisi pour retirer les frappeurs en match. Le deuxième type est la variabilité d'exécution et fait référence à l'adaptation consciente ou inconsciente du corps entre les répétitions tout en utilisant la même stratégie. Chez les lanceurs, ce concept se réfère à la cinématique et la cinétique lors de l'exécution de la motion du lancer. Le troisième type est la variabilité de résultat et fait référence aux différences dans le résultat ou le produit d'un mouvement. Chez les lanceurs, ce concept se réfère à la précision des lancers. Dans notre étude, nous demandions aux lanceurs de viser le centre de la cible en lançant le plus fort possible chaque lancer, de type balle rapide, tout au long de la séance de lancers, sans avoir recours à un autre type de lancers que les lanceurs auraient dans leur arsenal. Ces contraintes demandées aux

lanceurs dans notre expérimentation expliquent peut-être pourquoi les erreurs absolues, constantes, variables ainsi que la variabilité totale des lancers n'ont pas changé avec l'accumulation de la FN, autant sur l'axe des X que Y. Même que, pour l'erreur radiale, représentant l'erreur combinée en X et Y par rapport à la cible, nous avons pu observer une diminution de l'erreur et donc un ajustement positif de la précision des lanceurs tout au long de la séance. Ce résultat suggère un potentiel effet d'apprentissage des lanceurs sur le plan de la précision et du résultat des lancers tout au long de la séance. Il faut noter que la cible était immobile et qu'elle restait constante tout au long de la séance de lancers.

7. Limites

- 1) Les effets de maturation et de l'âge n'ont pas été contrôlés dans notre étude. Bien que nos participants représentent spécifiquement une population de lanceurs de niveau élite, l'âge des participants inclus allait de 13 à 50 ans. Les effets et mécanismes physiologiques de la FN peuvent potentiellement affecter différemment la performance motrice selon l'âge (Patikas, Williams, & Ratel, 2018). Cependant, nous avons recruté des athlètes des catégories de jeux les plus élites selon leur catégorie d'âge.
- 2) Notre étude s'est déroulée dans un environnement intérieur contrôlé de type laboratoire. Cet environnement ne représente pas tout à fait celui des parties selon lesquelles les lanceurs sont habitués. En revanche, le monticule utilisé en était un d'entraînement standard et nous avons les mêmes configurations au point de vue de la distance pour effectuer les lancers que lors des entraînements des athlètes.

- 3) Pour terminer, les contraintes du type de lancer à utiliser ainsi que la cible fixe à atteindre tout au long de la séance de lancers sont différentes de ce qui est demandé aux lanceurs lors des entraînements ou en situation de parties pour retirer des frappeurs.

8. Implications pratiques

Les résultats de notre étude sont intéressants pour les entraîneurs et les intervenants de la santé qui accompagnent les athlètes de baseball, notamment les lanceurs de baseball. Par nos résultats, nous pensons que l'utilisation de la force de préhension pourrait être une mesure complémentaire à la vitesse des lancers afin de suivre le niveau de FN chez des lanceurs de baseball. La force de préhension est d'ailleurs un facteur qui est associé à la vitesse des lancers dans plusieurs groupes d'âge. Considérant l'augmentation des blessures musculosquelettiques au coude et à l'épaule du bras lanceur chez ces athlètes, la force de préhension représente bien la force de contraction musculaire des fléchisseurs de l'avant-bras. Entre autres, ceux-ci agissent comme protecteur de l'articulation du coude lors de l'action de lancer. De surcroît, ces mêmes intervenants pourraient questionner davantage les lanceurs, lors d'une séance de plusieurs lancers, sur la perception de raideur musculaire perçue à la région de l'avant-bras, du bras et de l'épaule pour prendre des décisions éclairées et retirer un athlète des pratiques ou parties à des fins de prévention.

