

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

LE RÔLE DU NEUROTRACKER DANS LA PRISE EN CHARGE DES COMMOTIONS CÉRÉBRALES

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

**PAR
JEAN-MICHEL ACQUIN**

AVRIL 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAITRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Direction de recherche :

Laurie-Ann Corbin-Berrigan, CAT(C), Ph.D. Université du Québec à Trois-Rivières
Prénom et nom directrice de recherche

| | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Philippe Fait, CAT(C), Ph.D. | Université du Québec à Trois-Rivières |
| Prénom et nom | codirecteur de recherche |

Jury d'évaluation :

| | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Philippe Fait, CAT(C), Ph.D. | Université du Québec à Trois-Rivières |
| Prénom et nom | Membre du jury |

| | |
|------------------------|---------------------------------------|
| Benjamin Boller, Ph.D. | Université du Québec à Trois-Rivières |
| Prénom et nom | Membre du jury |

| | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Martin Lavallière, Ph.D. | Université du Québec à Chicoutimi |
| Prénom et nom | Membre externe du jury |

Résumé

La commotion cérébrale touche de nombreuses personnes pratiquant des activités sportives et est reconnue comme étant un enjeu de santé publique. Cette blessure provoque des altérations au niveau physique, cognitif et émotionnel, ainsi que l'apparition de signes et symptômes communs. Les athlètes universitaires constituent un groupe particulièrement touché où de nombreux cas sont recensés.

La prise en charge de cette blessure constitue un défi pour les professionnels de la santé, surtout en raison de l'absence d'outil d'évaluation objectif permettant une détection et un suivi adéquats. L'identification et le retour aux activités sont majoritairement fondés sur les signes et symptômes autorapportés. Certains outils sont à la disposition des cliniciens, mais leur efficacité demeure incertaine. Le Neurotracker, initialement conçu pour entraîner les capacités perceptivo-cognitives, fut ciblé comme étant potentiellement pertinent pour la prise en charge des commotions cérébrales. Il permettrait d'évaluer objectivement les capacités perceptivo-cognitives des blessés.

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire a permis d'observer l'effet de la commotion cérébrale et le rôle des symptômes sur la performance d'athlètes universitaires à une batterie de tests spécifiques à la blessure, incluant le Neurotracker, 48 à 72 heures post-blessure et durant un suivi de cinq visites. Cette batterie était aussi composée de l'Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT), un questionnaire d'efficacité personnelle dans un contexte sportif, du Ruler Drop Test et du

Balance Error Scoring System (BESS). Durant cette étude, 159 athlètes de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) ont réalisé des mesures de référence en présaison et 20 d'entre eux ont intégré la phase post-commotion cérébrale à la suite d'un diagnostic de commotion cérébrale. Les comparaisons entre les performances au Neurotracker ont démontré une différence significative entre celles réalisées 48-72 heures après la blessure et à la 5^e visite pour le groupe mixte et des hommes, avec des performances plus élevées à la 5^e visite. Des différences significatives furent observées chez les hommes au niveau du nombre de symptômes, plus élevé 48-72 heures post-blessure qu'en présaison, ainsi qu'au niveau de l'efficacité personnelle des athlètes, plus faible lors de la phase aiguë et à la 5^e visite qu'en présaison. De plus, une forte corrélation négative fut observée entre le score total des symptômes et le score du questionnaire d'efficacité personnelle sur les items reliés aux problèmes spécifiques à la blessure chez les femmes. Les résultats de cette étude démontrent que la commotion cérébrale n'affecte pas la performance au Neurotracker, ce qui ne permet pas la recommandation de cet outil pour l'évaluation des capacités perceptivo-cognitives en phase aiguë de la blessure. Toutefois, il pourrait être intéressant d'étudier davantage l'effet de la blessure sur les gains d'apprentissage au Neurotracker. En outre, l'étude a permis d'observer une diminution significative de l'efficacité personnelle des athlètes en contexte sportif à la suite d'une commotion cérébrale, un résultat mettant en lumière l'importance de l'évaluation psychologique.

Mots-clés : Traumatisme craniocérébral léger; commotion cérébrale; Neurotracker; évaluation.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| RÉSUMÉ | I |
| LISTE DES FIGURES..... | V |
| LISTE DES TABLEAUX..... | VI |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | VII |
| REMERCEMENTS | IX |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE | 5 |
| 2.1 Description | 6 |
| 2.2 Incidence/Épidémiologie | 7 |
| 2.3 Physiopathologie | 10 |
| 2.4 Diagnostic et évaluation | 13 |
| 2.5 Pronostic et complications..... | 20 |
| 2.6 Le Neurotracker comme piste de solution | 22 |
| 2.6.1 Le Neurotracker | 22 |
| 2.6.2 L'entraînement au Neurotracker | 23 |
| 2.6.3 Le Neurotracker comme outil de mesure | 26 |
| 2.6.4 Le Neurotracker comme outil de mesure objective de la commotion cérébrale | 27 |
| CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE..... | 30 |
| CHAPITRE 4 OBJECTIFS DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES | 36 |
| CHAPITRE 5 BATTERIE DE TESTS SPÉCIFIQUES À LA COMMOTION CÉRÉBRALE | 38 |
| 5.1 Neurotracker..... | 39 |
| 5.2 Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test..... | 41 |

| | |
|--|------------|
| 5.3 Questionnaire d'efficacité personnelle | 42 |
| 5.4 Test de lâcher de règle (Ruler Drop Test) | 43 |
| 5.5 Système de notation des erreurs d'équilibre (Balance Error Scoring System) | 44 |
| CHAPITRE 6 ARTICLE SCIENTIFIQUE..... | 46 |
| <i>Abstract</i> | 48 |
| <i>Introduction</i> | 51 |
| <i>Methods</i> | 53 |
| <i>Results</i> | 60 |
| <i>Discussion</i> | 67 |
| CHAPITRE 7 DISCUSSION | 75 |
| 7.1 Comparatif présaison et 48-72 heures post-commotion cérébrale..... | 76 |
| 7.2 Suivi de la commotion cérébrale | 84 |
| 7.3 Différences entre les sexes biologiques | 92 |
| 7.4 Limitations | 95 |
| 7.5 Perspectives | 96 |
| CHAPITRE 8 CONCLUSION..... | 99 |
| RÉFÉRENCES..... | 101 |
| ANNEXES..... | 115 |
| <i>Annexe A : Questionnaire d'efficacité personnelle</i> | 115 |
| <i>Annexe B : Tableaux supplémentaires de l'article</i> | 117 |
| <i>Annexe C : Certificat d'éthique</i> | 124 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : <i>Diagnostic de la commotion cérébrale</i> | 15 |
| Figure 2 : <i>Exemple Neurotracker</i> | 41 |
| Figure 3: <i>Experimental protocol</i> | 55 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Table 1. Demographic characteristics of participants | 60 |
| Table 2. Neurotracker and tests battery performances comparisons between preseason, T1 and T5..... | 64 |
| Table 3. Correlations between symptoms and mTBI tests battery..... | 66 |
| Table 4. Supplementary file 1: Neurotracker and tests battery performances comparisons between preseason, T1 and T5 | 117 |
| Table 5. Supplementary file 2 : Correlations between symptoms and mTBI tests battery | 121 |

Liste des abréviations

3D : Trois dimensions

3D-MOT : Three-dimensional multiple object tracking

a : Unable, because of missing data

b : No result, because all participants scored 0 on this test

ADHD : Attention-deficit/hyperactivity disorder

APP : Protéines précurseur de l'amyloïde

BESS : Balance Error Scoring System

ChEERS : Children's Exertional Effect Scale

ICC : Impulse control composite

ImPACT : Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test

IRM : Imagerie par résonance magnétique

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

M : Men

m/s : Mètre par seconde

MC : Memory composite

MOT : Suivi d'objets multiples

mTBI : Mild traumatic brain injury

n : Number

NCAA : National Collegiate Athletic Association

NOS : Number of symptoms

NT : Neurotracker

O : Overall

PCSS : Post-Concussion Symptom Scale

PRPAS : Presentation related to physical activity score

PS : Preseason

RDT : Ruler Drop Test

RTC : Reaction time composite

RTP : Return-to-play

SCAT6 : Sport Concussion Assessment Tool 6

SD : Standard deviation

Sig. : Significance level

TCCL : Traumatisme craniocérébral léger

TDAH : Trouble du Déficit d'Attention avec/sans Hyperactivité

TSS : Total score symptoms

T1 : First follow-up visit

T5 : Fifth follow-up visit

UQTR : Université du Québec à Trois-Rivières

VMSC : Visual motor speed composite

W : Women

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier ma directrice, Laurie-Ann, pour son support, son encadrement et sa disponibilité exceptionnels ainsi que mon co-directeur, Philippe, pour son aide, ses conseils et son appui grandement appréciés. Merci à vous deux pour tout ce que vous avez fait et de m'avoir donné la chance de réaliser cette maîtrise. Merci à toute l'équipe, particulièrement Elizabeth, Audrey, Alexandrine, Yannick, Katherine, Maée et Ariane, pour votre contribution à ce projet de recherche. Votre apport et votre aide ont été indispensables à la réalisation de ce projet. Je tiens à remercier tous mes collègues de laboratoire qui ont permis d'agrémenter ce parcours à la maîtrise. Merci également à tous les athlètes des Patriotes qui ont accepté de participer à ce projet de recherche ainsi qu'à Étienne, Kyle, Julien et Jean-François pour votre aide. Pour terminer, je désire sincèrement remercier ma famille et mes amis pour votre soutien et vos encouragements durant ce parcours à la maîtrise, j'en suis grandement reconnaissant.

CHAPITRE 1

Introduction

Les commotions cérébrales représentaient en moyenne 93 % des traumatismes crâniens attribués aux activités sportives et récréatives chez les jeunes au Canada signalés entre 2011 et 2017 au Système canadien hospitalier d'information et de recherche en prévention des traumatismes (Gouvernement du Canada, 2018). En 2015-2016, plus de 64 000 Québécois ont consulté un professionnel de la santé pour traiter cette blessure. De ce nombre, environ 16 000 personnes étaient âgées de 18 à 24 ans, ce qui représente 25 % des Québécois ayant consulté pour traiter une commotion cérébrale (Gouvernement du Québec, 2022). Les athlètes universitaires, qui appartiennent à cette tranche d'âge, présentent un risque accru et constituent une population particulièrement touchée par ce type de blessure (Acquin *et al.*, 2024 ; Chandran *et al.*, 2022). À titre d'exemple, chaque année aux États-Unis, plus de 10 500 étudiants de la National Collegiate Athletic Association (NCAA) subissent une commotion cérébrale (Chandran *et al.*, 2022). De plus, dans une étude menée au sein d'athlètes universitaires québécois, 48,5 % des 136 athlètes sondés ont rapporté un historique de commotion cérébrale (Acquin *et al.*, 2024).

La commotion cérébrale est un traumatisme craniocérébral causé par une force biomécanique directe ou indirecte transmise à la tête, provoquant un éventail de présentations cliniques, plus particulièrement des symptômes subjectifs rapportés par les blessés comme un déficit cognitif, moteur et/ou des troubles du sommeil (Patricios *et al.*, 2023b). Afin d'assurer une prise en charge adéquate, un diagnostic doit être émis rapidement et adéquatement après la blessure. Présentement, les professionnels de la santé font face à deux problèmes concernant la gestion des commotions cérébrales. En premier

lieu, les cliniciens n'ont aucun outil objectif de référence à leur disposition pour identifier cette blessure. Il y a donc une problématique à ce niveau, puisque la quasi-totalité des outils cliniques de dépistage de la commotion cérébrale se fie à la présentation subjective des patients, d'où l'importance d'avoir un outil d'évaluation valide et efficace permettant l'identification et le suivi de la blessure. En deuxième lieu, les déficits cliniques associés à la commotion cérébrale peuvent se faire ressentir au-delà de la présentation des symptômes (Fait *et al.*, 2009). Cela rend la gestion du retour au jeu difficile pour les cliniciens, puisqu'ils doivent s'assurer que les athlètes sont en mesure de respecter les exigences de leur sport sans se blesser à nouveau ou aggraver leur condition actuelle. Cette situation représente un défi, particulièrement chez les athlètes universitaires, car ils retournent rapidement à leurs activités académiques et sportives, tout en ayant potentiellement des déficits persistants.

Dans ce mémoire, le Neurotracker, initialement développé pour l'entraînement perceptivo-cognitif afin d'améliorer les performances sportives, sera présenté comme un outil potentiel pour répondre au manque d'outil objectif pour l'identification et le suivi de la commotion cérébrale (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). Le Neurotracker évalue la capacité d'un individu à suivre différentes cibles en mouvement dans un environnement virtuel, à travers des objets identiques servant de distractions. Contrairement à d'autres tests cognitifs utilisés dans un contexte de commotion cérébrale comme le Sport Concussion Assessment Tool 6 (SCAT6), la tâche du Neurotracker s'apparente davantage à des tâches de certaines activités quotidiennes et sportives en raison de son environnement dynamique

(Faubert et Sidebottom, 2012). Cet outil perceptivo-cognitif semble intéressant dans notre contexte puisqu'il solliciterait des fonctions cognitives nécessaires à la pratique de sport ainsi que celles pouvant être altérées à la suite d'une commotion cérébrale telles que l'attention soutenue, la mémoire de travail et la vitesse de traitement de l'information (Faubert et Sidebottom, 2012; Vater *et al.*, 2021).

CHAPITRE 2

Revue de littérature

2.1 Description

La commotion cérébrale, également nommée traumatisme craniocérébral léger (TCCL), est une blessure traumatique du cerveau causée par une force biomécanique directe ou indirecte transmise à la tête provoquant des manifestations cliniques (Patricios *et al.*, 2023b). Cette force transmise à la tête peut provenir, par exemple, d'un contact avec un objet, une personne ou lors d'une chute. Les personnes blessées peuvent présenter des signes et des symptômes affectant les fonctions cognitives et physiques, les émotions ainsi que le sommeil (Giza et Hovda, 2014 ; Patricios *et al.*, 2023b). Dans certains cas, les effets de la commotion cérébrale peuvent évoluer après quelques minutes ou plusieurs heures. Les signes et symptômes peuvent apparaître immédiatement ou jusqu'à 72 heures après la blessure (Silverberg *et al.*, 2023). Ces signes et symptômes ne doivent pas être causés par la consommation de drogue ou d'alcool, la prise de médicament, des comorbidités ou par d'autres blessures comme une entorse cervicale (Patricios *et al.*, 2023b). En général, la résolution des symptômes s'étendra sur une période de 10 à 14 jours chez les adultes (Putukian *et al.*, 2023). Toutefois, une étude récente montre que le retour à la compétition sportive s'effectue en moyenne 19,8 jours après la commotion cérébrale (Putukian *et al.*, 2023). Ce retour plus tardif pourrait s'expliquer par l'avancement des connaissances et l'application des recommandations plus strictes en matière d'évaluation des commotions cérébrales (Putukian *et al.*, 2023). Également, certaines personnes (jusqu'à 30 % des cas) (Schneider *et al.*, 2023) peuvent ressentir des symptômes et des déficits cognitifs ou

physiques tels que des maux de tête, de la fatigue, des problèmes de concentration et de mémoire qui persisteront au-delà de cette période et pouvant durer pendant plus de trois mois (Barlow, 2016 ; Patricios *et al.*, 2023a).

Ce traumatisme cause une perturbation des fonctions cérébrales menant à un processus physiopathologique complexe (Harmon *et al.*, 2013). La commotion cérébrale se différencie des autres traumatismes craniocérébraux par ses caractéristiques qui sont moins sévères qu'un traumatisme craniocérébral modéré ou sévère. Contrairement aux autres catégories de traumatismes craniocérébraux, il n'est habituellement pas possible de détecter des anomalies au niveau du tissu cérébral à l'aide des différentes techniques d'imagerie médicale conventionnelles chez les personnes ayant subi une commotion cérébrale. On observe donc des troubles d'ordre fonctionnel plutôt que structurel (Najem *et al.*, 2018). De plus, aucun biomarqueur propre aux commotions cérébrales n'est également identifié à ce jour. Les résultats sont inconstants d'une étude à l'autre, ce qui ne permet pas de cibler certains biomarqueurs pour le diagnostic de cette blessure (Patricios *et al.*, 2023b ; Tabor *et al.*, 2023). Ces caractéristiques démontrent la complexité de la commotion cérébrale tant au moment de l'identifier que pour sa prise en charge et le suivi de sa guérison.

2.2 Incidence/Épidémiologie

La commotion cérébrale est considérée comme un enjeu de santé publique important en raison de sa fréquence élevée, notamment lors des activités sportives (Wiebe

et al., 2011). Depuis 2010, on constate une hausse marquée du nombre de commotions cérébrales diagnostiquées au Québec. En 2009-2010, les commotions cérébrales représentaient 3,2 % des traumatismes survenus lors de la pratique sportive et l'on estimait le nombre de personnes ayant subi une commotion cérébrale à 21 000. En 2015-2016, cette proportion augmente à 5,8 % et le nombre de consultations s'élève à plus de 64 000 (Gouvernement du Québec, 2022). Cette augmentation pourrait notamment être due à l'avancement des connaissances sur la blessure, à l'amélioration des outils d'identification ainsi qu'à la sensibilisation et l'éducation faites auprès de la population (Pierpoint et Collins, 2021). Lorsque l'on compare la proportion des consultations pour une commotion cérébrale entre les hommes et les femmes, celle-ci est relativement plus élevée chez les hommes, à 65 %. Cette plus grande représentation pourrait être expliquée par leur plus grande participation aux activités sportives (Gouvernement du Québec, 2022). Cependant, on observe une hausse du nombre de visites aux urgences en raison d'une commotion cérébrale plus marquée chez les femmes. Entre 2010 et 2017, la variation annuelle du nombre de visites aux urgences est de 13 % chez les femmes comparativement à 6,6 % chez les hommes (Agence de la santé publique du Canada, 2020).

Pour leur part, les jeunes adultes du Québec représentent 41 % des personnes ayant subi une commotion cérébrale en 2015-2016 (Gouvernement du Québec, 2022). Les athlètes universitaires, faisant partie de cette tranche d'âge, sont donc un groupe particulièrement à risque (Acquin *et al.*, 2024 ; Chandran *et al.*, 2022). Des études

réalisées auprès d'athlètes de la NCAA ont démontré que pour chaque tranche de 10 000 participations sportives, 4,13 commotions cérébrales sont rapportées par les athlètes universitaires (Chandran *et al.*, 2022) et 6,2 % des blessures rapportées par les étudiants-athlètes sont des commotions cérébrales (Zuckerman *et al.*, 2015). Le risque de subir cette blessure est particulièrement plus élevé dans les sports de contacts, notamment au hockey et au soccer (Chandran, Boltz, Morris, et al., 2022). Toutefois, pour les raisons citées précédemment, on observe une incidence qui tend à augmenter dans toutes les catégories de sports universitaires, notamment au volleyball, dont le taux de commotions cérébrales a constamment augmenté entre 2015 et 2019 (Chandran, Boltz, Morris, et al., 2022). La majorité des commotions cérébrales subies chez les athlètes masculins lors de la pratique sportive sont causées par un contact entre les athlètes. Chez les athlètes féminines, on répertorie un plus grand nombre de cas de commotions cérébrales causés par un contact avec de l'équipement ou du matériel sportif (Zuckerman et al., 2015). Lorsque le taux de commotions cérébrales dans les différents sports pratiqués par les hommes et les femmes est comparé entre les sexes biologiques, il est démontré que l'incidence des commotions cérébrales est supérieure chez les athlètes féminines (Pierpoint et Collins, 2021). En effet, les femmes pratiquant un sport universitaire démontrent une incidence de commotion cérébrale 1,4 fois plus élevée que les hommes (Covassin et al., 2016). Les étudiantes-athlètes de hockey, soccer, gymnastique et basketball sont celles étant les plus touchées par les commotions cérébrales (Chandran, Boltz, Morris, et al., 2022). Dans certains sports, comme le soccer et le basketball, les femmes présentent des taux de commotions

cérébrales de 1,5 à 2,81 fois plus élevés que ceux observés chez les hommes (Chandran, Boltz, Morris, et al., 2022; Marar et al., 2012). Une incidence plus importante chez les femmes pourrait être expliquée par des différences sur le plan physiologique et biomécanique ainsi que sur le plan socioculturel. Aussi, les femmes rapporteraient davantage leurs symptômes de commotion cérébrale que les hommes (Pierpoint et Collins, 2021). De leur côté, les athlètes universitaires masculins pratiquant le hockey, le football, la lutte et le soccer sont les plus touchés par cette blessure (Chandran *et al.*, 2022). Il est également important de souligner que l'incidence de cette blessure est sous-estimée puisque beaucoup d'entre elles ne sont pas diagnostiquées. En effet, la proportion de commotions cérébrales qui ne seraient pas diagnostiquées ou dont les symptômes seraient cachés par les athlètes blessées pourrait s'élever à 50 % (Kerr et al., 2016; Meehan et al., 2013).

2.3 Physiopathologie

Comme discuté précédemment, la commotion cérébrale est causée par une force biomécanique transmise au cerveau. Cette force issue, par exemple d'une chute ou d'un impact, entraîne une accélération suivie d'une décélération du cerveau à l'intérieur de la boîte crânienne causant une déformation de celui-ci. Les axones du cerveau peuvent ainsi s'étirer, se compresser, subir une force de cisaillement provoquant une cascade neurométabolique responsable de la présentation clinique de la commotion cérébrale (Milef et al., 2022; Romeu-Mejia et al., 2019).

Plus précisément, au niveau cellulaire, la force de cisaillement et l'étirement subit par le cerveau causent une perturbation temporaire dans la membrane plasmique entraînant un déséquilibre ionique au niveau des cellules, suivie d'une dépolarisation membranaire (Giza et Hovda, 2014; Romeu-Mejia et al., 2019). Un neurotransmetteur excitateur est alors libéré, créant une dépolarisation ainsi qu'une hyperexcitabilité en boucle. Cela provoque une accumulation intracellulaire de sodium et de calcium, ce qui endommage les cellules et affecte les mitochondries (Romeu-Mejia et al., 2019). Afin de rétablir rapidement ce déséquilibre ionique, les pompes Na^+/K^+ s'activent intensivement, ce qui entraîne l'épuisement des réserves d'énergie intracellulaire. Cette augmentation rapide de demande énergétique se produit à un moment où le débit sanguin cérébral serait altéré par la commotion cérébrale (Churchill et al., 2017; Kamins et al., 2017). Cela amène un déséquilibre entre la capacité du cerveau à produire de l'énergie et la demande énergétique nécessaire au rétablissement du trouble ionique (Giza et Hovda, 2014).

Au niveau neuronal, la décélération rapide de la tête suivant son accélération entraîne un cisaillement des neurones causant des lésions axonales diffuses (Romeu-Mejia et al., 2019). La déformation entraîne ainsi un dysfonctionnement des axones ou même une déconnexion de ceux-ci (Giza et Hovda, 2014). La commotion cérébrale cause également une neuroinflammation qui contribuerait à l'endommagement des cellules (Loane et Byrnes, 2010). Cette inflammation du cerveau et des neurones semble être corrélée avec les symptômes ainsi que la durée de ceux-ci et semble également affecter le

rétablissement. En effet, une étude démontre que parmi les personnes blessées, celles ayant un taux élevé de protéine C-réactive, un biomarqueur inflammatoire, sont plus susceptibles d'avoir des symptômes persistants, des déficits cognitifs et des troubles psychologiques (Su *et al.*, 2014).

La commotion cérébrale provoque habituellement une altération de courte durée des fonctions neurologiques qui disparaît spontanément. Chez certaines personnes, les signes et symptômes peuvent évoluer de quelques minutes à quelques heures (Patricios *et al.*, 2023b). Ces derniers peuvent grandement varier d'un individu à l'autre et en général, les personnes ayant subi une commotion cérébrale présentent des signes et symptômes d'ordre physique, moteur, cognitif, émotionnel ainsi que des troubles du sommeil (Patricios *et al.*, 2023b). Par exemple, les personnes blessées peuvent présenter des troubles de la mémoire, d'attention, un temps de réaction plus lent, des changements au niveau de leur comportement, de la fatigue et des problèmes d'équilibre (Silverberg *et al.*, 2023). Les symptômes les plus couramment rapportés sont les maux de tête, les étourdissements et la difficulté à se concentrer (Chandran, Boltz, Brett, et al., 2022; Wasserman et al., 2016). En moyenne, les déficits et les symptômes se résorbent environ 20 jours après la blessure, mais peuvent subsister au-delà de 30 jours chez certains individus (Putukian *et al.*, 2023). De plus, la commotion cérébrale peut également avoir un effet sur la santé mentale, notamment chez des personnes présentant des symptômes et des déficits persistants. La peur, l'anxiété et la dépression sont des états que peuvent

éprouver les personnes ayant subi une commotion cérébrale (Patricios *et al.*, 2023a, 2023b).

2.4 Diagnostic et évaluation

La commotion cérébrale est une blessure complexe à diagnostiquer et à évaluer en raison des signes et symptômes qui changent et évoluent rapidement. Une évaluation multimodale est donc nécessaire afin d'identifier la commotion cérébrale (Patricios *et al.*, 2023b). Cette blessure entraînant des signes, des symptômes ainsi que des dysfonctions de nature cognitive, motrice et psychologique variant d'une personne à l'autre, oblige les professionnels de la santé à administrer plusieurs tests afin de poser un diagnostic précis. Pour ce faire, ces derniers doivent respecter plusieurs critères, dont la présence de signes et symptômes comme des troubles cognitifs, d'équilibre, vestibulaire et oculomoteur (Silverberg *et al.*, 2023). Présentement, les cliniciens disposent de quelques outils et tests afin de poser un diagnostic de commotion cérébrale. Cependant, ces outils s'appuient majoritairement sur le rapport subjectif des patients et l'expérience clinique des professionnels de la santé. Ces derniers doivent donc fonder leur diagnostic sur le mécanisme de blessure, la présentation clinique et les symptômes autorapportés par la personne blessée (Silverberg *et al.*, 2023).

Pour établir un diagnostic de commotion cérébrale, les professionnels de la santé se fondent sur différents critères : 1) Blessure subie par un des mécanismes reliés à la commotion cérébrale (p. ex. contact de la tête avec une surface, un objet, une personne,

contact au corps ou chute menant à une accélération et une décélération du cerveau dans la boîte crânienne); 2) Un ou plusieurs signes cliniques de la commotion cérébrale (p. ex. désorientation, changements au niveau du comportement); 3) Au moins deux symptômes de commotion cérébrale (p. ex. mal de tête, nausée, sensation d'être ralenti.e) ; 4) Présence d'au moins un des éléments suivants lors de l'évaluation clinique en phase aiguë de la commotion cérébrale : déficits cognitifs, d'équilibre, oculomoteur ou la provocation de symptômes lors d'une tâche impliquant le système vestibulaire et oculomoteur; 5) Les critères précédents ne doivent pas être expliqués par des facteurs comme des conditions de santé déjà présentes, une douleur musculosquelettique aiguë ou la prise de médication, d'alcool ou de drogue.

Le diagnostic de commotion cérébrale peut être posé lorsqu'à la suite d'un plausible mécanisme de blessure relié à la commotion cérébrale 1), le critère 2), les critères 3) et 4) ou l'ensemble de ces critères sont rencontrés, tout en respectant le 5^e critère (Figure 1 : *Diagnostic de la commotion cérébrale*) (Silverberg et al., 2023).

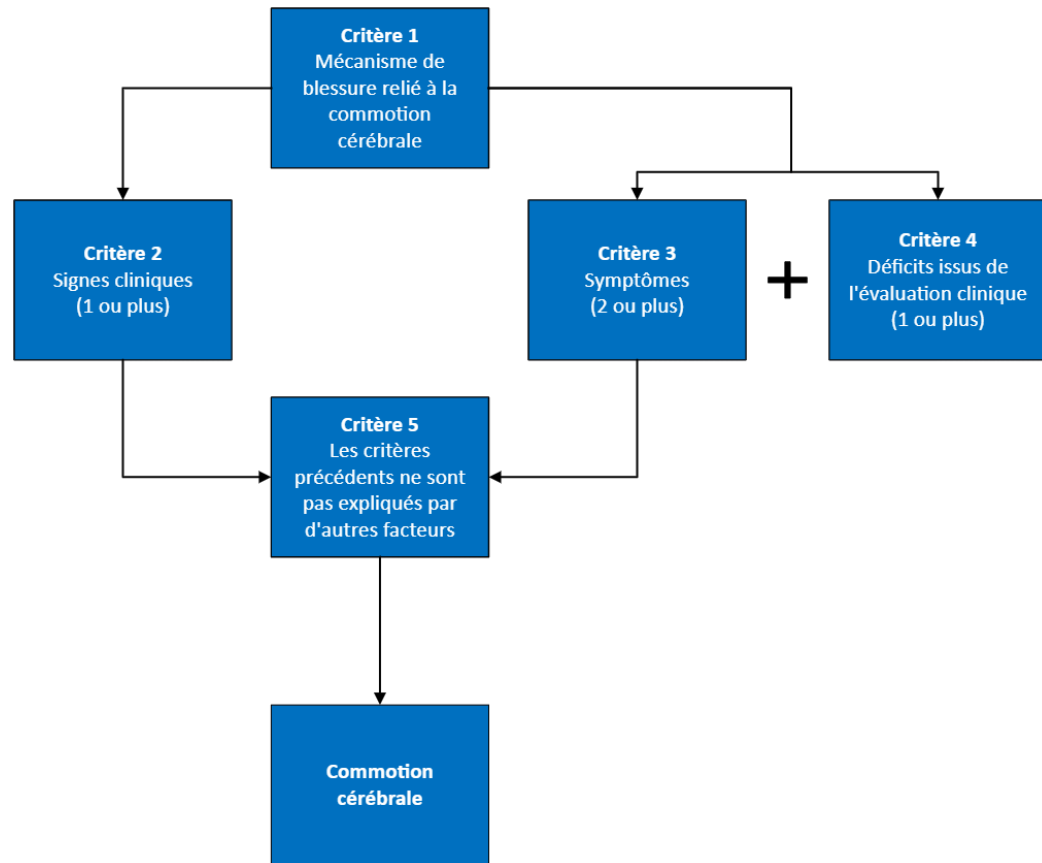


Figure 1 : *Diagnostic de la commotion cérébrale (adaptée de Silverberg et al., 2023)*

Un diagnostic juste et rapide ainsi qu'un suivi adéquat sont essentiels pour assurer une prise en charge optimale de la commotion cérébrale (Jackson et Starling, 2019), d'où l'importance d'avoir un outil d'évaluation efficace. D'ailleurs, il est démontré qu'une prise en charge tardive est associée à une plus longue période de récupération (Putukian et al., 2023). Une étude suggère que les blessés pris en charge 8 à 20 jours après la commotion cérébrale sont 5,8 fois plus susceptibles d'avoir une période de guérison atypique comparativement à ceux pris en charge dans les 7 jours suivant la commotion

cérébrale (Kontos *et al.*, 2020). Aussi, un retour au jeu hâtif (≤ 10 jours après la commotion cérébrale) augmenterait le risque de subir une autre commotion cérébrale, et ce, durant une période où le cerveau semble particulièrement vulnérable aux effets d'un second impact (McCrea *et al.*, 2020). Comme présenté précédemment, la quasi-totalité des outils cliniques de dépistage d'une commotion cérébrale se fient à la présentation subjective des patients, et peu de mesures objectives sont disponibles. Une évaluation multimodale est souvent priorisée afin de pallier cette problématique, en attente d'avancées scientifiques permettant une identification objective de la commotion cérébrale, par exemple à l'aide d'imagerie médicale de pointe, ou de marqueur sanguin (Patricios *et al.*, 2023b). Cette évaluation multimodale devrait inclure l'évaluation des signes et symptômes de la commotion cérébrale, des fonctions cognitives, de l'équilibre, de la pression artérielle et du rythme cardiaque, de la colonne cervicale, des fonctions oculomotrices et visuelles, de l'état physique, psychologique ainsi qu'une évaluation neuropsychologique (Patricios *et al.*, 2023a). De plus, près d'un athlète sur deux ne rapporterait pas ses symptômes post-blessure, entre autres en raison de l'apparition des signes et symptômes plus tardive ou par peur de perdre du temps de jeu (Kerr *et al.*, 2016; Meehan *et al.*, 2013). Alors, de multiples athlètes ne sont simplement pas pris en charge à la suite d'une commotion cérébrale et aucun test objectif ne permet d'identifier cette condition médicale en absence de symptômes adéquatement autorapportés par les athlètes. Des études sont réalisées afin d'établir des outils de mesures objectives efficaces pour l'identification des commotions cérébrales, mais aucun n'est présentement

recommandé pour l'utilisation clinique (Patricios et al., 2023b). Des experts mondiaux émettant le consensus sur la prise en charge des commotions cérébrales dans le sport recommandent d'explorer le développement de nouveaux outils de suivi en clinique pour pallier les problématiques actuelles (Patricios et al., 2023b).

Si le diagnostic s'avère être un défi de taille pour les cliniciens, la gestion d'une commotion cérébrale représente un défi additionnel pour les professionnels de la santé où le processus de retour aux activités cognitives et au sport peut être complexe. La reprise des activités d'apprentissage est un élément crucial pour les athlètes universitaires et requiert une bonne communication entre les professionnels de la santé et les intervenants du milieu de l'éducation. Certaines personnes auront besoin de quelques ajustements, notamment au niveau de leur horaire, de leur charge de travail, du temps consacré aux études, pour faciliter le retour à l'apprentissage (Patricios *et al.*, 2023b). Le protocole de retour à l'apprentissage comprend quatre étapes, dont la première peut débuter 24 à 48 heures après la commotion cérébrale. La progression à travers les différentes étapes se fait lorsque les activités cognitives sont réalisées avec au maximum une brève exacerbation des symptômes (moins d'une heure) et d'intensité légère. Une légère exacerbation des symptômes est représentée par une augmentation maximum de 2 points sur une échelle de symptômes de 0 à 10 (0 = aucun symptôme, 10 = pire symptôme imaginable) lorsque comparée aux mesures de base. Ces quatre étapes sont : 1) Activités quotidiennes en minimisant le temps d'écran; 2) Activités scolaires (devoirs, lectures, travaux en dehors d'une salle de cours); 3) Retour en classe partiel (demi-journée ou possibilité de prendre

plusieurs pauses); 4) Retour en classe complet (graduellement jusqu'à ce que la personne puisse tolérer une journée complète en classe en se limitant à une faible exacerbation des symptômes (Patricios *et al.*, 2023b).

Pour sa part, le processus à suivre pour le retour complet à la compétition sportive à la suite d'une commotion cérébrale comporte six étapes réalisées en parallèle avec celles du retour à l'apprentissage, et peut débuter dans les 24 heures suivant la blessure : 1) Activités quotidiennes sans exacerber les symptômes; 2) Activités aérobiques (A-Légères : jusqu'à environ 55 % de la fréquence cardiaque maximale, B-Modérées : jusqu'à environ 70 % de la fréquence cardiaque maximale); 3) Entraînement individuel spécifique au sport sans risque de coup à la tête; 4) Entraînement spécifique au sport sans contact; 5) Entraînement avec contacts; 6) Retour à la compétition (Patricios *et al.*, 2023b). Chacune des étapes doit être d'une durée minimale de 24 heures. De plus, si une augmentation de l'intensité des symptômes supérieure à 2 points sur l'échelle de symptômes survient lors des étapes 1 à 3, la personne blessée devrait cesser l'activité physique en cours et recommencer cette même étape le lendemain. Pour leur part, les étapes 4 à 6 doivent commencer après la disparition des symptômes, des déficits cognitifs et des autres perturbations évaluées en clinique (Patricios *et al.*, 2023b). En outre, bien que les retours aux activités cognitives et sportives puissent s'effectuer conjointement, le retour complet aux activités d'apprentissage devrait s'effectuer avant le retour à la compétition (Putukian *et al.*, 2023).

Afin d'optimiser le rétablissement des personnes blessées, il est conseillé d'effectuer une prise en charge individualisée et multidisciplinaire où les décisions doivent être prises en fonction de l'individu, des caractéristiques de la blessure, du sport pratiqué et de facteurs éthiques et psychosociaux (Patricios et al., 2023b). Certaines personnes auront moins de difficultés à recommencer leurs activités intellectuelles, voire aucune, et n'auront pas besoin de support académique ou de suivre le protocole de retour à l'apprentissage. Cependant, la tolérance et la résolution des symptômes diffèrent d'une personne à l'autre, donc la progression dans les protocoles de retour aux activités d'apprentissage et au sport doit être adaptée à chaque blessé (Patricios *et al.*, 2023b). D'ailleurs, une quantité et une sévérité plus importantes des symptômes en phase aigüe pourraient prédire une plus longue période de récupération et du fait même, retarder le retour aux activités d'apprentissage et au sport (Putukian *et al.*, 2023). Or, les déficits cliniques associés à la commotion cérébrale peuvent se faire ressentir au-delà de la manifestation des symptômes, ce qui rend la gestion d'un retour au jeu difficile (Giza et al., 2013). Certains devis expérimentaux ont su démontrer que des athlètes retournaient au jeu en ayant réussi les critères cliniques, mais qui, lors des tâches expérimentales, démontraient des déficits cognitifs et/ou moteurs (Fait et al., 2009; Reed et al., 2013). Finalement, il est suggéré que les athlètes rapporteraient un faible niveau de confiance lors du retour au jeu post-commotion cérébrale (Crofts *et al.*, 2024), ce qui pourrait signifier qu'ils se sentent moins prêts ou à l'aise de reprendre l'activité physique. Cet élément est d'autant plus pertinent en contexte de sport d'équipe et de reprise de

compétition. Cet élément peut être propre tant à la commotion cérébrale qu'au déconditionnement reconnu post-blessure chez les athlètes. Beaucoup d'athlètes rapportent se sentir moins efficaces ou plus lents lors du retour au jeu à la suite d'un arrêt prolongé (Ford et al., 2017). Un athlète qui retourne au jeu sans se sentir prêt à performer démontre un risque plus élevé de se blesser à nouveau (tête ou autre) (Ford et al., 2017; Paterno et al., 2018). Les facteurs psychologiques reliés au retour au jeu seraient donc également à prendre en considération par les professionnels de la santé lors de la prise de décision (van Ierssel et al., 2022).