9. Perspective de recherches

Les résultats de notre projet ajoutent aux évidences concernant la FN et ses effets sur la performance des lanceurs de baseball, mais amènent des questionnements intéressants qui mériteraient d'être étudiés davantage. Tout d'abord, il est évident que les études s'intéressant à la FN chez les lanceurs de baseball s'intéressent surtout à l'accumulation de la FN causée par la répétition de lancers. En revanche, d'autres facteurs dans les entraînements des lanceurs peuvent induire de la FN dans cette population. Ceux-ci s'entraînent généralement en conditionnement physique pour améliorer leurs habiletés athlétiques et par le fait même, leur performance. Il serait donc intéressant d'étudier l'effet de la FN induite par des tâches de conditionnement physique, aux membres supérieurs et inférieurs, afin de comprendre leur influence sur la performance des lancers, lorsqu'effectués à la suite de ces tâches ou dans les jours suivants. Ensuite, peu d'études s'intéressent aux effets chroniques de la FN et de ces phénomènes associés, comme les courbatures musculaires, sur les facteurs de la performance des lanceurs lors d'une saison complète. Il serait intéressant de comprendre ces mécanismes chroniques chez les lanceurs afin d'optimiser la périodisation de leur entraînement et d'utilisation lors d'une saison.

10. Conclusion

En conclusion, les résultats de ce projet montrent que, chez les lanceurs de baseball, une session de 75 lancers fait diminuer la vitesse des lancers, la force de préhension des bras dominant et non dominant et la hauteur de relâchement du lancer tandis qu'une augmentation est observée pour la perception de raideur musculaire perçue aux sites musculaires des fléchisseurs de l'avant-bras, du biceps, du deltoïde antérieur et du trapèze supérieur, des bras dominant et non dominant. La précision des lanceurs, mesurée par l'erreur radiale, a diminué pendant la séance des lancers, expliquant une augmentation de la précision des lanceurs lors de l'expérimentation selon les contraintes qui leur étaient demandées envers la cible en place au-dessus du marbre.

Finalement, depuis 2019, notre groupe de recherche s'intéresse aux facteurs associés à la performance des athlètes de baseball au Québec et ce qui influence leur performance. Ces expériences en recherche jusqu'à maintenant ainsi que notre reconnaissance par le milieu du baseball au Québec me permettra de poursuivre mes études doctorales en sciences biomédicales tout en poursuivant nos travaux dans ce domaine des sciences du sport en nous associant avec le programme de l'Académie de baseball du Canada, le programme d'excellence de la fédération de *Baseball Québec*, afin d'étudier la performance de leurs athlètes annuellement.

Références

- Abboud, J., Lessard, A., & Descarreaux, M. (2021). Superficial lumbar muscle recruitment strategies to control the trunk with delayed-onset muscle soreness. *European journal of applied physiology*, 121, 2573-2583.
- Abboud, J., Lessard, A., Piché, M., & Descarreaux, M. (2019). Paraspinal muscle function and pain sensitivity following exercise-induced delayed-onset muscle soreness. *European journal of applied physiology*, 119, 1305-1311.
- Alba-Jiménez, C., Moreno-Doutres, D., & Peña, J. (2022). Trends assessing neuromuscular fatigue in team sports: a narrative review. *Sports*, 10(3), 33.
- Amann, M. (2012). Significance of Group III and IV muscle afferents for the endurance exercising human. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 39(9), 831-835.
- Amann, M., Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Mangum, T. S., & Venturelli, M. (2015). Autonomic responses to exercise: group III/IV muscle afferents and fatigue. *Autonomic neuroscience*, 188, 19-23.
- Baseball Quebec (2021). *Rulebook 2021*. Retrieved from https://www.publicationsports.com/ressources/files/289/2021-EN-Reglement_de_regie.pdf?t=1622649149:
- Baseball Québec. (2021). *Rapport annuel 2021*. Retrieved from https://www.publicationsports.com/ressources/files/289/rapport_annuel_2021.pdf?t=1639749210:
- Beneke, R., Leithäuser, R. M., & Ochentel, O. (2011). Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *International journal of sports physiology and performance*, 6(1), 8-24.
- Birfer, R., Sonne, M. W., & Holmes, M. W. (2019). Manifestations of muscle fatigue in baseball pitchers: a systematic review. *PeerJ*, 7, e7390.
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Quantifying training load: a comparison of subjective and objective methods. *International journal of sports physiology and performance*, 3(1), 16-30.
- Calvin, W. H. (1983). A stone's throw and its launch window: Timing precision and its implications for language and hominid brains. *Journal of theoretical Biology*, 104(1), 121-135.
- Carroll, T. J., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2017). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1068-1076.
- Castrovince, A. (2016). Speed trap: How velocity has changed baseball. *MLB news*.
- Chen, H.-H., Liu, C., & Yang, W.-W. (2016). Coordination pattern of baseball pitching among young pitchers of various ages and velocity levels. *Journal of sports sciences*, 34(17), 1682-1690.
- Clarkson, P. M., & Hubal, M. J. (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 81(11), S52-S69.
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., . . . Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*, 20(4), 397-402.