2.5 Pronostic et complications

Habituellement, la période de guérison d'une commotion cérébrale chez les adultes est de 10 à 14 jours et peut parfois durer jusqu'à 20 jours avant la reprise complète du sport (Putukian *et al.*, 2023). Cependant, jusqu'à 30 % des individus rapporteraient des symptômes qui persistent au-delà de 30 jours post-blessure (Schneider et al., 2023). Or, les résultats d'une étude démontrent que 35,7 % des participants seraient retournés aux études ou au jeu prématurément (Carson et al., 2022). De plus, il est rapporté que certaines recommandations seraient ambiguës quant à la gestion du retour aux activités et qu'il pourrait y avoir un manque au niveau des connaissances sur la commotion cérébrale chez les intervenants tant dans le domaine de la santé, qu'en éducation et dans les milieux sportifs. Par exemple, des entraîneurs ou des enseignants pourraient avoir des attentes trop élevées par rapport à la progression réelle de la personne blessée. Aussi, cette dernière

pourrait progresser trop rapidement dans les étapes du processus de retour aux activités d'apprentissage et de retour au jeu dû au manque de connaissances des intervenants de son milieu (Carson et al., 2014). Un retour au jeu hâtif peut être très dommageable pour la santé physique à court et à long terme. Lorsqu'une personne subit une deuxième commotion cérébrale avant la rémission de la première, les complications sont généralement plus importantes que lors du précédent événement. Les complications peuvent se présenter sous forme d'une augmentation rapide des symptômes et peuvent même mener à un œdème cérébral pouvant causer la mort (McLendon et al., 2016). Ce phénomène, rare, mais fatal, touche particulièrement les adolescents et les jeunes adultes (McLendon et al., 2016). Les athlètes universitaires sont donc une population à risque et la pression liée aux études et à la compétition sportive peut influencer le choix d'un retour prématuré fait par l'étudiant-athlète. Il est également démontré que les commotions cérébrales répétées peuvent avoir des effets dommageables et irréversibles sur le cerveau. Des études ont observé une plus grande incidence de troubles de la mémoire et de dépression chez des joueurs de football ayant un historique de plusieurs commotions cérébrales (Guskiewicz et al., 2005; Guskiewicz et al., 2007). Ces éléments réitèrent l'importance de rendre disponibles des outils d'évaluation objective de la commotion cérébrale.

2.6 Le Neurotracker comme piste de solution

2.6.1 Le Neurotracker

Le Neurotracker est un outil permettant la réalisation d'une tâche de suivi d'objets multiples (multiple object tracking ou MOT) dans un environnement virtuel en trois dimensions (3D). Le MOT est pour sa part une tâche se réalisant à partir d'un système informatisé qui diffuse une interface dans laquelle on retrouve des objets d'apparence identique (p.ex. : sphères, X). Au moment de débiter la tâche, certains de ces objets sont identifiés comme cibles pendant quelques secondes. D'abord immobiles lors de l'identification des cibles, tous les objets se mettent en mouvement dans différentes directions lorsque les cibles retrouvent leur apparence initiale, à une vitesse et durant un temps prédéfinis. L'objectif de cette tâche est de suivre des yeux les cibles identifiées, à travers les autres objets servant de distracteurs, afin de les identifier lorsque l'ensemble des objets s'immobilise (Pylyshyn et Storm, 1988). Le Neurotracker est donc un outil développé afin de réaliser la tâche de MOT dans une interface en 3D. L'aspect tridimensionnel ajouté au MOT permettrait une mesure plus juste du suivi d'objets multiples puisque la tâche est réalisée dans un environnement qui se rapprocherait davantage de la réalité (Tinjust *et al.*, 2008). Il est suggéré que le traitement de l'information se fait plus rapidement et plus efficacement dans un environnement en 3D (Zhang *et al.*, 2025). De plus, la dimension de profondeur permettrait une meilleure distinction des objets, contrairement à l'interface en deux dimensions où il pourrait être plus difficile de différencier des objets qui se confondraient l'un dans l'autre (Liu *et al.*,

2024). Au terme d'une session au Neurotracker, un seuil de vitesse représentant la vitesse de mouvement des objets est obtenu. D'ailleurs, sa conception initiale avait pour but d'entraîner les capacités perceptivo-cognitives (Faubert et Sidebottom, 2012), c'est-à-dire les capacités à identifier et acquérir les informations les plus pertinentes de notre environnement qui permettront de choisir et d'exécuter la réponse la plus appropriée à la situation présente (Marteniuk, 1976). L'utilisation première du Neurotracker pour l'amélioration des capacités perceptivo-cognitives ciblait principalement les athlètes, en raison du contexte sportif se déroulant dans un environnement dynamique où ces derniers doivent constamment traiter l'information qui les entoure, mais également l'ensemble de la population. Les gens se retrouvent quotidiennement dans des situations dont les contraintes peuvent s'apparenter à celles du sport comme lors de la conduite automobile, et peuvent représenter des défis pour certains individus, dont les personnes âgées ou atteintes d'une problématique neurobiologique (Faubert et Sidebottom, 2012).

2.6.2 L'entraînement au Neurotracker

Aujourd'hui, le Neurotracker est l'un des outils d'entraînement perceptivo-cognitif les plus utilisés et étudiés (Vater *et al.*, 2021). Il est d'ailleurs suggéré que l'entraînement au Neurotracker améliorerait la mémoire de travail, l'attention soutenue, la vitesse de traitement de l'information et l'inhibition (Vater *et al.*, 2021). À cet égard, un programme d'entraînement de suivi tridimensionnel de multiples objets (three-dimensional multiple object tracking ou 3D-MOT) serait bénéfique pour l'attention des enfants et des

adolescents présentant des troubles du développement neurologique (Tullo *et al.*, 2018). Les résultats de cette étude ont montré qu'un entraînement de 15 séances sur une durée de cinq semaines a permis aux participants d'améliorer significativement leur performance au test *Continuous Performance Task – 3rd Edition*, une évaluation standardisée de l'attention (Tullo *et al.*, 2018). De plus, sous prétexte que les athlètes doivent avoir d'excellentes capacités perceptivo-cognitives, le Neurotracker est proposé comme un outil d'entraînement intéressant (Faubert et Sidebottom, 2012). Lors d'une compétition sportive, les fonctions cognitives des athlètes sont largement sollicitées. Ces derniers doivent suivre différentes cibles en mouvement, comme des joueurs ou des objets, percevoir et intégrer le plus d'informations qui leur permettront de performer au plus haut niveau. La vitesse de jeu peut être très élevée et peut considérablement changer à tout moment, tout comme la trajectoire des objets et des adversaires. Dans cet ordre d'idées, l'entraînement au Neurotracker pourrait permettre aux athlètes d'améliorer leur performance sportive en entraînant les fonctions cognitives sollicitées par cet outil (Vater *et al.*, 2021). Cependant, les preuves scientifiques demeurent faibles à ce jour (Vater *et al.*, 2021). Très peu d'études ont démontré une amélioration significative des habiletés sportives en situation de match à la suite d'un programme d'entraînement au Neurotracker (Vater *et al.*, 2021). De ces études, deux d'entre elles ont observé un gain au niveau de certaines fonctions cognitives à la suite d'un programme d'entraînement au Neurotracker. Chez des athlètes élités de volleyball, deux séances d'entraînement par semaine durant huit semaines pourraient permettre d'améliorer la vitesse de traitement de l'information

ainsi que l'attention soutenue chez des athlètes élités de volleyball (Fleddermann *et al.*, 2019). Romeas *et al.* (2016) ont pour leur part observé une amélioration au niveau de la prise de décision sur le terrain au moment d'effectuer une passe chez des joueurs de soccer à la suite d'un programme de cinq semaines comprenant deux entraînements au Neurotracker par semaine. Toutefois, ces résultats furent réfutés dans une autre étude, démontrant que le transfert des gains obtenus par l'entraînement au Neurotracker vers les performances sur le terrain demeure mitigé (Romeas *et al.*, 2024). De plus, il est suggéré que l'exposition répétée au Neurotracker mène à un apprentissage de la tâche 3D-MOT. En effet, une courbe d'apprentissage fut observée chez différentes populations, dont les gains d'apprentissage optimaux sont obtenus lors des cinq premières expositions (Corbin-Berrigan *et al.*, 2018 ; Faubert et Sidebottom, 2012 ; Legault *et al.*, 2013). Il est également suggéré que cette courbe d'apprentissage demeure stable chez les personnes en santé lorsqu'observée en fonction de leur âge et de leur niveau d'activité physique (Faubert, 2013 ; Legault *et al.*, 2013). De plus, l'entraînement perceptivo-cognitif semble intéressant dans un contexte de commotion cérébrale, notamment chez les sportifs, puisqu'il sollicite des fonctions cognitives nécessaires à la pratique du sport et qui peuvent être altérées à la suite de cette blessure (Faubert et Sidebottom, 2012).

2.6.3 Le Neurotracker comme outil de mesure

L'utilisation du Neurotracker ne se limite pas à l'entraînement des capacités perceptivo-cognitives. Ce dernier est aussi utilisé comme outil de mesure dans différents contextes. Par exemple, le Neurotracker fut utilisé dans le cadre d'études afin d'observer la relation entre le mode de vie (alimentation, sommeil et activité physique) et les performances cognitives (Goulart *et al.*, 2023) ainsi que l'effet d'un supplément en poudre contenant de la caféine sur la vitesse de suivi visuel (Renziehausen *et al.*, 2022). Cet outil peut également être employé afin d'évaluer les capacités perceptivo-cognitives chez différentes populations. D'une part, le Neurotracker est utilisé auprès d'athlètes, notamment afin d'étudier les habiletés sportives associées aux capacités perceptivo-cognitives. Par exemple, le Neurotracker fut utilisé afin d'identifier une possible relation entre les capacités perceptivo-cognitives et la vitesse de lancer d'un joueur de baseball (Tremblay *et al.*, 2022). Aussi, une étude réalisée auprès de conducteurs d'automobile a employé le Neurotracker dans le but d'observer des corrélations entre les capacités perceptivo-cognitives et différentes mesures de la conduite (Michaels *et al.*, 2017). D'autre part, le Neurotracker, récemment identifié comme un outil potentiel pour l'évaluation des commotions cérébrales, est utilisé en recherche comme outil de mesures cliniques auprès de personnes ayant subi cette blessure (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020 ; Lysenko-Martin *et al.*, 2020).

2.6.4 Le Neurotracker comme outil de mesure objective de la commotion cérébrale

Puisque les données sur la performance typique au Neurotracker sont bien établies, il est suggéré qu'un changement à ces performances pourrait indiquer la présence d'un déficit cognitif, comme dans le cas de la commotion cérébrale (Chermann *et al.*, 2018 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2018, 2020 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). Le Neurotracker est un outil objectif potentiellement sensible après la commotion cérébrale et permettrait d'être utilisé dans un contexte sécuritaire hors terrain. Par conséquent, le Neurotracker pourrait être une solution afin de pallier le manque d'outils objectifs pour l'identification et le suivi de la commotion cérébrale. Cet outil facile à administrer par un professionnel de la santé a démontré des résultats intéressants dans une étude observant le comportement du Neurotracker chez des enfants ayant subi une commotion cérébrale (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). À la suite de la blessure, on remarque chez les participants de cette étude une diminution des gains d'apprentissage et un retour à la normalité au niveau de la courbe d'apprentissage après quelques expositions au Neurotracker. Il est d'ailleurs suggéré que les plus importants gains d'apprentissage s'effectueraient entre la troisième et la quatrième exposition au 3D-MOT. Il est à noter que cette période coïncidait également avec la plus importante diminution des symptômes, ce qui suggère que la performance au Neurotracker soit liée à la résolution des symptômes, donc à la guérison de la commotion cérébrale (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). De plus, ces gains d'apprentissage semblent être plus lents chez les personnes ayant subi une commotion cérébrale comparativement aux individus sains (Corbin-Berrigan *et al.*, 2018). Dans cette étude, le groupe contrôle a

démontré une amélioration de ses performances de 79 % sur une période de six évaluations au Neurotracker, contrairement à 66 % chez les participants blessés. L'écart est encore plus important dans les premières sessions de l'évaluation. En effet, les participants du groupe contrôle ont démontré une amélioration de 33 %, alors que celle des participants blessés est de 0,06 % (Corbin-Berrigan *et al.*, 2018). De surcroît, le rétablissement complet des fonctions cognitives semble s'effectuer après la disparition des symptômes (McCrea *et al.*, 2013 ; McInnes *et al.*, 2017) et les capacités cérébrales perceptivo-cognitives semblent être les dernières à se rétablir (Mathias *et al.*, 2004). En ce sens, l'intégration d'un outil évaluant les capacités perceptivo-cognitives permettrait d'obtenir une évaluation multimodale de la commotion cérébrale plus complète et plus juste. Avec un comparatif présaison et post-blessure, les performances des athlètes au Neurotracker permettraient potentiellement d'identifier des déficits perceptivo-cognitifs à la suite de la commotion cérébrale jusqu'au retour au jeu. D'ailleurs, les résultats de Chermann *et al.* (2018) ont démontré une corrélation négative entre le nombre de symptômes et la performance au Neurotracker 48 heures après une commotion cérébrale. Un plus grand nombre de symptômes serait associé avec un seuil de vitesse moyen plus lent au Neurotracker. De plus, une augmentation significative des performances au Neurotracker lors du retour au jeu des athlètes comparativement à leur performance 48 heures post-blessure fût également observée (Chermann *et al.*, 2018). Ces résultats suggèrent donc que le Neurotracker pourrait être utile dans le suivi de la blessure jusqu'au retour au jeu des athlètes. Aussi, des études suggèrent que les déficits perceptivo-cognitifs

augmenteraient le risque de blessure lors du retour à la compétition (Catena *et al.*, 2009). Il est donc essentiel que les professionnels de la santé puissent être en mesure de les évaluer et de suivre leurs progressions durant le processus de retour à la compétition sportive afin de s'assurer que celui-ci est sécuritaire et que les athlètes sont complètement rétablis de leur commotion cérébrale.

Ainsi, dans un contexte de recherche d'outils objectifs permettant l'évaluation et la prise en charge de la commotion cérébrale, le Neurotracker se voit comme un outil ayant un fort potentiel. De plus, les seuils de performance évaluant les capacités perceptivo-cognitives demeurent stables dans le temps chez les athlètes et peuvent être réutilisés deux années consécutives (Deschamps *et al.*, 2022). D'une part, la stabilité des seuils de performance au Neurotracker obtenus au fil du temps pourrait outiller les professionnels de la santé en offrant des valeurs de type *baseline* en contexte présaison. Ces valeurs pourraient potentiellement assister la détection de la commotion cérébrale, si elles se voyaient altérées à la suite de cette blessure. D'autre part, l'entraînement répété au Neurotracker aurait le potentiel d'offrir une prise en charge facilitant le retour au jeu des athlètes en travaillant les habiletés visuelles nécessaires à la pratique de sport de haut niveau. Avec une telle polyvalence, le Neurotracker se verrait être un outil de choix pour les professionnels de la santé œuvrant auprès d'athlètes à risque de commotion cérébrale.

CHAPITRE 3

Problématique

Depuis quelques années, le taux de commotion cérébrale lors de la pratique sportive est en constante augmentation (Gouvernement du Canada, 2023). Les jeunes adultes sont particulièrement touchés par la commotion cérébrale avec une représentation notable de 41 % des cas de commotions cérébrales au Québec (Gouvernement du Québec, 2022). Le risque de subir une commotion cérébrale est omniprésent lors de la pratique d'activités sportives. Cependant, ce risque est particulièrement plus grand pour les personnes pratiquant un sport de contact comparativement aux autres types de sports. Aussi, le taux de commotions cérébrales est généralement plus élevé lors des compétitions qu'aux entraînements (Chandran, Boltz, Morris, et al., 2022). De plus, la proportion de commotions cérébrales non diagnostiquées pourrait atteindre 50 % (Kerr et al., 2016; Meehan et al., 2013). Cette situation est particulièrement récurrente chez les athlètes universitaires et s'expliquerait notamment par des perceptions sociales et une attitude négatives envers la commotion cérébrale ainsi que par le désir de poursuivre les activités sportives (Callahan et al., 2021; Conway et al., 2018). Une mauvaise prise en charge de la commotion cérébrale, soit en absence de mesure objective ou lorsque les blessés ne rapportent pas immédiatement leurs symptômes, place les individus à risque de conséquences graves quant à leur santé. Ces derniers ont généralement une période de récupération significativement plus longue et présentent des symptômes plus sévères que les individus ayant une prise en charge initiale adéquate (Barnhart et al., 2021).

Les professionnels de la santé sont ainsi confrontés à un défi de taille lorsqu'il s'agit d'identifier la commotion cérébrale et de prendre en charge les personnes l'ayant

subie. Une prise en charge adéquate par les professionnels de la santé diminue le risque de complications et de conséquences pouvant même être fatales, en plus d'assurer un retour sécuritaire à l'activité sportive. Le diagnostic de la commotion cérébrale repose, en grande partie, sur la présentation subjective des personnes atteintes (Conway et al., 2018). Les symptômes de commotion cérébrale ne sont pas facilement observables, sont autorapportés par les blessés, peuvent grandement varier d'un individu à l'autre et le temps de récupération est différent pour chaque personne (Makdissi et al., 2015). Présentement, il n'existe aucun outil de mesure considéré comme étant une référence ou un *gold standard* pour l'identification des commotions cérébrales (Patricios *et al.*, 2023b). L'évaluation subjective des symptômes à elle seule n'est pas efficace et optimale pour le diagnostic et le traitement de la blessure (Kara et al., 2020) surtout en sachant que les déficits peuvent persister au-delà de la présentation des symptômes (Giza et al., 2013). Les déficits cognitifs et moteurs pouvant se faire ressentir après la résolution des symptômes ajoutent de l'ampleur au défi de la prise en charge et rendent le processus de retour au jeu plus complexe. Par exemple, certaines études démontrent que des athlètes auraient atteint les critères cliniques pour un retour au jeu, mais continueraient de démontrer des déficits cognitifs ou moteurs lors d'évaluations expérimentales (Fait et al., 2009; Reed et al., 2013). Lorsqu'une personne retourne au jeu trop rapidement après sa commotion cérébrale, elle s'expose à un risque de complications pour la santé. L'incidence des retours aux activités sportives hâtifs est d'ailleurs relativement élevée. À cet effet, la proportion de sportifs de tous niveaux scolaires qui effectuent un retour

prématuré pourrait atteindre environ 35 % (Carson et al., 2022). Le fait que les professionnels de la santé ne sont pas assez bien outillés pour une gestion adéquate de la commotion cérébrale pourrait en être la cause (Carson et al., 2022).

Un retour au jeu sécuritaire ne se limite pas seulement à une reprise des activités sportives après la résolution des symptômes, mais également lorsque les fonctions cognitives et motrices reviennent à la normale. Dans un contexte de sport de haut niveau, il est tout aussi important de s'assurer que les athlètes sont en mesure de performer à un niveau optimal. Les athlètes élités doivent être physiquement et psychologiquement prêts à compétitionner (Caron et al., 2018). Il est donc essentiel d'avoir des mesures de performances cohérentes avec les capacités nécessaires pour performer dans un sport au niveau élit. Il est également recommandé d'inclure des phases d'optimisation de la performance ainsi que des programmes d'entraînement spécifique à leur sport au protocole de retour au jeu des athlètes afin de les préparer davantage aux exigences du sport de haut niveau (Bizzini, 2022). Cela permet non seulement de prévenir des blessures post-commotion cérébrale, mais également d'augmenter la confiance de l'athlète face à son retour au jeu (Bizzini, 2022). Le sentiment d'être prêt à performer (*psychological readiness*) est primordial pour un athlète qui effectue un retour au jeu. Un manque de confiance envers ses capacités sportives peut causer de l'anxiété de performance, de l'hésitation lors des prises de décision, un traitement de l'information plus lent et peut mener à un plus grand risque de subir une deuxième commotion cérébrale (Caron et al., 2018).

Le Neurotracker pourrait constituer une solution à la problématique abordée dans ce mémoire. Contrairement à d'autres tests présentement utilisés en clinique, le Neurotracker permettrait d'obtenir une mesure objective de certaines fonctions cognitives plutôt que subjective. Cet outil développé pour l'entraînement des capacités perceptivo-cognitives semble être intéressant dans un contexte d'évaluation des commotions cérébrales, notamment en raison de son accessibilité et de sa facilité d'utilisation. L'entreprise ayant conçu le Neurotracker affirme que cette tâche de 3D-MOT pourrait être efficace pour la gestion des commotions cérébrales (Faubert et Sidebottom, 2012). Cependant, cette affirmation n'a pas encore été appuyée par des données scientifiques et sa fiabilité demeure incertaine dans un contexte d'évaluation des commotions cérébrales. Quelques études ont été réalisées afin d'en apprendre davantage à ce sujet et le Neurotracker semble être sensible à la commotion cérébrale chez les enfants (Corbin-Berrigan *et al.*, 2018, 2020 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). Si cet outil s'avère aussi sensible à la commotion cérébrale chez l'adulte, il pourrait offrir une mesure objective. Il a aussi été observé que cet outil possède une fidélité acceptable de test-retest et que les résultats demeurent stables dans le temps lorsqu'utilisés afin d'obtenir des mesures de base de la performance (Deschamps et al., 2022). Ceci suggère que le Neurotracker pourrait être inclus aux évaluations présaisons usuelles des athlètes. De plus, le Neurotracker a initialement été conçu afin d'améliorer les capacités sportives des athlètes au niveau de l'analyse visuelle en situation de jeu. Il est alors possible de supposer que ce dernier pourrait également assister les professionnels de la santé dans la réadaptation et

ainsi permettre aux athlètes de se sentir plus confiants face à leur lecture du jeu lors d'un retour post-blessure. En ce sens, ce projet de recherche apporte une meilleure compréhension de son utilisation en tant qu'outil d'évaluation objective de la commotion cérébrale et de sa possible utilité lors du suivi de la blessure.

CHAPITRE 4

Objectifs de recherche et hypothèses

Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche était d'évaluer l'effet de la commotion cérébrale sur la performance à une batterie de tests spécifiques aux commotions cérébrales, incluant le Neurotracker, 48 à 72 heures post-blessure et par un suivi de cinq séances. Pour sa part, l'objectif secondaire du projet de recherche était d'explorer le rôle des symptômes sur la performance des athlètes universitaires à la batterie de tests spécifique à la commotion cérébrale.

Hypothèses

Il était anticipé que la commotion cérébrale diminue la performance des athlètes universitaires à la batterie de tests spécifiques 48 à 72 heures post-blessure lorsque comparées à la performance présaison et qu'elle retrouve sa valeur présaison après le suivi de cinq séances. Il était également attendu que les symptômes de commotion cérébrale influencent à la baisse la performance à la batterie de tests spécifiques aux commotions cérébrales 48 à 72 heures post-commotion cérébrale et que cette dernière retrouve sa valeur présaison à la suite de 5 séances.

CHAPITRE 5

BATTERIE DE TESTS SPÉCIFIQUES À LA COMMOTION CÉRÉBRALE

Ce mémoire présente cinq outils et tests couramment utilisés dans la gestion de la commotion cérébrale. La batterie de tests utilisée pour l'évaluation multimodale de la commotion cérébrale chez les participants comprend le Neurotracker, l'Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT), un questionnaire d'efficacité personnelle, le Ruler Drop Test et le Balance Error Scoring System (BESS).

5.1 Neurotracker

Le Neurotracker, conçu pour l'entraînement perceptivo-cognitif afin d'améliorer les performances sportives, est une tâche de 3D-MOT dans laquelle le participant se retrouve dans un environnement immersif. Il permettrait d'évaluer et d'entraîner la capacité d'un individu à suivre différentes cibles en mouvement à travers des objets identiques servant de distractions dans un environnement de réalité virtuelle en trois dimensions (Faubert et Sidebottom, 2012 ; Parsons *et al.*, 2016 ; Romeas *et al.*, 2016). L'interface peut être projetée dans un ordinateur, une télévision, une tablette ou à l'aide d'un projecteur. Le participant doit porter des lunettes actives ou passives pour images en 3D. Il est également possible d'utiliser le Neurotracker dans une interface en deux dimensions. Le Neurotracker comprend plusieurs types de programmes, dont le CORE qui est le plus utilisé dans la littérature (Vater *et al.*, 2021). Dans le cadre de ce projet de recherche, le programme CORE à quatre balles fut utilisé et l'interface fut projetée à l'aide d'un projecteur. Les participants devaient porter des lunettes actives pour images en 3D. Ce programme comporte trois séries de 20 essais durant lesquels le participant doit suivre

et identifier quatre cibles à travers des distracteurs. Un essai au Neurotracker est composé des cinq étapes suivantes (Figure 2 : *Exemple Neurotracker*) : A) huit balles jaunes sont aléatoirement réparties dans l'interface du Neurotracker et un point, que l'on suggère de fixer durant l'essai, se retrouve au centre de celle-ci; B) les cibles à suivre durant l'essai (quatre balles) deviennent orange et sont mises en surbrillances durant deux secondes; C) les cibles retrouvent leur apparence initiale (couleur jaune) et les huit balles se déplacent de façon aléatoire dans l'interface en 3D durant 8 secondes; D) lorsque les balles s'immobilisent à nouveau, des chiffres (1 à 8) apparaissent sur chacune des balles et le participant doit identifier les quatre cibles en inscrivant le chiffre de celles-ci sur un clavier; E) le participant obtient le résultat de son essai après avoir tenté d'identifier les quatre cibles et l'essai suivant débute immédiatement en affichant à nouveau les quatre cibles à suivre. Afin de réussir un essai, le participant doit avoir correctement identifié les quatre cibles à suivre durant l'essai. Lorsque l'essai est réussi, la vitesse de déplacement des balles (m/s) augmente pour l'essai suivant et lorsqu'il n'est pas réussi (moins de quatre balles correctement identifiées), la vitesse de déplacement diminue. Cette dernière progresse selon la théorie de l'escalier de Levitt (Levitt, 1971). Au terme d'une série, un seuil de vitesse est déterminé et à la fin des trois séries, un seuil de vitesse moyen est obtenu. Cette méthode permettrait d'évaluer les capacités perceptivo-cognitives du participant tout en stimulant l'apprentissage (Faubert et Sidebottom, 2012 ; Parsons *et al.*,

2016). Une pause de deux à trois minutes fut prise à la suite de chaque série et le résultat de chacune des trois séries ainsi que le seuil de vitesse moyen furent conservés.

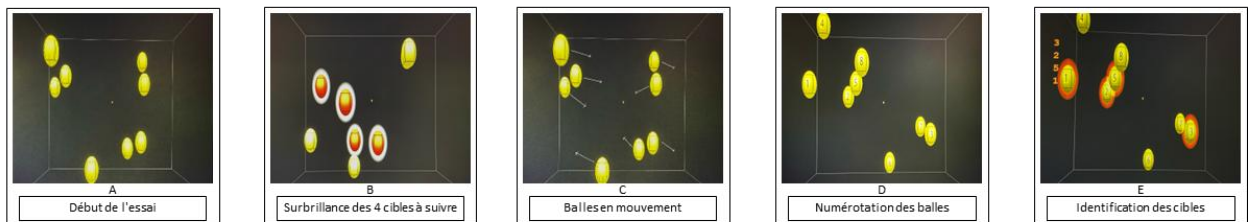


Figure 2 : Exemple Neurotracker

5.2 Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test

L'ImPACT est un outil d'évaluation neurocognitive conçu pour évaluer les personnes ayant subi une commotion cérébrale dont l'utilisation est très répandue chez les professionnels de la santé (Schatz *et al.*, 2006). Cet outil peut être utilisé dans la gestion des commotions cérébrales en offrant un comparatif pré-blessure (lors des évaluations présaisons) ou normatif lorsqu'il est effectué post-blessure. Des études démontrent que ce test a une sensibilité de 81,9 – 91,4 % et une spécificité de 69,1 – 89,4 % pour l'évaluation de la commotion cérébrale chez des athlètes (Dessy *et al.*, 2017). Il est également démontré que les résultats demeurent stables lorsque les athlètes y sont exposés à plusieurs reprises (Schatz *et al.*, 2006) et que ces résultats peuvent être réutilisés sur une période de deux ans si les conditions d'évaluation restent les mêmes (Deschamps *et al.*, 2022). L'ImPACT, qui s'effectue à partir d'un ordinateur, est composé d'un questionnaire sur les symptômes reliés à la commotion cérébrale (Post-Concussion Symptom Scale (PCSS)) et six modules

qui, au terme ceux-ci, établissent un résultat pour la mémoire verbale, la mémoire visuelle, la vitesse de traitement, le temps de réaction, la mémoire de travail et l'efficacité cognitive.

5.3 Questionnaire d'efficacité personnelle

L'efficacité personnelle est définie comme étant le sentiment d'avoir les capacités nécessaires pour mettre en œuvre un plan d'action et l'exécuter afin de bien performer lors d'une tâche (Bandura, 1986). Dans un contexte sportif, les blessures peuvent affecter négativement l'efficacité personnelle (Bandura, 1986). À la suite d'une commotion cérébrale, de nombreux athlètes mentionnent se sentir moins efficaces ou plus lents lors de leur retour à la compétition sportive (Ford *et al.*, 2017 ; Paterno *et al.*, 2018) et il est démontré que la commotion cérébrale affecte négativement l'efficacité personnelle (Gagnon *et al.*, 2005). De plus, il est recommandé de considérer les facteurs psychologiques lors du processus de retour au sport à la suite d'une commotion cérébrale (van Ierssel *et al.*, 2022). Le questionnaire d'efficacité personnelle validé pour la gestion des commotions cérébrales et traduit en français (Gagnon *et al.*, 2005) permet d'avoir une représentation de l'efficacité personnelle des athlètes présaison, post-commotion cérébrale et lors du retour au jeu. Afin d'avoir un questionnaire spécifique au projet de recherche, le questionnaire initialement conçu pour une population pédiatrique par Gagnon (2005) fut adapté à une population d'athlètes universitaires tout en conservant la conception originale. Ce questionnaire est composé de huit questions en lien avec les

problèmes spécifiques de la commotion cérébrale et de dix autres questions portant sur la compétence sportive (Annexe A). Pour chacune des questions, les personnes évaluées devaient indiquer leur niveau de confiance à réaliser la tâche indiquée à partir d'une échelle de 10 à 100 (10 = Très peu confiant, 100 = Confiance absolue).

5.4 Test de lâcher de règle (Ruler Drop Test)

Le Ruler Drop Test est utilisé afin de mesurer le temps de réaction visuomoteur. Ce test permet de mesurer le temps de réaction à partir d'une tâche motrice et en intégrant la vision (Eckner *et al.*, 2011). Il est effectué à l'aide d'un instrument de mesure comme une règle, un bâton ou une tige graduée en centimètre, dont un poids en forme de disque peut être intégré au bout de l'instrument (Del Rossi *et al.*, 2014 ; Eckner *et al.*, 2009). Ce test est composé de deux essais de pratique et de huit essais enregistrés. Pour effectuer le test, la personne évaluée doit être assise et doit appuyer son avant-bras dominant sur une table en laissant la main en dehors de la table. Lors des essais, elle doit attraper le plus rapidement possible l'instrument de mesure positionné tout juste au-dessus de sa main et relâché dans un intervalle de temps aléatoire (Eckner *et al.*, 2009). L'évaluateur doit noter à quelle distance l'instrument de mesure fut attrapé, à chaque essai, et le résultat final est constitué d'une moyenne des distances enregistrées. Avec ce résultat, il est possible de calculer le temps de réaction (t) à partir d'une formule composée de la distance de chute (d) et de la force gravitationnelle (g) : $d = \frac{1}{2} gt^2$ (Del Rossi, 2017 ; Eckner *et al.*, 2014). Pour ce projet de recherche, le test fut réalisé à l'aide d'une règle en bois mesurant 100

cm, toujours à la vue du participant et les deux essais ayant les résultats les plus élevés et les deux moins élevés furent retirés pour le calcul du temps de réaction.

5.5 Système de notation des erreurs d'équilibre (Balance Error Scoring System)

Le Balance Error Scoring System (BESS) est un test conçu pour l'évaluation de l'équilibre. Celui-ci est fréquemment utilisé par les chercheurs et cliniciens afin d'identifier un déficit d'équilibre à la suite d'une commotion cérébrale (Bell *et al.*, 2011). La fidélité du BESS est considérée comme étant modérée à bonne (Bell *et al.*, 2011) et des études démontrent une bonne validité du test lors de l'évaluation des déficits d'équilibre à la suite d'une commotion cérébrale (Guskiewicz *et al.*, 2001 ; McCrea *et al.*, 2003 ; Riemann et Guskiewicz, 2000). Le test doit être réalisé dans trois positions différentes. En premier lieu, la personne évaluée devra se tenir en appui bipodal, les pieds joints et les mains sur les hanches. Pour la seconde position, elle devra se tenir en équilibre sur sa jambe non dominante, encore une fois avec les mains sur les hanches et les yeux fermés. Finalement, la troisième position consiste à positionner ses pieds en tandem en plaçant le pied non dominant derrière le pied dominant. Les deux pieds doivent être complètement appuyés au sol et l'orteil du pied non dominant doit toucher au talon du pied dominant. La position est également maintenue avec les mains sur les hanches et les yeux fermés. Le test doit être effectué sans souliers, sur une surface dure ou en mousse. La personne évaluée doit tenir chacune des positions durant 20 secondes en effectuant le moins d'erreurs possible. Une erreur consiste à l'ouverture des yeux, le retrait d'une main

sur les hanches, un déplacement des pieds, une perte d'équilibre, le fait de trébucher, l'élévation de l'avant-pied ou du talon ou une abduction de la hanche supérieure à 30°. L'administrateur doit comptabiliser le nombre d'erreurs pour chacune des positions et lorsque plusieurs erreurs surviennent au même moment, une seule erreur doit être comptabilisée (Bell *et al.*, 2011).

CHAPITRE 6

Article scientifique

Précision du rôle de l'étudiant dans la production de l'article

Contribution de l'étudiant : Élaboration et réalisation complète de l'étude sous la supervision de la Pre. L-A. Corbin-Berrigan et du Pr. P. Fait. Le manuscrit représente le travail de l'auteur principal, et ce, du début de la rédaction jusqu'à la fin du processus d'édition auquel tous les coauteurs ont participé.

Neurotracker and mTBI Tests Battery Performances: Preseason, 48-72 Hour Post-mTBI and Return-to-Play in University Varsity Athletes

Jean-Michel Acquin^{1,2}, Elizabeth Giguère-Lemieux^{1,2}, Philippe Fait^{1,2,3}, Laurie-Ann Corbin-Berrigan^{1,2}

¹Département des sciences de l'activité physique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada

²Groupe de recherche sur les affectations neuromusculosquelettiques (GRAN), Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada

³Research Center in Neuropsychology and Cognition (CERNEC), Montréal, Québec, Canada.

Abstract

Introduction: Mild traumatic brain injury (mTBI) is a common injury among university athletes. The diagnosis and the monitoring of this brain injury, requiring a multimodal and multiple time point assessments, remain a challenge for healthcare professionals. Presently, there is a lack of consistent recommendations in the literature on mTBI-specific tests. Recently, the Neurotracker, has been identified as a potential mTBI assessment tool. The primary objective of this study was to assess the performance on a battery of mTBI-specific tests, including the Neurotracker, during the acute phase of the injury and at the return-to-play (RTP) stage, compared to preseason (PS) performances in university varsity athletes. The secondary objective was to observe the effect of the mTBI symptoms on the battery of mTBI-specific tests at each time points.

Methods: University varsity athletes from the Université of Québec in Trois-Rivières (n=159) completed a PS baseline assessment of a battery of mTBI-specific tests, including the Neurotracker, the Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT), a self-efficacy questionnaire, the Ruler Drop Test and the Balance Error Scoring System (BESS). Participants who sustained a mTBI during the season joined the post-injury phase which included five follow-up visits. The athletes underwent the same battery of tests 48-72 hour post-injury (T1) and at RTP (T5). The participant's symptoms and Neurotracker performances were assessed every three days (T2-T4). Wilcoxon signed-ranked test was performed to compare the battery of tests PS, T1, and T5 scores.