- Cowin, J., Nimphius, S., Fell, J., Culhane, P., & Schmidt, M. (2022). A Proposed Framework to Describe Movement Variability within Sporting Tasks: A Scoping Review. *Sports Medicine-Open*, 8(1), 1-24.
- Dale, R. B., Kovalski, J. E., Ogletree, T., Heitman, R. J., & Norrell, P. M. (2007). The effects of repetitive overhead throwing on shoulder rotator isokinetic work-fatigue. *North American journal of sports physical therapy: NAJSPT*, 2(2), 74.
- Diffendaffer, A. Z., Bagwell, M. S., Fleisig, G. S., Yanagita, Y., Stewart, M., Cain Jr, E. L., . . . Wilk, K. E. (2023). The clinician's guide to baseball pitching biomechanics. *Sports health*, 15(2), 274-281.
- Diffendaffer, A. Z., Slowik, J. S., Lo, N. J., Drogosz, M., & Fleisig, G. S. (2019). The influence of mound height on baseball movement and pitching biomechanics. *Journal of science and medicine in sport*, 22(7), 858-861.
- Dun, S., Fleisig, G. S., Loftice, J., Kingsley, D., & Andrews, J. R. (2007). The relationship between age and baseball pitching kinematics in professional baseball pitchers. *Journal of biomechanics*, 40(2), 265-270.
- Erickson, B. J., Chalmers, P. N., Axe, M. J., & Romeo, A. A. (2017). Exceeding pitch count recommendations in Little League baseball increases the chance of requiring Tommy John surgery as a professional baseball pitcher. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 5(3), 2325967117695085.
- Erickson, B. J., Sgori, T., Chalmers, P. N., Vignona, P., Lesniak, M., Bush-Joseph, C. A., . . . Romeo, A. A. (2016). The impact of fatigue on baseball pitching mechanics in adolescent male pitchers. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 32(5), 762-771.
- Escamilla, R., Fleisig, G., Barrentine, S., Andrews, J., & Moorman III, C. (2002). Baseball: Kinematic and Kinetic comparisons between American and Korean professional baseball pitchers. *Sports Biomechanics*, 1(2), 213-228.
- Escamilla, R. F., Barrentine, S. W., Fleisig, G. S., Zheng, N., Takada, Y., Kingsley, D., & Andrews, J. R. (2007). Pitching biomechanics as a pitcher approaches muscular fatigue during a simulated baseball game. *The American journal of sports medicine*, 35(1), 23-33.
- Fazarale, J. J., Magnussen, R. A., Pedroza, A. D., & Kaeding, C. C. (2012). Knowledge of and compliance with pitch count recommendations: a survey of youth baseball coaches. *Sports health*, 4(3), 202-204.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6), 381.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(7), 1164-1168.
- Freeston, J., Adams, R., Ferdinands, R. E., & Rooney, K. (2014). Indicators of throwing arm fatigue in elite adolescent male baseball players: a randomized crossover trial. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(8), 2115-2120.
- Freeston, J., Ferdinands, R. E., & Rooney, K. (2015). The launch window hypothesis and the speed-accuracy trade-off in baseball throwing. *Perceptual and motor skills*, 121(1), 135-148.
- Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports medicine*, 44(Suppl 2), 139-147.