Results: 20 student-athletes (9 women) sustained a mTBI and joined the post-mTBI phase. The average number of days between mTBI and T5 was 15.17 ± 2.48 days. A significant difference was found between T5 Neurotracker mean speed threshold (MST) and T1 Neurotracker MST ($z = -2.52, p = 0.01$), with higher MST being noted at T5. No significant difference was found for the ImPACT. A significant difference in number of symptoms was observed between T1 and PS in the men group ($z = -2.09, p = 0.04$), with highest quantity of symptoms at T1. Significant differences in self-efficacy questionnaire related to athletic skills scores were observed between T1 and PS in the overall group ($z = -3.10, p = 0.00$), the women group ($z = -2.20, p = 0.03$) and the men group ($z = -2.19, p = 0.03$). Significant differences were found between T5 and PS in the overall group ($z = -2.21, p = 0.03$), with higher scores at PS, and between T5 and T1 in the overall group (z

= -2.52, $p = 0.01$), with higher scores at T5. There were significant differences between T1 and PS score for the mTBI presentation related to physical activity self-efficacy score in the overall ($z = -3.15$, $p = 0.00$), women ($z = -2.20$, $p = 0.03$) and men ($z = -2.38$, $p = 0.02$) groups. A significant difference was found between T5 and PS in the overall group ($z = -2.53$, $p = 0.01$), with higher scores at PS. Significant differences were observed between T5 and T1 in the overall group ($z = -2.67$, $p = 0.01$) and in the men group ($z = -2.02$, $p = 0.04$), with higher scores at T5. No significant difference was found between any time points for the Ruler Drop Test. A significant difference was found between T1 and PS in the overall group for the tandem position ($z = -2.09$, $p = 0.04$), with better performances at PS. A strong negative correlation was found between total score symptoms and mTBI presentation related to physical activity score in the women group ($r_s = -0.86$, $p = 0.01$) and a strong positive correlation between the number of symptoms and the BESS tandem position at T1 for the women group ($r_s = 0.87$, $p = 0.01$).

Conclusions: This study suggest that the Neurotracker, the ImPACT, the Ruler Drop Test and the BESS could not be useful in mTBI identification. However, the learning gains of the Neurotracker task seem to be negatively impacted by the mTBI and to be normalizing after repeated exposure to the Neurotracker. Moreover, the results showed that the athlete's self-efficacy can be significantly decreased by the mTBI in the acute phase and at the RTP.

Introduction

Mild traumatic brain injury (mTBI) is a common injury in sports, especially among university athletes. It is suggested that over 10 500 National Collegiate Athletic Association (NCAA) student-athletes sustain an mTBI yearly (Chandran *et al.*, 2022). This injury caused by a direct or indirect blow to the head transmitting an important force to the brain, lead to a complex neurotransmitter et metabolic cascade (Patricios *et al.*, 2023b). Owing to the unpredictable evolution of symptoms particular to each individual, and the absence of a direct biomarker of injury, diagnosis presents a clinical challenge for healthcare professionals. Indeed, symptoms and signs can appear immediately or evolve within minutes or hours following head impact and clinical measures currently do not objectively detect mTBI (Makdissi *et al.*, 2015 ; Patricios *et al.*, 2023b). Currently, most of the mTBI identification tools are based on subjective information from the injured person and there is an important need of objective identification and managing tools to notably reduce recurrent mTBI rates and improve the efficiency of the diagnosis (Patricios *et al.*, 2023b). A rapid and efficient diagnosis in the acute period is essential to ensure a proper and safety management of the mTBI.

The identification and management of mTBI require a multimodal and multiple time point assessments including the evaluation of the signs and symptoms, cognitive functions, balance, visual function, and psychological status (Patricios *et al.*, 2023a). Presently, there are numerous studies on different mTBI assessments, but the literature lacks consistent recommendations (Patricios *et al.*, 2023a). Moreover, the clinical

management of mTBI and return-to-play decisions amongst athletes greatly depend upon symptom resolution. The Neurotracker, a three-dimensional multiple object tracking (3D-MOT) tool initially developed for perceptual-cognitive training to enhance athletes' sport performances, is recognized as a potential tool to assess and manage mTBI (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). The perceptual-cognitive functions appear to recover late in the presence of mTBI (Mathias *et al.*, 2004), which could make the Neurotracker an interesting addition to a mTBI specific tests battery. Previously studied in a pediatric population (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2020), the effect of the mTBI on the Neurotracker have not been studied in a university varsity athletes' population.

The primary objective of this study was to assess the performance on the Neurotracker and a battery of mTBI-specific tests during the acute phase of the injury and at the return-to-play stage, compared to preseason performance in university varsity athletes from mixed-gender cheerleading, men's ice hockey, women's and men's soccer, and women's volleyball. Secondly, this study aimed to observe the effect of mTBI symptoms on the Neurotracker and a battery of mTBI-specific tests at preseason, during the acute phase of the injury and at the return-to-play stage.

Methods

Participants

In this prospective cohort study, a convenience sample (n=159) of university varsity athletes from the Université of Québec in Trois-Rivières (UQTR) were recruited prior to the beginning of the 2022 and 2023 sporting seasons. Participants were included in the study if they were playing one of the following university varsity sports: mixed-gender cheerleading, men's ice hockey, women's and men's outdoor/indoor soccer, or women's volleyball for the UQTR Patriotes and were fluent in both spoken and written French or English. Athletes were excluded if they had an uncorrected vision problem, major neurological or orthopedic disorder limiting the completion of the assessment, and if they had suffered a mTBI within three months preceding their participation. The project was approved by the UQTR's research ethics committee (CER-14-205-07.17) and written informed consent was obtained from all participants.

Procedure

During the 2022 and 2023 preseasons, participants completed a series of mTBI specific baseline assessments including the Neurotracker, the Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT), a self-efficacy questionnaire, the Ruler Drop Test and the Balance Error Scoring System (BESS). Demographic information, sport background and mTBI history also were recorded. Baseline assessments were conducted at the varsity training center by trained research assistants.

Following the preseason baseline assessments (PS), athletes who sustained a mTBI during the two sporting seasons joined the post-mTBI phase which included five follow-up visits (T1 to T5). The first follow-up visit (T1) occurred 48 to 72 hours after a mTBI diagnosis confirmed by the teams' medical personnel (sport physician, athletic therapist). During this visit, information pertaining to the mTBI was collected, and all baseline assessments were repeated. Subsequently, monitoring of the participant's condition progression (symptoms, return-to-play) and the Neurotracker assessment were performed every three days (T2-T4). At the last post-mTBI visit (T5), which was meant to correspond to 14 days post-injury, coinciding with usually mTBI recovery time (Putukian *et al.*, 2023), participants repeated the entire preseason baseline assessments (Figure 3: *Experimental protocol*).

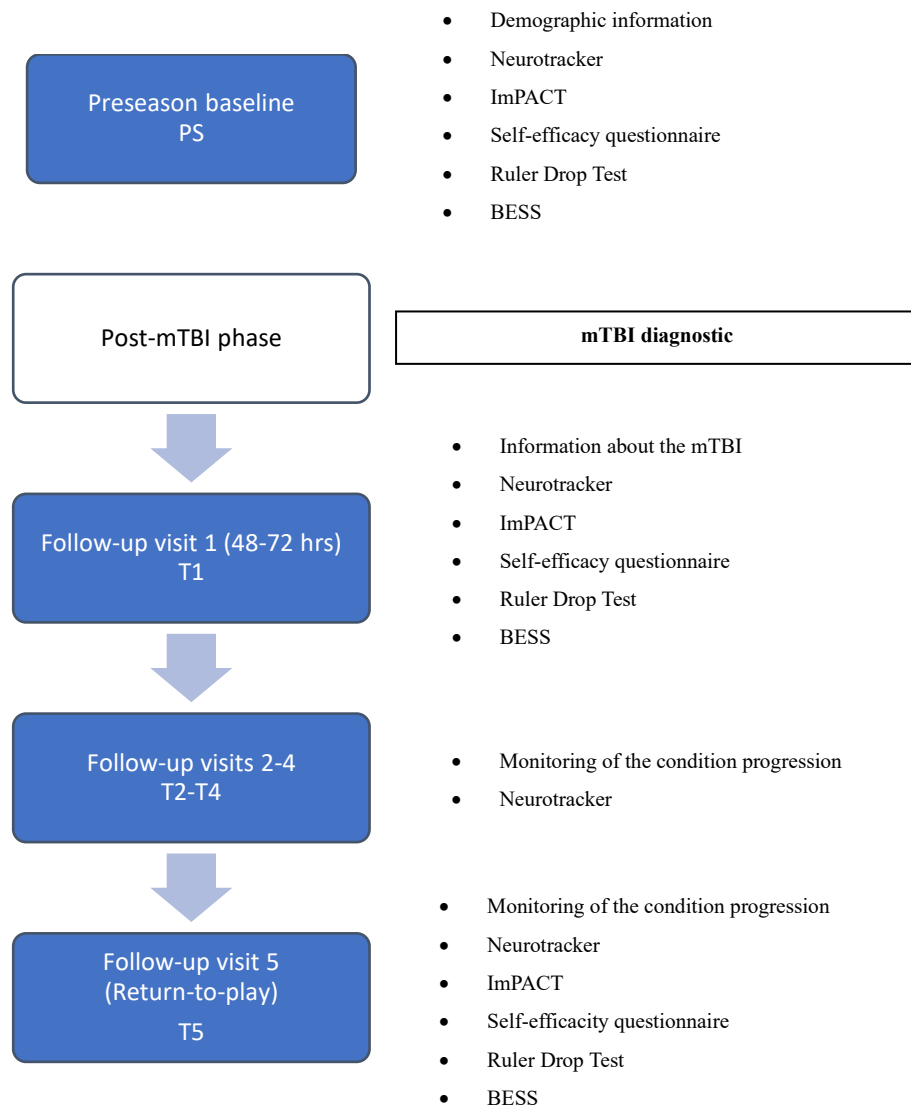


Figure 3: *Experimental protocol*

Main outcome measure

Neurotracker

The Neurotracker (CogniSens Inc., Montreal, Canada) is described as a 3D-MOT task that involves the perceptual-cognitive capacities and stimulates different cognitive functions to track multiple targets through obstacles in a defined space and time

(Cavanagh et Alvarez, 2005 ; Faubert, 2013 ; Faubert et Sidebottom, 2012). The Neurotracker assessment took place in a dark room where the participants wore active 3D glasses and were seated at 1.5 meters from the interface projection. For this study, we used the CORE program, which includes four targets and four distractors. A CORE Neurotracker assessment consists of three sessions of 20 trials involving the following five steps : A) eight yellow spheres are randomly distributed in the 3D interface; B) the color of the four targets to be tracked during the trial change to orange for two seconds; C) the four orange spheres return to their initial color (yellow) and the eight spheres start moving in the interface; D) after eight seconds, the spheres stop moving and numbers (1 to 8) appear on each of them. Then the participant must identify the four targets established at step B; E) following the previous steps, the next trial starts immediately afterward, with a different speed. The Neurotracker program increases the spheres moving speed after a successful trial and reduces it after an unsuccessful trial (Levitt, 1971). A speed threshold (m/s), representing the speed at which participants can accurately track four moving targets is obtained after each session, and a mean speed threshold is established at the end of the three sessions.

Secondary outcomes measures

Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT)

The ImPACT (ImPACT application inc., USA) is a computer-based neurocognitive test used to evaluate cognitive impairments due to a mTBI (Lovell et Solomon, 2013 ; Maroon *et al.*, 2000 ; Sherry *et al.*, 2021). The assessment includes the Post-Concussion Symptom Scale (PCSS) and six modules: word memory, design memory, X's and O's, symbol match, color match and three letters. The ImPACT was completed by the participant, on a laptop, in a silent room. At the conclusion of the modules, composite scores of verbal memory, visual memory, visual motor speed, reaction time, cognitive efficiency and total symptom score are reported (Broglia *et al.*, 2006).

Self-efficacy questionnaire

To evaluate self-efficacy related to physical activity performance after a mTBI, Gagnon & al. (2005) designed a self-administered questionnaire based on Bandura's conceptualization of self-efficacy (Bandura, 1986). Using a standardized method (Streiner et Norman, 1989), they developed two series of questions to assess children's self-efficacy related to athletic skills and mTBI presentation related to physical activity (Gagnon *et al.*, 2005). Initially developed for a pediatric population (Gagnon *et al.*, 2005), this questionnaire was adapted for university varsity athletes in the context of the proposed study. Participants completed the two sections of the self-efficacy questionnaire of

respectively ten and eight questions. For each question, participants graded their confidence to realize the task from 10 to 100 (10 = very unconfident, 100 = absolute level of confidence).

Ruler Drop Test

The ruler Drop Test is used to assess the simple reaction time that can be significantly prolonged after a mTBI (Eckner *et al.*, 2014). This visuomotor simple reaction time test is performed with a graduated measurement tool and involves two practice trials and eight assessment trials (Eckner *et al.*, 2009). Seated with their dominant forearm resting on a table and the hand hanging over the edge of a table, participants had to catch as quickly as possible a 100 cm wooden ruler vertically suspended just above their hand by the test administrator. The ruler was randomly released by the examiner and the distance that the ruler fell was recorded in cm for the eight trials. The two highest and lowest distances were removed, and a mean falling distance was calculated. The reaction time was calculated from a formula composed of the mean falling distance (d) and the force of gravity (g): $d = \frac{1}{2} gt^2$ (Del Rossi, 2017 ; Eckner *et al.*, 2014).

Balance Error Scoring System (BESS)

The BESS is frequently used to obtain an objective measure of balance impairments in a mTBI context (Ulman *et al.*, 2022). It is suggested that this static and eyes closed test can be useful to detect balance deficits by removing the visual feedback during the assessment (Guskiewicz, 2011 ; Ulman *et al.*, 2022). The BESS was performed

in three stances to assess static balance: double-leg stance (feet together), single-leg stance (standing on the non-dominant foot), and tandem stance (non-dominant foot behind the dominant foot, heel to toe). All three stances are performed on a firm surface, shoes off, hands on hips, and eyes closed. Participants had to maintain the positions for 20 seconds without making any errors. An error consists of opening eyes, stepping, falling out of position, removing a hand from the hips, stumbling, moving, or lifting foot. The examiner recorded the number of errors made in each position (Finnoff *et al.*, 2009).

Analysis

Descriptive statistics were employed to summarize demographic data and to present the mean performance across each outcome measure. Due to the small sample of participants included in the study, non-parametric statistical analysis was performed to compare performance on the Neurotracker and mTBI tests battery preseason (PS), post-mTBI (T1) and follow-up visit 5 (T5) performances. Due to missing data owing to drop out, Wilcoxon signed-ranked test was performed to identify at which level the significant differences occurred. Due to known gender differences (Churchill *et al.*, 2021), analyses were performed with the full sample and performed based on biological sex, separating men and women. Spearman correlations were performed to observe correlations between total symptom score, quantity of symptoms and Neurotracker and tests battery performances at PS, T1 and T5. For all analyses, significance level was set at $p < 0.05$. Analyses were performed using IBM SPSS statistics V.29.

Results

A total of 20 participants (9 women, 11 men) sustained a mTBI and were subsequently enrolled in the post-mTBI phase of this study. Of these, four mTBI were sustained in cheerleading (3 women, 1 men), seven in men's ice hockey, seven in soccer (4 women, 3 men), and two in women's volleyball. The mean age of the included participants was 23.25 ± 1.83 years (Women: 23 ± 1.41 , Men: 23.45 ± 2.16). The average number of days between mTBI and T1 was $3.27.17 \pm 1.75$ days (Women: 2.5 ± 1.87 , Men: 3.78 ± 1.56), 15.17 ± 2.48 days between mTBI and T5 (Women: 16 ± 1.73 , Men: 14.33 ± 3.21), and 36.47 ± 41.73 days between mTBI and the return-to-play (Women: 36 ± 24.68 , Men: 36.78 ± 51.64). Participants attended to an average of 3.40 ± 1.50 follow-up visits (Women: 3.33 ± 1.50 , Men: 3.45 ± 1.57) (Table 1).

Table 1. Demographic characteristics of participants

| Participants (n=) | Age (years) | Sports (n=) | Days between mTBI and T1 | Days between mTBI and T5 | Days between mTBI and RTP | Follow-up visits |
|---------------------|------------------|--|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|
| Overall = 20 | 23.25 ± 1.83 | Cheerleading = 4 Hockey = 7 Soccer = 7 Volleyball = 2 | 3.27 ± 1.75 | 15.17 ± 2.48 | 36.47 ± 41.73 | 3.40 ± 1.50 |
| Women = 9 | 23 ± 1.41 | Cheerleading = 3 Soccer = 4 Volleyball = 2 | 2.5 ± 1.87 | 16 ± 1.73 | 36 ± 24.68 | 3.33 ± 1.50 |
| Men = 11 | 23.45 ± 2.16 | Cheerleading = 1 Hockey = 7 Soccer = 3 | 3.78 ± 1.56 | 14.33 ± 3.21 | 36.78 ± 51.64 | 3.45 ± 1.57 |

n: number; mTBI: mild traumatic brain injury; RTP: return-to-play; T1: first follow-up visit; T5: fifth follow-up visit.

Neurotracker

A significant difference was found between T5 Neurotracker performance and T1 Neurotracker performance in the overall sample ($z = -2.52, p = 0.01$) and in the men participants ($z = -2.02, p = 0.04$), with higher Neurotracker performance being noted at time point 5 (Table 2). No other significant difference was found at any time point for the overall sample and with regard to biological sex (Supplementary file 1).

ImPACT

No significant difference was found for all ImPACT composite scores when comparing T1 to preseason, T1 to T5 and T5 to preseason (Supplementary file 1).

Post-Concussion Symptom Scale

A significant difference in number of symptoms was observed between T1 and preseason in the men group ($z = -2.09, p = 0.04$), with highest quantity of symptoms at T1 (Table 2). No significant difference in number of symptoms in the men group between T5 and preseason and between T1 and T5. No significant difference between any time point for the overall group and the women group in quantity of symptoms and no significant difference in total score of symptoms for the three groups (Supplementary file 1).

Self-efficacy questionnaire

Significant differences in self-efficacy questionnaire related to athletic skills scores were observed between T1 and preseason in the overall group ($z = -3.10, p = 0.00$),

the women group ($z = -2.20, p = 0.03$) and the men group ($z = -2.19, p = 0.03$). Significant differences were found between T5 and preseason in the overall group ($z = -2.21, p = 0.03$), with higher scores at preseason, and between T5 and T1 in the overall group ($z = -2.52, p = 0.01$), with higher scores at T5 (Table 2). There was no significant difference between T5 and preseason and between T5 and T1 for both biological sexes (Supplementary file 1).

There were significant differences between T1 and preseason score pertaining to mTBI presentation related to physical activity self-efficacy score in the overall group ($z = -3.15, p = 0.00$), the women group ($z = -2.20, p = 0.03$) and in the men group ($z = -2.38, p = 0.02$). Between T5 and preseason, we found a significant difference in the overall group ($z = -2.53, p = 0.01$), with higher scores at preseason. Significant differences were observed between T5 and T1 in the overall group ($z = -2.67, p = 0.01$) and in the men group ($z = -2.02, p = 0.04$), with higher scores at T5 (Table 2). No significant difference was found between T5 and preseason for the women and the men groups and between T5 and T1 for the women group (Supplementary file 1).

Ruler Drop Test

No significant difference was found for the Ruler Drop Test when comparing T1 to preseason, T1 to T5 and T5 to preseason for the three groups (Supplementary file 1).

BESS

No significant differences were found for BESS between all time points for all positions except for the tandem position in the overall group. A significant difference was found between T1 and preseason ($z = -2.09$, $p = 0.04$) with better performances at preseason baseline (Supplementary file 1).

Symptoms correlations

The correlations between symptoms and mTBI tests battery can be found in Table 3. A strong negative correlation between total score symptoms and mTBI presentation related to physical activity score in the women group ($r_s = -0.86$, $p = 0.01$) were found. The number of symptoms showed a negative moderate correlation with the BESS tandem position performance in preseason in the overall group ($r_s = -0.60$, $p = 0.01$), the total score symptoms showed a moderate negative correlation with the BESS tandem performance in preseason in the overall group ($r_s = -0.60$, $p = 0.01$) and a strong positive correlation with the BESS tandem position at T1 for the women group ($r_s = 0.87$, $p = 0.01$). No significant correlation was found between symptoms and Neurotracker and Ruler Drop Test performances (Supplementary file 2).

Table 2. Neurotracker and tests battery performances comparisons between preseason, T1 and T5

| Neurotracker | Overall | | | Women | | | Men | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Neurotracker (m/s) | 1.19 ± 0.26 | 1.13 ± 0.28 | 1.41 ± 0.28 | 1.14 ± 0.27 | 1.12 ± 0.21 | 1.29 ± 0.17 | 1.24 ± 0.26 | 1.13 ± 0.34 | 1.49 ± 0.33 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T5 Mean NT vs T1 Mean NT | -2.52 | | 0.01 | -1.60 | | 0.11 | -2.02 | | 0.04 |
| ImpACT | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Memory composite verbal | 89.05 ± 10.82 | 90.07 ± 11.73 | 89.25 ± 13.37 | 92.75 ± 9.11 | 94.14 ± 5.96 | 88.25 ± 15.09 | 86.37 ± 11.56 | 86.50 ± 14.62 | 90.25 ± 13.67 |
| Memory composite visual | 79.84 ± 10.55 | 76.93 ± 11.79 | 78.00 ± 12.29 | 83.13 ± 10.96 | 84.29 ± 6.34 | 81.50 ± 14.27 | 77.45 ± 10.06 | 70.50 ± 11.93 | 74.50 ± 10.79 |
| Visual motor speed composite | 38.72 ± 5.52 | 37.92 ± 5.34 | 38.16 ± 5.50 | 39.72 ± 7.12 | 37.12 ± 4.30 | 38.19 ± 7.70 | 38.00 ± 4.23 | 38.63 ± 6.33 | 38.14 ± 3.36 |
| Reaction time composite | 0.65 ± 0.12 | 0.64 ± 0.09 | 0.60 ± 0.06 | 0.61 ± 0.11 | 0.67 ± 0.09 | 0.61 ± 0.08 | 0.68 ± 0.13 | 0.62 ± 0.09 | 0.59 ± 0.06 |
| Impulse control composite | 5.74 ± 4.21 | 7.47 ± 5.72 | 6.00 ± 5.10 | 7.88 ± 5.28 | 7.71 ± 6.65 | 8.25 ± 6.65 | 4.18 ± 2.48 | 7.25 ± 5.23 | 3.75 ± 1.71 |
| PCSS Number of symptoms | 5.42 ± 4.88 | 9.32 ± 6.51 | 3.78 ± 3.63 | 7.75 ± 4.98 | 6.78 ± 4.63 | 4.40 ± 2.88 | 3.73 ± 4.24 | 11.60 ± 7.31 | 3.00 ± 4.76 |
| PCSS Total Score | 10.32 ± 10.80 | 19.63 ± 20.18 | 6.78 ± 8.11 | 14.38 ± 11.66 | 11.67 ± 8.19 | 9.20 ± 9.26 | 7.36 ± 9.58 | 26.80 ± 25.19 | 3.75 ± 6.24 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T1 NOS vs PS NOS | -1.85 | | 0.06 | -0.17 | | 0.86 | -2.09 | | 0.04 |
| Self-efficacy questionnaire | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Athletic skills | 887.06 ± 87.73 | 662.63 ± 211.58 | 788.89 ± 168.26 | 868.75 ± 93.72 | 596.25 ± 151.37 | 700.00 ± 203.80 | 903.33 ± 84.11 | 710.91 ± 241.76 | 860.00 ± 106.07 |
| mTBI presentation related to physical activity score | 731.76 ± 67.38 | 518.89 ± 166.13 | 677.78 ± 75.30 | 717.50 ± 56.51 | 495.00 ± 145.80 | 645.00 ± 62.45 | 744.44 ± 76.83 | 538.00 ± 186.24 | 704.00 ± 80.50 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T1 Athletic skills vs PS Athletic skills | -3.10 | | 0.00 | -2.20 | | 0.03 | -2.19 | | 0.03 |
| T1 mTBI PRPAS vs PS mTBI PRPAS | -3.15 | | 0.00 | -2.20 | | 0.03 | -2.38 | | 0.02 |
| T5 Athletic skills vs PS Athletic skills | -2.21 | | 0.03 | -1.60 | | 0.11 | -1.60 | | 0.11 |

| | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| T5 mTBI PRPAS vs PS mTBI PRPAS | -2.53 | 0.01 | -1.83 | 0.07 | -1.83 | 0.07 |
| T5 Athletic skills vs T1 Athletic skills | -2.52 | 0.01 | -1.83 | 0.07 | -1.83 | 0.07 |
| T5 mTBI PRPAS vs T1 mTBI PRPAS | -2.67 | 0.01 | -1.83 | 0.07 | -2.02 | 0.04 |
| Ruler Drop Test | Overall | | | Women | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Ruler Drop Test | 18.84 \pm 6.53 | 19.88 \pm 8.29 | 15.00 \pm 6.58 | 19.97 \pm 7.86 | 18.77 \pm 9.03 | 16.69 \pm 9.75 |
| BESS | Overall | | | Women | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Double | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 |
| Single | 2.61 \pm 2.23 | 3.59 \pm 2.87 | 3.56 \pm 2.88 | 2.33 \pm 2.56 | 3.14 \pm 2.91 | 5.25 \pm 2.63 |
| Tandem | 1.06 \pm 1.55 | 2.29 \pm 2.91 | 1.67 \pm 2.18 | 0.78 \pm 1.72 | 2.71 \pm 3.59 | 1.75 \pm 2.06 |
| | <i>Z</i> | <i>p</i> | | <i>Z</i> | <i>p</i> | |
| T1 Tandem vs PS Tandem | -2.09 | 0.04 | -1.60 | 0.11 | -1.19 | 0.24 |

m/s: meter per second; mTBI: mild traumatic brain injury; NOS: number of symptoms; NT: Neurotracker; PCSS: Post-Concussion Symptom Scale; PS: preseason; PRPAS: presentation related to physical activity score; SD: standard deviation; T1: first follow-up visit; T5: fifth follow-up visit.

Table 3. Correlations between symptoms and mTBI tests battery

| Self-Efficacy Questionnaire | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|----------------------|-------------|-------|--------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| mTBI presentation related to physical activity score | Correlation Coefficient | -0.34 | -0.23 | -0.42 | -0.31 | -0.41 | -0.41 | -0.42 | -0.58 | -0.19 | -0.44 | -0.86 | -0.25 | -0.69 | -0.60 | -0.32 | -0.65 | -0.60 | -0.32 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.20 | 0.61 | 0.26 | 0.25 | 0.36 | 0.28 | 0.10 | 0.14 | 0.62 | 0.08 | 0.01 | 0.52 | 0.06 | 0.40 | 0.68 | 0.08 | 0.40 | 0.68 |
| | N | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| BESS | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
| | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| Tandem | Correlation Coefficient | -0.60 | -0.38 | -0.58 | -0.60 | -0.44 | -0.58 | 0.18 | 0.21 | 0.15 | 0.37 | 0.87 | 0.05 | -0.56 | -0.95 | -0.39 | -0.56 | -0.95 | -0.39 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.01 | 0.35 | 0.11 | 0.01 | 0.28 | 0.10 | 0.50 | 0.65 | 0.71 | 0.16 | 0.01 | 0.90 | 0.15 | 0.05 | 0.61 | 0.15 | 0.05 | 0.61 |
| | N | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |

N: number; M: men; mTBI: mild traumatic brain injury; O: overall; Sig: significance level; T1: first follow-up visit; T5: fifth follow-up visit; W: women.

Discussion

The main objective of this study was to explore the performance on the Neurotracker and a mTBI tests battery when comparing between preseason and post-injury performance, in university varsity mixed cheerleading, men ice hockey, women and men soccer and women volleyball athletes. To our knowledges, this is the first study to observe the performance of the Neurotracker at different time points following a mTBI in university varsity athletes. In this study, the PS Neurotracker performance was not significantly different 48-72 hours (T1) after the injury. These findings could be explained by the inefficiency of this tool to assess perceptual-cognitive skills and other cognitive functions that may be altered by mTBI, in the acute phase of mTBI. Studies found that gaze strategies can explain performance differences in multiple-object tracking (Fehd et Seiffert, 2010 ; Zelinsky et Neider, 2008 ; Zelinsky et Todor, 2010). Thus, the assessment of perceptual-cognitive skills by the Neurotracker may not be accurate, because the Neurotracker performance can be affected by the gaze strategies. Although there is no significant difference between baseline and post-mTBI performances, some participants had a slower speed threshold after the injury than at the baseline. Those differences could be caused by oculomotor impairments, such as smooth pursuit eye movements and saccadic eye movements (Murray *et al.*, 2020), which led to a change in gaze strategies during the Neurotracker assessment. These findings indicate that the Neurotracker does not seem to be altered by the mTBI in acute phase and could not be used alone to identify mTBI 48-72 hours after the injury. Moreover, there is no significant difference between

the preseason performance and the performance at the fifth follow-up visit (T5). This result suggest that the athletes do not significantly increase their performances after five uses of the Neurotracker following a mTBI. Thus, it cannot be affirmed that the perceptual-cognitive skills could be train by the Neurotracker in the context of a mTBI.

Regarding the evolution of the Neurotracker performance after a mTBI, the statistical analysis showed a significant difference in Neurotracker performance between the fifth follow-up visit mean speed thresholds and the 48-72 hours mean speed threshold for the overall group and the men group, but no significant difference between these two time points for the women group. To our knowledge, this study is the first to explore changes in university varsity athletes' Neurotracker performance following a mTBI. The results of our study align with Chermann & al. (2018), where mTBI negatively impacted the Neurotracker performance at time point 1, 48-72 hours after the injury, when compared to time point 5, which coincides with the mean return-to-play time (Putukian *et al.*, 2023) for the overall and the men groups, but not for the women group. The slower mean speed thresholds in the acute phase of the mTBI may be caused by the effect of mTBI on the learning gains of the perceptual-cognitive task. After repeated exposure to the Neurotracker, participants reached training gains and obtained higher performances over time. Those findings also coincide with Corbin-Berrigan and al., (2020) where children's training gains were impacted by mTBI. Furthermore, it could be interesting to investigate the effectiveness of the Neurotracker for the monitoring of the mTBI in the return-to-play process. The non-significant difference in the women group could be

explained by the physiological differences between biological sex. For example, men have a greater reductions of cerebral blood flow than women (Churchill *et al.*, 2021) and studies suggest that acute change in cerebral blood flow may affect cognitive functions (Ogoh, 2017 ; Ware *et al.*, 2020). The greater cerebral blood flow could explain the smaller difference in injured women' Neurotracker performances.

No statistically significant difference was found for any composite score between any time points for the ImPACT in all groups. The validity of the ImPACT still have limited evidences whit high rated of invalid performances (Alsalaheen *et al.*, 2016 ; Gaudet et Weyandt, 2017). The accuracy of the ImPACT to diagnose mTBI remains unclear and requires more studies (Alsalaheen *et al.*, 2016). At this time, this test should not be clinically used alone to assess and monitor mTBI (Alsalaheen *et al.*, 2016 ; Messa *et al.*, 2022). The number of symptoms and the total score were recorded by the PCSS included in the ImPACT. In this study, a significant difference was found in the men group for the number of symptoms between the preseason baseline and 48-72 hours post-mTBI, but no other significant difference for the remaining time points and in any groups for the total score when compared between all time points. The PCSS is a self-report questionnaire measuring symptoms intensity. It is known that athletes are subject to underreport their symptoms to return to play as soon as possible and hiding symptoms could explain those results (Conway *et al.*, 2018 ; Meier *et al.*, 2015).

Although the full resolution of symptoms, impairments in cognitive functions and clinical findings related to the mTBI is necessary, the psychological aspect is an essential

aspect not to be overlooked. Our study showed that athletes' self-efficacy was significantly lower 48-72 hours after the mTBI (T1) and at the return-to-play (T5) when compared at the preseason baseline assessment. Self-efficacy questionnaire scores are perhaps the most revealing results of this study where both total scores of the questionnaire, athletic skills and mTBI presentation related to physical activity, were significantly different from preseason scores at T1 and T5 in the overall group. Suggesting that the self-efficacy decrease after the mTBI, athletes do not only experience functional deficits, but also psychological impact and athlete's self-efficacy may decrease (Ardern *et al.*, 2013 ; Glazer, 2009 ; Heil, 1993). Emotional factors such as feeling unable to perform at the preinjury level and fear of reinjury can lead to higher rates of subsequent injuries (Paterno *et al.*, 2018). Anxiety is also highly experienced by athletes who sustained a mTBI (van Ierssel *et al.*, 2022) and this condition could be related to a loss of confidence in their ability to reach performance expectations (Forsdyke *et al.*, 2016). Moreover, studies suggest that psychological disturbances may persist beyond clinical signs and symptoms recovery (Kamins *et al.*, 2017). Interestingly, the self-efficacy questionnaire is the only assessment significantly different from the preseason baseline at the return-to-play time. Despite participants having similar or better performances on all clinical measures and on the Neurotracker at the last follow-up visit (T5), they still demonstrated a low level of self-efficacy regarding athletics skills and mTBI presentation related to physical activity. These results suggest that even after receiving medical clearance, athletes don't seem to feel ready to return to the competition. These findings

support the literature suggesting that psychological factors and readiness should be included in return-to-play strategy (Ardern *et al.*, 2013 ; Patricios *et al.*, 2023b).

We found no significant difference between any time points in any groups for the Ruler Drop Test. Those results could be explained by the small changes in reaction time at T1 and T5. Eckner & al. (2014) found that the athletes' calculated reaction time must be at least 31 ms slower than baseline to be 95 % confident that their performance at the Ruler Drop Test has declined following a mTBI. Thus, the test, which calculates the visuomotor simple reaction time using the mean distance the ruler fell, may not be accurate enough to demonstrate a significant change.

In this study, one significant difference was found for the BESS between the preseason and the T1 score for the tandem position in the overall group. Although it is an objective test, the accuracy of the BESS can be impacted due to different interpretations or strictness of error criteria. A study suggest that the same rater should administer the test and when it is not possible, the raters should take part in a training session to establish consistency between administrators (Bell *et al.*, 2011), which was not the case in this study. Moreover, a static balance test may not be sensitive enough to assess balance deficits after a mTBI. Furthermore, Burk & al. (2013) found that university varsity athletes can significantly improve their BESS performance after a sporting season. Participants' post-mTBI performances may appear unaltered when compared to preseason performances due to improvement over the season, which could impact the representation of the athletes' normal performances assessed at baseline session. A dynamic balance

tests like the tandem gait or the Functional Gait Assessment can be interesting to increase the complexity and the sensitivity of the mTBI diagnosis by assessing additional aspects of dynamic balance during movements that may be altered by the injury (Patricios *et al.*, 2023a).

A secondary purpose of this study was to explore the influence of the mTBI symptoms on Neurotracker and a mTBI tests battery performances. Currently, the diagnosis of a mTBI is mostly based on a subjective evaluation of the symptoms and clinical signs (Silverberg *et al.*, 2023). Also, the return-to-play and learn process is a graduated stepwise strategy supported by the evolution of symptoms (Patricios *et al.*, 2023b). It is essential to understand the symptoms effects on clinical assessments tests in order to provide an effective management of the mTBI. Our findings showed that the mTBI symptoms do not correlate with the Neurotracker and the Ruler Drop Test scores at any time points of the study. Number and intensity of symptoms seem to not affect, positively or negatively, the performance to these tests.

However, the results showed correlations with some results at the self-efficacy questionnaire and the BESS. When looking at results from a biological sex perspective, when completing the self-efficacy questionnaire, women athletes with greater intensity of symptoms had a low score in the mTBI presentation related to physical activity part of the questionnaire in the acute phase of the mTBI. These findings suggest that mTBI symptoms influence women athletes' perceived competences. Participants with a high score of symptoms feel that they are not able to make physical activity without

exacerbation of symptoms, fear of reinjury or being confident to perform normally. Also, the total score of symptoms correlates with the BESS tandem position performance in the women group at the first follow-up visit 48-72 hours after the mTBI. Women athletes with a higher score of symptoms intensity are more likely to make more errors at the balance assessment, which would represent a greater balance deficit. These findings align with Ulman & al. (2022)'s works where BESS poor performances in the acute phase were realized when symptoms were more pronounced. The other significant correlations between symptoms and tandem position can not be used to suggest clinical uses due to the inconsistency of the results. It does not seem accurate that symptoms affect positively the BESS performance.

Some limitations can be highlighted from this study, such as not controlling for attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) medication, and hours of sleep. Participants retention was low with 13 lost to follow-up at T5, which some of them occurred due to the end of their sporting season. Despite these limitations, these findings should be considered. The pre-post-injury design was one of the strengths of this study. A good communication between the team's medical staff and the research team allowed an effective monitoring of the injured participants. The protocol was well designed and provided effective assessments. The gender distribution was well balanced among the injured participants, with 45 % women. A good recruitment of 159 athletes was possible by means of the association with the UQTR varsity teams.

Acknowledgments

Authors would like to thank UQTR Patriotes' athletes for their participation and Étienne Fallu, Jean-François Brunelle, Julien Glaude-Roy and Kyle Sutton for their implication in the participants recruitment. This study was supported in part by the Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques (GRAN) and the Regroupement intersectoriel de recherche en santé de l'Université du Québec (RISUQ).

Declaration of interest

The authors declare no conflict of interest.