- Härkönen, R., Harju, R., & Alaranta, H. (1993). Accuracy of the Jamar dynamometer. *Journal of Hand Therapy, 6*(4), 259-262.
- Jobson, S. A., Passfield, L., Atkinson, G., Barton, G., & Scarf, P. (2009). The analysis and utilization of cycling training data. *Sports medicine, 39*, 833-844.
- Kawamura, K., Shinya, M., Kobayashi, H., Obata, H., Kuwata, M., & Nakazawa, K. (2017). Baseball pitching accuracy: an examination of various parameters when evaluating pitch locations. *Sports Biomechanics, 16*(3), 399-410.
- Koltyn, K. F. (2002). Exercise-induced hypoalgesia and intensity of exercise. *Sports medicine, 32*, 477-487.
- Koltyn, K. F., & Arbogast, R. (1998). Perception of pain after resistance exercise. *British journal of sports medicine, 32*(1), 20-24.
- Kos, A., Wei, Y., Tomažič, S., & Umek, A. (2018). The role of science and technology in sport. *Procedia Computer Science, 129*, 489-495.
- Kusafuka, A., Kobayashi, H., Miki, T., Kuwata, M., Kudo, K., Nakazawa, K., & Wakao, S. (2020). Influence of release parameters on pitch location in skilled baseball pitching. *Frontiers in Sports and Active Living, 2*, 36.
- Labott, J. R., Leland, D. P., Till, S. E., Diamond, A., Hintz, C., Dines, J. S., & Camp, C. L. (2023). A Number of Modifiable and Non-Modifiable Factors Increase the Risk for Elbow Medial Ulnar Collateral Ligament Injury in Baseball Players: A Systematic Review. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor control, 11*(3), 276-308.
- Lau, W. Y., Muthalib, M., & Nosaka, K. (2013). Visual analog scale and pressure pain threshold for delayed onset muscle soreness assessment. *Journal of Musculoskeletal Pain, 21*(4), 320-326.
- Li, F., Wilkens, L. R., Novotny, R., Fialkowski, M. K., Paulino, Y. C., Nelson, R., . . . Boushey, C. J. (2016). Anthropometric measurement standardization in the US-affiliated pacific: Report from the Children's Healthy Living Program. *American Journal of Human Biology, 28*(3), 364-371.
- Liebermann, D. G., Katz, L., Hughes, M. D., Bartlett, R. M., McClements, J., & Franks, I. M. (2002). Advances in the application of information technology to sport performance. *Journal of sports sciences, 20*(10), 755-769.
- Lin, C.-H., Shih, H.-C., & Wang, W.-Y. (2019). *Evaluations of Flight Dynamic Parameters for Smart Baseballs*. 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE).
- Mailloux, C., Beaulieu, L.-D., Wideman, T. H., & Masse-Alarie, H. (2021). Within-session test-retest reliability of pressure pain threshold and mechanical temporal summation in healthy subjects. *Plos one, 16*(1), e0245278.
- Matsuo, T., Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., & Andrews, J. R. (2001). Comparison of kinematic and temporal parameters between different pitch velocity groups. *Journal of applied biomechanics, 17*(1), 1-13.
- Mercier, M.-A., Tremblay, M., Daneau, C., & Descarreaux, M. (2020). Individual factors associated with baseball pitching performance: scoping review. *BMJ open sport & exercise medicine, 6*(1), e000704.
- Merskey, H. (1979). Pain terms: a list with definitions and notes on usage. Recommended by the IASP Subcommittee on Taxonomy. *Pain, 6*, 249-252.