CHAPITRE 7

Discussion

Ce projet de recherche a permis d'étudier une batterie de tests spécifiques à la commotion cérébrale, incluant le Neurotracker, un outil ayant démontré un certain potentiel dans l'évaluation et la prise en charge des commotions cérébrales (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020 ; Corbin-Berrigan *et al.*, 2020), chez une population d'athlètes universitaires pratiquant un sport à risque de commotion cérébrale. Cette étude, réalisée auprès d'athlètes universitaires de cheerleading mixte, de hockey masculin, de soccer féminin et masculin et de volleyball féminin, avait comme objectif principal d'observer le comportement du Neurotracker et des autres tests de la batterie en présaison, 48-72 heures après la commotion cérébrale et à la 5^e visite post-blessure (retour à la compétition). Secondairement, l'effet des symptômes sur les performances aux tests de la batterie spécifique à la blessure était également étudié. À notre connaissance, cette étude est la première à observer les changements de performances au Neurotracker suivant une commotion cérébrale chez des athlètes universitaires.

7.1 Comparatif présaison et 48-72 heures post-commotion cérébrale

Présentement, l'identification de la commotion cérébrale se base essentiellement sur une évaluation subjective des symptômes et des signes cliniques (Silverberg *et al.*, 2023). Dans cette optique, des chercheurs dans le domaine tentent de remédier au manque d'évaluation objective en étudiant différents tests et outils (Tabor *et al.*, 2023). Pour ce faire, les évaluations pré- et post-commotion cérébrale sont couramment utilisées (Dobney *et al.*, 2018). Afin d'examiner l'efficacité de la batterie de tests

étudiée à identifier la commotion cérébrale chez les athlètes universitaires, l'effet de cette blessure sur les performances à la batterie de tests fut observé durant sa phase aiguë. Les résultats obtenus en présaison furent donc comparés aux résultats 48 à 72 heures après la commotion cérébrale. Tout d'abord, l'analyse statistique ne démontre aucune différence significative entre les performances présaison et 48 à 72 heures post-blessure réalisées au Neurotracker. De plus, les symptômes de commotion cérébrale semblent également n'avoir aucun effet sur la performance des athlètes lors de cette tâche de 3D-MOT. Ces résultats pourraient s'expliquer par l'inefficacité de cet outil à évaluer les capacités perceptivo-cognitives et d'autres fonctions cognitives pouvant être altérées par la commotion cérébrale durant sa phase aiguë, telles que l'attention. Il est proposé que le Neurotracker pourrait s'apparenter à certains tests évaluant les capacités attentionnelles (Lysenko-Martin *et al.*, 2020), mais on ne constate pas de diminution marquée des performances après la blessure chez les participants de ce projet de recherche malgré que ces capacités puissent être affectées par la commotion cérébrale. La population étudiée pourrait toutefois avoir un impact sur les résultats. En effet, il est suggéré que les athlètes de haut niveau soient en mesure de réaliser des performances supérieures à la moyenne lors d'une tâche cognitive sollicitant les capacités attentionnelles (Romeas *et al.*, 2024 ; Vona *et al.*, 2024). Il se pourrait donc que le Neurotracker ne soit pas assez sensible pour détecter des déficits au niveau de l'attention chez des athlètes universitaires. Aussi, des études suggèrent que la stratégie visuelle utilisée pour suivre des cibles en mouvement (*gaze strategy*) aurait un impact

sur la performance réalisée lors d'une tâche de suivi de multiples cibles (*multiple-object tracking*) (Fehd et Seiffert, 2010 ; Zelinsky et Neider, 2008 ; Zelinsky et Todor, 2010). En ce sens, l'évaluation des capacités perceptivo-cognitives par le Neurotracker ne serait pas précise puisque la performance au Neurotracker peut être affectée par la stratégie visuelle utilisée par la personne évaluée. Celle-ci pourrait opter pour une stratégie lors de l'évaluation présaison, par exemple, fixer un point précis au centre de l'interface du Neurotracker, et opter pour une autre lors de l'évaluation post-blessure, comme tenter de suivre des yeux les cibles en mouvements. Cela viendrait possiblement impacter le résultat obtenu et fausser l'évaluation, puisque l'une des stratégies utilisées pourrait s'être avérée moins efficace et l'évaluation ne se réaliserait pas dans les mêmes conditions que la précédente. Bien que les résultats de l'étude ne soient pas significatifs, certains participants ont obtenu des seuils de vitesse moyens post-commotion cérébrale plus lents qu'en présaison. Cette diminution de la performance pourrait être causée par des problèmes oculomoteurs survenus à la suite de la blessure au niveau de la saccade oculaire et de la poursuite visuelle (*smooth pursuit eye movements*) menant notamment à des changements de stratégie visuelle (Murray *et al.*, 2020). Il est cependant difficile d'attribuer ces résultats à des déficits oculomoteurs puisque le Neurotracker n'évalue pas les capacités oculomotrices pouvant être altérées par la commotion cérébrale. Dans ce cas, une évaluation mesurant ce type de déficit aurait été nécessaire afin d'y attribuer la raison de la diminution des performances. Pour ce faire, l'ajout d'un outil de suivi des mouvements oculaires

permettrait non seulement d'analyser la stratégie employée par la personne évaluée afin de suivre les objets en mouvement, mais également d'observer si cette personne présente des déficits oculomoteurs (Snegireva *et al.*, 2018).

Concernant le test ImPACT, ni la commotion cérébrale, ni le nombre et l'intensité des symptômes ne semblent avoir un effet sur la performance des athlètes universitaires à ce test 48-72 heures post-blessure. À ce jour, les preuves concernant la validité du test ImPACT demeurent limitées en raison d'un haut taux de performances invalides (Alsalaheen *et al.*, 2016). Une performance peut devenir invalide si, par exemple, la personne évaluée fait preuve d'inattention durant le test, si les instructions ne sont pas bien comprises, si le test n'est pas pris au sérieux ou si la personne sous-performe volontairement (ImPACT Applications, Inc., 2021). Des performances invalides réalisées par les participants en présaison pourraient donc expliquer les résultats non significatifs obtenus. Bien que l'ImPACT comprenne un indicateur de validité des résultats, ce dernier ne semble pas assez efficace. Selon une étude, 60,8 % des performances invalides sont détectées (Messa *et al.*, 2022). Cette donnée serait même supérieure à l'efficacité réelle de l'indicateur, puisque les simulations réalisées pour son évaluation produiraient des sous-performances exagérées et facilement détectables (Abeare *et al.*, 2021 ; Messa *et al.*, 2022). Les résultats non significatifs de ce projet viennent appuyer ceux d'autres études suggérant que présentement, l'ImPACT ne devrait pas être utilisé seul cliniquement afin de détecter une commotion

cérébrale (Alsalaheen *et al.*, 2016 ; Messa *et al.*, 2022). Par ailleurs, l'ImPACT comprend une échelle mesurant le nombre de symptômes post-commotion cérébrale autorapportés ainsi que leur intensité (PCSS). D'après les résultats de cette étude, l'échelle PCSS ne permet pas d'observer une différence significative entre le nombre de symptômes présaison et 48 à 72 heures après la commotion cérébrale ainsi que pour leur intensité chez l'ensemble des athlètes participants. Il est connu que les athlètes sont une population sujette à cacher et ne pas rapporter leurs symptômes après avoir subi une commotion cérébrale. Beaucoup d'entre eux cachent leurs symptômes afin de retourner au jeu le plus rapidement possible ou par peur de perdre leur poste au sein de leur équipe (Conway *et al.*, 2018 ; Meier *et al.*, 2015). Le PCSS étant un questionnaire de symptômes autorapportés, donc une évaluation subjective, ne peut empêcher ce type de comportement. Cela démontre davantage la nécessité d'avoir des outils d'évaluations objectifs afin d'assurer la sécurité et la santé des sportifs.

Il est également possible de constater que l'utilisation du Ruler Drop Test à partir de mesures de base pour l'évaluation du temps de réaction visuomoteur post-commotion cérébrale ne semble pas pertinent en phase aiguë. Lorsque comparé à l'évaluation présaison, aucune différence significative ne fût observée au niveau des performances lors du premier suivi post-blessure et ces performances ne corrèlent pas avec la quantité et l'intensité des symptômes. Pourtant, des déficits au niveau du temps de réaction sont couramment observés chez les personnes en phase aiguë de la

commotion cérébrale (Lempke *et al.*, 2020). De plus, les résultats d'évaluation sont davantage concluants lorsque l'évaluation est effectuée à l'aide de tests comme le Ruler Drop Test où le temps de réaction est mesuré à partir d'un seul stimulus et d'une seule réponse, comparativement aux tests combinant plusieurs types de mesures du temps de réaction (Lempke *et al.*, 2020). Néanmoins, les résultats de ce projet de recherche ne concordent pas avec ces faits rapportés et d'autres études suggérant que l'utilisation du Ruler Drop Test au sein d'une batterie de tests serait appropriée pour le diagnostic de la commotion cérébrale (Del Rossi, 2017 ; Eckner *et al.*, 2014). Cependant, le protocole de ces deux études différait de celui de ce projet de recherche au niveau de l'instrumentation de mesure. Eckner et al. (2014) ont pour leur part utilisé une tige graduée dont un poids en forme de disque était intégré au bout de celle-ci. Del Rossi (2017) a quant à lui, utilisé un tube afin de cacher l'instrument de mesure et de limiter l'anticipation des participants. À la différence de ces protocoles, l'outil de mesure utilisé dans la présente étude n'était ni caché ni composé d'un poids additionnel. De plus, des changements peu considérables au niveau des temps de réaction des athlètes lors des différentes prises de mesures pourraient expliquer les résultats non significatifs. Il est suggéré que les athlètes doivent être au moins 31 ms plus lents lors du Ruler Drop Test afin de pouvoir affirmer que leur performance a diminué (Eckner *et al.*, 2014), ce qui pourrait avoir une influence sur les résultats obtenus lors des évaluations.

Contrairement aux autres évaluations de la batterie de tests spécifiques à la commotion cérébrale, le BESS et le questionnaire d'efficacité personnelle ont tous les deux démontré des résultats statistiques significatifs lorsque leurs mesures présaisons furent comparées à celles 48 à 72 heures post-commotion cérébrale. Le BESS a permis d'observer un déficit d'équilibre après la commotion cérébrale durant la prise de position en tandem. Cependant, la précision des résultats peut demeurer incertaine puisque les résultats sont basés sur le jugement de l'évaluateur. Les erreurs commises au cours de ce test sont attribuées par un évaluateur qui doit se fier à certains critères. Toutefois, il peut être difficile à certains moments de déterminer s'il y a erreur ou non, particulièrement lorsque l'évaluateur doit juger si le participant a effectué une abduction de la hanche supérieure à 30° (Finnoff *et al.*, 2009). De plus, le test n'a pas pu être administré par une seule personne au cours de l'étude. Il est suggéré qu'un même évaluateur administre le test à tous les participants et lorsque ce n'est pas possible, les évaluateurs devraient suivre une formation afin d'établir une constance entre le jugement de ces derniers, ce qui ne fut également pas réalisée (Bell *et al.*, 2011). Ainsi, la précision du BESS peut être influencée par les différentes interprétations ou la sévérité des évaluateurs par rapport aux critères d'erreurs. Conformément aux résultats, un test d'équilibre statique comme le BESS pourrait ne pas être suffisant afin d'évaluer des déficits au niveau de l'équilibre à la suite d'une commotion cérébrale. En ce sens, un test d'équilibre dynamique, comme la marche en tandem, serait intéressant dans l'optique d'augmenter la sensibilité du diagnostic de la commotion cérébrale en

évaluant des éléments additionnels de l'équilibre dynamique à partir de mouvements pouvant être altérés par cette blessure (Patricios *et al.*, 2023a).

Pour sa part, l'observation d'une diminution significative du sentiment d'efficacité personnelle des athlètes dans un contexte sportif 48 à 72 heures après avoir subi une commotion cérébrale, permet de suggérer la valeur ajoutée d'un questionnaire tel que celui utilisé dans cette étude, dans une batterie de tests spécifiques à la commotion cérébrale. Les résultats de ce questionnaire montrent que la commotion cérébrale pourrait impacter psychologiquement les personnes blessées. La commotion cérébrale pourrait donc non seulement affecter les fonctions cognitives, mais également la perception qu'ont les blessés sur leurs propres capacités. Des résultats similaires furent observés dans une étude réalisée par Crofts *et al.* (2024) où les athlètes universitaires ont démontré un manque de confiance face à un retour à la compétition sportive lors de la phase aiguë de la commotion cérébrale. Dans un contexte de sports universitaires, ces résultats sont intéressants puisqu'ils démontrent que les athlètes sont conscients de l'ampleur que peut avoir une commotion cérébrale et qu'ils perçoivent l'effet que peut avoir cette blessure sur leur performance sportive, leurs capacités ainsi que sur leurs habiletés. Toutefois, le fait d'avoir des connaissances sur les commotions cérébrales ne réduirait pas l'intention des athlètes universitaires de ne pas rapporter la blessure (Conway *et al.*, 2018). Malgré des connaissances sur les symptômes, les risques et les conséquences d'une commotion cérébrale, les athlètes affirment tout de

même qu'ils comprennent pourquoi certains individus voudraient cacher leur commotion cérébrale. Les raisons les plus évoquées d'agir ainsi sont la perte considérable de temps de jeu, la perte de positions au classement et la perception des coéquipiers (Conway *et al.*, 2018). Ces éléments sont donc à prendre en considération par les professionnels de la santé lors de la prise en charge d'un athlète ayant potentiellement subi une commotion cérébrale. Notons que dans le cadre de ce projet de recherche, les athlètes avaient reçu le diagnostic de commotion cérébrale avant d'effectuer les évaluations post-commotion cérébrale de l'étude. Ayant déjà obtenu leur diagnostic, les athlètes n'avaient aucun intérêt à cacher leur état, puisque les réponses au questionnaire n'allaient pas influencer la décision des professionnels de la santé. Cela démontre les limites de cet outil entièrement subjectif et souligne l'importance de poursuivre la prévention sur la commotion cérébrale, tant chez les athlètes, que chez les entraîneurs et les différents intervenants gravitant autour des sportifs. Ainsi, une éducation permettant de mieux comprendre la blessure tout en mettant en évidence l'effet négatif qu'elle peut avoir sur les performances sportives et par le fait même, nuire à l'équipe ainsi qu'à l'athlète lui-même s'avérerait pertinente.

7.2 Suivi de la commotion cérébrale

À la suite de l'identification de la commotion cérébrale, un suivi régulier comprenant une évaluation multimodale est également recommandé afin d'assurer une progression sécuritaire et favorable dans le protocole de retour à l'apprentissage et au

jeu (Patricios *et al.*, 2023b). Ce projet de recherche a aussi permis d'examiner le comportement de la batterie de tests spécifiques à la commotion cérébrale lors du processus de retour à l'apprentissage et au jeu des athlètes universitaires et d'évaluer la pertinence de son utilisation. A priori, les résultats ont permis d'observer une absence d'apprentissage pour l'ensemble des tests de la batterie, lorsque les performances présaisons furent comparées à celles obtenues lors de la dernière visite post-blessure (5^e visite). Les performances des athlètes à ces tests n'ont ni augmenté ni diminué de façon significative durant le processus de guérison de la commotion cérébrale. D'une part, ces résultats ne suggèrent pas la présence d'un effet d'apprentissage de la tâche. D'autre part, l'absence d'une diminution significative entre ces performances suggérait néanmoins que les altérations causées par la commotion cérébrale n'affectent pas considérablement les capacités des athlètes à réaliser des tâches en lien avec la batterie de tests spécifiques durant la période du protocole de retour au jeu. Du côté du Neurotracker, des participants furent exposés à cet outil à cinq reprises lors de leur processus de guérison. L'augmentation non significative entre les résultats présaisons et de la 5^e visite suggère que les athlètes n'améliorent pas leur performance au Neurotracker de façon significative malgré cinq expositions à la suite d'une commotion cérébrale. On ne peut donc pas affirmer que les capacités perceptivo-cognitives peuvent être entraînées de façon optimale par le Neurotracker dans un contexte de commotion cérébrale récente. Il pourrait être intéressant de réaliser des études où les participants blessés seraient exposés davantage au Neurotracker après la commotion

cérébrale afin d'observer le nombre d'expositions optimal pour un apprentissage significatif de la tâche. L'ajout d'un groupe contrôle afin de comparer les résultats serait également intéressant. Cela permettrait de déterminer si la commotion cérébrale cause réellement l'absence d'amélioration au Neurotracker. Aussi, le retour aux études et au jeu des étudiants-athlètes qui ont subi une commotion cérébrale suit un protocole dont la progression s'effectue par étapes en suivant l'évolution des symptômes (Patricios *et al.*, 2023b). En se basant sur les recommandations du protocole de retour au jeu qui mise sur l'évolution des symptômes, il est difficile de recommander l'utilisation du Neurotracker comme outil de suivi de la commotion cérébrale. Si la performance au Neurotracker n'est pas impactée négativement par les symptômes, les athlètes peuvent alors réaliser des performances supérieures aux précédentes sans pour autant avoir une amélioration ou une détérioration au niveau des symptômes et de leur intensité. La performance au Neurotracker ne peut donc pas être un indicatif d'une amélioration des symptômes de la commotion cérébrale. Toutefois, certaines personnes ayant subi une commotion cérébrale peuvent avoir de la difficulté à discerner certains symptômes, mais être tout de même impactées par ceux-ci (Harmon *et al.*, 2024). C'est ce que pourrait entre autres indiquer la comparaison entre les résultats 48-72 heures post-commotion cérébrale et à la 5^e visite post-blessure. Cette comparaison semble montrer que la commotion cérébrale pourrait avoir un effet négatif sur les gains d'apprentissage d'une tâche perceptivo-cognitive, sans pour autant être influencés par les symptômes autorapportés. Les analyses statistiques effectuées ont en effet démontré

des différences significatives uniquement au niveau de la performance au Neurotracker, entre le seuil de vitesse moyen de la 5^e visite post-commotion cérébrale et celui obtenu 48-72 heures post-commotion cérébrale. Ces résultats concordent avec ceux de Chermann et al. (2018), où la commotion cérébrale avait négativement affectée la performance au Neurotracker dans la phase aiguë de la blessure (48-72 heures post-blessure) comparativement à la performance réalisée lors du retour à la compétition. Les performances moins rapides au Neurotracker réalisées en phase aiguë de la commotion cérébrale comparativement à celles effectuées au retour au jeu pourraient être expliquées par l'effet négatif de la commotion cérébrale sur les gains d'apprentissage de la tâche perceptivo-cognitive. En effet, la commotion cérébrale pourrait altérer le processus d'apprentissage à la suite de l'impact avant de se rétablir et revenir à la normale. Les résultats d'une étude réalisée auprès d'une population pédiatrique suggèrent que les participants ayant récemment subi une commotion cérébrale ont démontré des gains d'apprentissage au Neurotracker moins rapides que les participants d'un groupe contrôle sain (Corbin-Berrigan *et al.*, 2018). Au début du processus de retour à l'apprentissage, certains individus pourraient avoir de la difficulté à augmenter la charge cognitive (Patricios *et al.*, 2023b), ce qui pourrait entre autres expliquer cet apprentissage moins rapide au Neurotracker. Après une exposition répétée au Neurotracker, les athlètes universitaires ont montré une amélioration au niveau de leur performance au fil du temps, entre leur blessure et leur dernière visite post-commotion cérébrale, ce qui coïncide également avec une autre étude effectuée

auprès d'enfants qui ont subi une commotion cérébrale (Corbin-Berrigan *et al.*, 2020). Cette progression concorderait avec les étapes du protocole de retour à l'apprentissage, où l'augmentation progressive de la charge cognitive au fil du temps est tolérée par les personnes blessées (Patricios *et al.*, 2023b). De plus, les étudiants-athlètes effectuent généralement un retour complet à l'apprentissage au 10^e jour post-commotion cérébrale (Putukian *et al.*, 2023). En tenant compte de cette statistique et considérant que le nombre moyen de jours entre la blessure et la 5^e visite est de $15,17 \pm 2,48$ jours chez les participants de ce projet de recherche, il est possible de croire que le processus de guérison des athlètes fût suffisamment avancé pour permettre des gains d'apprentissage significatifs. Dans une perspective où les capacités perceptivo-cognitives ne peuvent être entraînées de façon optimale à la suite d'une commotion cérébrale, ces résultats suggèrent tout de même un certain gain d'apprentissage avec l'exposition répétée au Neurotracker. Ainsi, cet outil pourrait potentiellement permettre un suivi au niveau des capacités perceptivo-cognitives dans le processus de guérison des athlètes. Dans de futures études, il serait intéressant d'explorer davantage les effets de la commotion cérébrale sur les mécanismes d'apprentissage et l'entraînement de certaines fonctions cognitives. L'intégration du Neurotracker dans ce type d'études pourrait aussi permettre d'étudier l'efficacité de cet outil dans la prise en charge de la blessure tout au long du processus de retour à l'apprentissage et au jeu. Ces projets pourraient être pertinents afin de connaître le moment auquel l'athlète est en mesure d'améliorer considérablement ses performances cognitives et de reprendre les activités scolaires

sans restriction ainsi que l'entraînement complet avec une intensité de compétition. Cela permettrait également de s'assurer que l'athlète est dans un état cognitif optimal afin de performer au meilleur de ses capacités.