- Mirabito, N. S., Topley, M., & Thomas, S. J. (2022). Acute Effect of Pitching on Range of Motion, Strength, and Muscle Architecture. *The American journal of sports medicine*, 50(5), 1382-1388.
- Molina, S. L., Bott, T. S., & Stodden, D. F. (2019). Applications of the speed–accuracy trade-off and impulse-variability theory for teaching ballistic motor skills. *Journal of Motor Behavior*.
- Murray, N. B., Black, G. M., Whiteley, R. J., Gahan, P., Cole, M. H., Utting, A., & Gabbett, T. J. (2017). Automatic detection of pitching and throwing events in baseball with inertial measurement sensors. *International journal of sports physiology and performance*, 12(4), 533-537.
- Nakata, H., Nagami, T., Higuchi, T., Sakamoto, K., & Kanosue, K. (2013). Relationship between performance variables and baseball ability in youth baseball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(10), 2887-2897.
- Nasu, D., & Kashino, M. (2021). Impact of each release parameter on pitch location in baseball pitching. *Journal of sports sciences*, 39(10), 1186-1191.
- Naugle, K. M., Fillingim, R. B., & Riley III, J. L. (2012). A meta-analytic review of the hypoalgesic effects of exercise. *The Journal of pain*, 13(12), 1139-1150.
- Olsen, S. J., Fleisig, G. S., Dun, S., Loftice, J., & Andrews, J. R. (2006). Risk factors for shoulder and elbow injuries in adolescent baseball pitchers. *The American journal of sports medicine*, 34(6), 905-912.
- Omeregíe, P. O. (2016). *The Impact of technology on sport performance*. INCEDI 2016 Conference.
- Oyama, S., Yu, B., Blackburn, J. T., Padua, D. A., Li, L., & Myers, J. B. (2013). Effect of excessive contralateral trunk tilt on pitching biomechanics and performance in high school baseball pitchers. *The American journal of sports medicine*, 41(10), 2430-2438.
- Patikas, D. A., Williams, C. A., & Ratel, S. (2018). Exercise-induced fatigue in young people: advances and future perspectives. *European journal of applied physiology*, 118, 899-910.
- Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of physiology*, 537(2), 333-345.
- Rapsodo. (2022). Rapsodo Pitching 2.0 User manual.
- Reinold, M. M., Wilk, K. E., Macrina, L. C., Sheheane, C., Dun, S., Fleisig, G. S., . . . Andrews, J. R. (2008). Changes in shoulder and elbow passive range of motion after pitching in professional baseball players. *The American journal of sports medicine*, 36(3), 523-527.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C., Wulf, G., & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis: Human kinetics*.
- Sesboüé, B., & Guinestre, J.-Y. (2006). *La fatigue musculaire*. Annales de réadaptation et de médecine physique.
- Solomito, M. J., Garibay, E. J., & Nissen, C. W. (2018). Sagittal plane trunk tilt is associated with upper extremity joint moments and ball velocity in collegiate baseball Pitchers. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 6(10), 2325967118800240.
- Solomito, M. J., Garibay, E. J., Woods, J. R., Öunpuu, S., & Nissen, C. W. (2015). Lateral trunk lean in pitchers affects both ball velocity and upper extremity joint moments. *The American journal of sports medicine*, 43(5), 1235-1240.

- Sparrow, W. A., & Newell, K. M. (1998). Metabolic energy expenditure and the regulation of movement economy. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(2), 173-196.
- Srinivasan, D., & Mathiassen, S. E. (2012). Motor variability in occupational health and performance. *Clinical biomechanics*, 27(10), 979-993.
- Stodden, D. F., Fleisig, G. S., McLean, S. P., & Andrews, J. R. (2005). Relationship of biomechanical factors to baseball pitching velocity: within pitcher variation. *Journal of applied biomechanics*, 21(1), 44-56.
- Stodden, D. F., Fleisig, G. S., McLean, S. P., Lyman, S. L., & Andrews, J. R. (2001). Relationship of pelvis and upper torso kinematics to pitched baseball velocity. *Journal of applied biomechanics*, 17(2), 164-172.
- Stone, B. L., & Schilling, B. K. (2020). Neuromuscular Fatigue in Pitchers Across a Collegiate Baseball Season. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(7), 1933-1937.
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R., & Rice, C. L. (2016). Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2294.
- Tremblay, M., Tétreau, C., Corbin-Berrigan, L.-A., & Descarreaux, M. (2022). Anthropometrics, athletic abilities and perceptual-cognitive skills associated with baseball pitching velocity in young athletes aged between 10 and 22 years old. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4.
- Tripp, B. L., Yochem, E. M., & Uhl, T. L. (2007). Functional fatigue and upper extremity sensorimotor system acuity in baseball athletes. *Journal of athletic training*, 42(1), 90.
- Wan, J.-j., Qin, Z., Wang, P.-y., Sun, Y., & Liu, X. (2017). Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Experimental & molecular medicine*, 49(10), e384-e384.
- Wang, C.-C., Tsai, C.-Y., Lin, H.-W., Chiang, C.-W., & Chang, C.-K. (2009). Skeletal Muscle Damage After Pitching Real Games in Collegiate Baseball Pitchers. *International Journal of Sport and Exercise Science*, 1(2), 51-54.
- Weavil, J. C., & Amann, M. (2019). Neuromuscular fatigue during whole body exercise. *Current opinion in physiology*, 10, 128-136.
- Williams, C., & Ratel, S. (2009). *Human muscle fatigue*: Routledge.
- Zaremski, J. L., Zeppieri Jr, G., Jones, D. L., Tripp, B. L., Bruner, M., Vincent, H. K., & Horodyski, M. (2018). Unaccounted workload factor: game-day pitch counts in high school baseball pitchers—an observational study. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 6(4), 2325967118765255.

ANNEXE A : certification éthique



Le 9 juillet 2021

Monsieur Mathieu Tremblay
Étudiant
Département des sciences de l'activité physique

Monsieur,

J'accuse réception des documents corrigés nécessaires à la réalisation de votre protocole de recherche intitulé **Effets de la fatigue musculaire sur la précision, la vitesse et la variabilité des lancers chez les jeunes joueurs de baseball** en date du 8 juillet 2021.

Vous trouverez ci-joint votre certificat portant le numéro (CER-21-278-07.24). Sa période de validité s'étend du 9 juillet 2021 au 9 juillet 2022.

Je vous invite à prendre connaissance de votre certificat qui présente vos obligations à titre de responsable d'un projet de recherche.

Je vous souhaite la meilleure des chances dans vos travaux et vous prie d'agréer, Monsieur, mes salutations distinguées.



FANNY LONGPRÉ
Adjointe au doyen
Décanat de la recherche et de la création

FL/nr

p. j. Certificat d'éthique

c. c. M. Martin Descarreaux, professeur au Département des sciences de l'activité physique



CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS

En vertu du mandat qui lui a été confié par l'Université, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains a analysé et approuvé pour certification éthique le protocole de recherche suivant :

Titre : Effets de la fatigue musculaire sur la précision, la vitesse et la variabilité des lancers chez les jeunes joueurs de baseball

Chercheur(s) : Mathieu Tremblay
Département des sciences de l'activité physique

Organisme(s) : Chaire de recherche en santé NeuroMSK

N° DU CERTIFICAT : CER-21-278-07.24

PÉRIODE DE VALIDITÉ : Du 09 juillet 2021 au 09 juillet 2022

En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage à :

- Aviser le CER par écrit des changements apportés à son protocole de recherche avant leur entrée en vigueur;
- Procéder au renouvellement annuel du certificat tant et aussi longtemps que la recherche ne sera pas terminée;
- Aviser par écrit le CER de l'abandon ou de l'interruption prématurée de la recherche;
- Faire parvenir par écrit au CER un rapport final dans le mois suivant la fin de la recherche.

Me Richard LeBlanc
Président du comité

Fanny Longpré
Secrétaire du comité

Décanat de la recherche et de la création

Date d'émission : 09 juillet 2021