Bien que la disparition complète des symptômes, des déficits cognitifs et des présentations cliniques de la commotion cérébrale soit habituellement prise en considération pour le retour à la compétition sportive, l'aspect psychologique est un élément qui doit être sérieusement considéré dans le processus de guérison (Crofts *et al.*, 2024 ; van Ierssel *et al.*, 2022). À la suite d'une blessure musculosquelettique, le moment où une personne est physiquement rétablie ne coïncide pas nécessairement avec celui où elle se sent psychologiquement prête à retourner au sport (Podlog *et al.*, 2015). Il est d'ailleurs suggéré que cette situation pourrait également survenir chez les personnes ayant subi une commotion cérébrale (Crofts *et al.*, 2024). Cette hypothèse est supportée par ce projet de recherche, dont les résultats ont permis d'observer chez les athlètes un sentiment d'efficacité personnelle significativement inférieur 48 à 72 heures post-commotion cérébrale et lors de leur retour au jeu comparativement à celui observé en présaison. Ces résultats sont fort intéressants puisqu'ils démontrent que les athlètes ne se sentent pas prêts à performer au même niveau qu'avant leur blessure malgré l'autorisation des professionnels de la santé. Les résultats obtenus pour le questionnaire d'efficacité personnelle sont possiblement les plus importants de l'étude, puisque les scores à la 5^e visite post-commotion cérébrale des deux parties du

questionnaire se sont avérés significativement inférieurs aux scores présaisons. Les athlètes n’avaient donc pas le sentiment d’avoir les capacités nécessaires pour réaliser des tâches sportives sans rencontrer de problèmes spécifiques à la commotion cérébrale, par exemple réagir rapidement pendant les activités sportives, et d’avoir les capacités nécessaires pour bien performer dans leur sport. Les déficits causés par la commotion cérébrale n’occasionnent pas seulement une diminution des performances physiques ou cognitives. Cette blessure peut également avoir un impact psychologique chez les athlètes menant notamment à une diminution du sentiment d’efficacité personnelle (Arderne *et al.*, 2013 ; Glazer, 2009 ; Heil, 1993). En conséquence, des facteurs émotionnels tels que le sentiment de ne pas être capable de performer au même niveau qu’avant la blessure ou la peur de se blesser à nouveau peuvent augmenter le risque de blessures (Paterno *et al.*, 2018). Le côté psychologique et la santé mentale sont d’ailleurs des sujets de plus en plus évoqués et étudiés par les experts du domaine des commotions cérébrales. De nombreux athlètes ayant subi une commotion cérébrale souffrent d’anxiété (van Ierssel *et al.*, 2022) et cette condition pourrait être en lien avec la perte de confiance des athlètes en leurs capacités de performer au niveau de certaines attentes (Forsdyke *et al.*, 2016). De plus, une revue systématique suggère que les troubles psychologiques rencontrés par les athlètes qui ont subi une commotion cérébrale pourraient persister au-delà de la résorption des symptômes et des signes cliniques (Kamins *et al.*, 2017). Le questionnaire d’efficacité personnelle est la seule évaluation de la présente étude dont les résultats sont significativement différents au

retour au jeu comparativement aux résultats en présaison. Ces résultats sont très intéressants, car malgré le fait que les participants ont réalisé, lors la 5^e visite post-commotion cérébrale, des performances similaires ou supérieures aux performances présaisons à toutes les évaluations cliniques et au Neurotracker, les athlètes ont tout de même démontré un faible sentiment d'efficacité personnelle en contexte sportif. Ces résultats suggèrent donc que même s'ils ont obtenu l'autorisation médicale d'un retour au jeu complet, les athlètes ne semblent pas se sentir prêts à retourner à la compétition. Il peut être supposé que l'absence de résultats objectifs fiables et la nature invisible de la commotion cérébrale pourraient jouer un rôle au niveau du sentiment d'efficacité personnelle. En n'ayant aucun repère précis sur leur condition, les athlètes pourraient avoir de la difficulté à évaluer concrètement leurs propres capacités. La cinquième étape du protocole de retour au jeu consiste à retourner à l'entraînement complet, avec contacts lorsqu'applicable, et a pour objectif de permettre à l'athlète de retrouver confiance et aux entraîneurs d'évaluer les habiletés sportives de l'athlète (Patricios *et al.*, 2023b). À la lumière des résultats observés, il pourrait être supposé que cette étape du protocole s'avère trop courte pour certaines personnes et que leur retour complet à la compétition sportive pourrait être retardé. Il serait intéressant d'étudier lors de cette étape une évaluation comprenant des mesures objectives des performances spécifiques au sport, en situation de match réelle et effectuée dans un environnement contrôlé conjointement au questionnaire d'efficacité personnelle. Cela permettrait aux différents intervenants d'obtenir un portrait plus précis de l'état de l'athlète et aux athlètes de

mieux comprendre leur progression tout en voyant une amélioration concrète en situation de compétition. Aussi, une étude suggère que le soutien social offert par l'équipe médicale, les entraîneurs et les proches de la personne blessée aurait un impact positif durant la période de guérison de la commotion cérébrale (Jewell *et al.*, 2024). En effet, des athlètes ayant subi une commotion cérébrale rapportent que le soutien social obtenu fut plus profitable que la réduction de leurs symptômes afin d'améliorer leur sentiment d'efficacité personnelle, notamment lorsque leurs progrès furent soulignés (Jewell *et al.*, 2024). Ainsi, cette étude supporte la littérature mentionnant que les facteurs psychologiques devraient être inclus dans les évaluations du protocole de retour au jeu à la suite d'une commotion cérébrale tout au long du processus (Arden *et al.*, 2013 ; Crofts *et al.*, 2024 ; Patricios *et al.*, 2023b).

7.3 Différences entre les sexes biologiques

Il est de plus en plus reconnu dans la littérature que la commotion cérébrale affecte différemment les hommes et les femmes (Haynes et Goodwin, 2023). Cependant, les différences entre les sexes biologiques demeurent incomprises et parfois contradictoires en raison de la sous-représentation des femmes dans les études portant sur la commotion cérébrale (Haynes et Goodwin, 2023 ; Patricios *et al.*, 2023b). Dans cette perspective, les observations de ce projet de recherche ont également permis d'analyser les différences entre les sexes biologiques au niveau des résultats obtenus lors de la batterie de tests. En effet, certaines analyses statistiques se sont avérées

significatives uniquement chez les athlètes féminines et d'autres seulement du côté des athlètes masculins. Ces observations statistiques peuvent signifier que la commotion cérébrale aurait un effet différent chez les femmes et les hommes. Physiologiquement, les hommes semblent présenter une plus grande réduction du débit sanguin cérébral que les femmes à la suite d'une commotion cérébrale (Churchill *et al.*, 2021). Ce déficit en apport sanguin au niveau du cerveau semble affecter davantage les fonctions cognitives (Ogoh, 2017 ; Ware *et al.*, 2020), ce qui pourrait expliquer la différence observée au niveau des performances au Neurotracker entre les deux sexes biologiques. Il peut être supposé que cet apport sanguin réduit chez les hommes pourrait altérer leurs fonctions cognitives permettant de réaliser une tâche perceptivo-cognitive lors de la phase aiguë de la commotion cérébrale. Au fil du temps, le débit sanguin retrouverait peu à peu sa normalité pour permettre des gains d'apprentissage au Neurotracker. De plus, les hommes semblent avoir des troubles de la mémoire et des problèmes de concentration plus importants ainsi qu'un plus grand taux de sentiment d'être dans le brouillard (*fogginess*) (Barker *et al.*, 2017). En contrepartie, les femmes auraient davantage de dysfonctions au niveau de l'apprentissage une semaine après la commotion cérébrale (Wasserman *et al.*, 2016). Les gains d'apprentissage pour une tâche donnée pourraient donc être plus limités chez les femmes, ce qui expliquerait l'absence d'une amélioration significative au niveau de leurs performances au Neurotracker entre l'évaluation 48-72 heures post-commotion cérébrale et de la 5^e visite. En outre, les femmes sembleraient avoir une altération plus importante des

fonctions exécutives, un temps de récupération plus long, un plus grand risque de dépression et un plus grand nombre ainsi qu'une plus grande sévérité de symptômes post-commotion cérébrale (Bunt *et al.*, 2022 ; Gallagher *et al.*, 2018 ; Sicard *et al.*, 2018 ; Singh *et al.*, 2018). D'ailleurs, d'après ce qui fut observé dans cette étude, l'intensité des symptômes pourrait notamment influencer la perception des athlètes féminines quant à leurs capacités d'effectuer une tâche sportive. Les participantes ayant rapporté une intensité élevée des symptômes semblent avoir un niveau de confiance plus faible quant à réaliser une activité physique sans l'exacerbation des symptômes, la peur de se blesser à nouveau ou sans être en mesure de performer normalement sans rencontrer de problèmes liés à la commotion cérébrale. En contrepartie, contrairement à ce qui est observé dans la littérature quant au nombre de symptômes (Bunt *et al.*, 2022), ce sont les participants masculins de la présente étude qui ont indiqué avoir ressenti davantage de symptômes à la suite de leur commotion cérébrale. Ce résultat est plutôt surprenant puisqu'il est rapporté que les femmes seraient plus honnêtes lorsqu'elle mentionne leurs symptômes et qu'elles seraient davantage préoccupées par leur santé que les hommes (Covassin et Elbin, 2011 ; Dick, 2009). Ainsi, ces résultats appuient l'idée que plusieurs différences existent entre les femmes et les hommes ayant subi une commotion cérébrale et qu'elles demeurent contradictoires (Churchill *et al.*, 2021 ; Haynes et Goodwin, 2023). Il y a donc une nécessité d'explorer davantage ces différences et de réaliser un plus grand nombre d'études auprès de populations féminines (Haynes et Goodwin, 2023 ; Patricios *et al.*, 2023b).

7.4 Limitations

Les résultats de ce projet de recherche doivent être considérés en fonction de leurs limitations. Au cours de cette étude, la médication pour un trouble du déficit d'attention avec/sans hyperactivité (TDAH) ne fut pas contrôlée, tout comme les heures de sommeil. En ne contrôlant pas la médication pour un TDAH, les participants pouvaient effectuer les évaluations présaisons en ayant ou pas pris leur médicament et effectuer les évaluations post-commotion cérébrale dans une condition différente. Cela pourrait avoir un impact sur les résultats et biaiser les comparaisons. Aussi, la fatigue due à un manque de sommeil pourrait avoir un impact sur les performances des participants lors des évaluations. Le faible taux d'attrition des participants est une autre limite à ce projet. Ce dernier pourrait influencer les résultats de l'étude et par le fait même, la représentativité de la population étudiée, c'est-à-dire les athlètes universitaires. Durant la phase post-commotion cérébrale, un total de 13 participants ont cessé de se présenter entre les 2^e et 5^e visites post-blessure. Certains de ces abandons pourraient s'expliquer par la fin des saisons sportives des athlètes, moment où la nécessité ou la motivation de poursuivre le processus d'évaluations auraient pu se dissiper. Il serait donc intéressant de se questionner si le taux d'attrition pourrait avoir un impact sur les faibles résultats obtenus lors de cette étude. Cependant, malgré ces limitations, les résultats de cette étude devraient tout de même être pris en considération. Le devis pré-post-commotion cérébrale était une des forces de l'étude. La bonne communication entre l'équipe médicale et l'équipe de recherche a permis

d'effectuer un bon suivi des participants blessés. La plupart des athlètes ayant subi une commotion cérébrale ont pu être évalués dans la phase aiguë de la commotion cérébrale, c'est-à-dire 48 à 72 heures après la blessure.

7.5 Perspectives

Ce projet de recherche est, à notre connaissance, le premier à observer l'effet de la commotion cérébrale sur les performances au Neurotracker dans sa phase aiguë chez des athlètes universitaires à partir de mesures de références effectuées en présaison. Les résultats ainsi que la méthodologie de cette étude pourront donc être utilisés à des fins de comparaisons pour d'autres études ultérieures. Comme le démontrent les résultats de cette étude, son efficacité quant à l'identification et au suivi de la commotion cérébrale demeure incertaine. De plus, le Neurotracker est un outil qui n'est pas nécessairement accessible à toute la population en raison de son coût relativement élevé et son utilisation requiert des mesures de références qui doivent être prises avant la blessure. Néanmoins, son utilisation clinique serait envisageable auprès d'athlètes encadrés par une organisation, comme les équipes sportives universitaires. Bien que son utilisation comme outil de prise en charge de la commotion cérébrale soit mitigée, le Neurotracker peut tout de même être utilisé comme outil d'entraînement cognitif sécuritaire pour un athlète ayant subi une commotion cérébrale. Cela permettrait aux athlètes de rester actifs et stimulés dès les premières étapes du protocole de retour au jeu, tout en demeurant dans l'entourage de leur équipe. Afin d'appuyer

son usage clinique, d'autres projets de recherches seraient pertinents pour étudier davantage cet outil qui avait tout de même démontré un certain potentiel dans des études antérieures.

Pour ce qui est des autres tests de la batterie spécifiques à la commotion cérébrale, les résultats obtenus lors de l'évaluation de l'efficacité personnelle démontrent que l'aspect psychologique ne doit pas être négligé dans le contexte d'une commotion cérébrale. Dans une approche où l'on vise la sécurité des athlètes avant tout, les avancées scientifiques doivent mener vers un protocole de prise en charge de la commotion cérébrale plus complet. Le côté psychologique doit être davantage mis de l'avant dans de futures études sur les commotions cérébrales.

De plus, les différences entre les hommes et les femmes mises en évidence dans cette étude démontrent que les femmes doivent être davantage incluses dans les études sur les commotions cérébrales (Churchill *et al.*, 2021 ; Haynes et Goodwin, 2023 ; Patricios *et al.*, 2023b). Bien que les différences physiologiques entre les sexes biologiques soient de plus en plus documentées, les femmes demeurent sous-représentées dans la littérature. Les établissements universitaires sont d'excellents endroits pour favoriser le recrutement de participantes en raison de leur présence considérable dans les équipes sportives universitaires. De futures recherches s'intéressant aux commotions cérébrales chez les étudiantes-athlètes seraient

pertinentes afin d'approfondir les connaissances sur les différences entre les sexes biologiques.

Le besoin d'un outil d'évaluation objective pour la commotion cérébrale demeure un des problèmes les plus importants auxquels les intervenants dans le milieu sportif font face. Outre les tests présentés dans ce mémoire, d'autres approches telles que l'imagerie par résonnance magnétique (IRM) de diffusion, l'IRM fonctionnelle (IRMf) ainsi que certains biomarqueurs sanguins semblent être prometteuses, mais nécessitent d'être explorées davantage (Patricios *et al.*, 2023b ; Tabor *et al.*, 2023).

CHAPITRE 8

Conclusion

À la lumière des résultats observés lors de ce projet de recherche, il pourrait être pertinent d'entreprendre une réflexion sur l'utilisation scientifique et clinique de cette batterie de tests en contexte d'identification et de suivi de la commotion cérébrale. Ce projet de recherche a permis d'apporter quelques conclusions en ce sens et confirme la nécessité d'un outil d'évaluation objectif efficace pour cette blessure complexe. Puisque la commotion cérébrale ainsi que ses symptômes n'ont aucun effet significatif sur la performance des athlètes au Neurotracker, son utilisation clinique comme outil d'évaluation objectif afin d'identifier des déficits au niveau des capacités perceptivo-cognitives dans la phase aiguë de la blessure ne peut être recommandée. Toutefois, les résultats supposant une augmentation des gains d'apprentissage durant le suivi de la blessure laissent entrevoir la possibilité d'utiliser cet outil pour le suivi des capacités perceptivo-cognitives à la suite d'une commotion cérébrale. De futures études seraient intéressantes afin d'étudier son potentiel en tant qu'outil complémentaire à une batterie de tests cliniques. Concernant le questionnaire d'efficacité personnelle, ce dernier est le seul test dont les scores obtenus à la 5^e visite post-commotion cérébrale demeurent significativement inférieurs aux scores présaisons. Par conséquent, l'évaluation de la perception des athlètes quant à leurs compétences sportives et à leurs capacités d'accomplir des tâches en contexte sportif sans rencontrer de problèmes liés à la commotion cérébrale semble être particulièrement pertinente. De plus, ce mémoire met en évidence certaines différences entre les sexes biologiques et la nécessité d'inclure davantage les femmes dans les études portant sur la commotion cérébrale.

Références

- Abeare, C. A., Hurtubise, J. L., Cutler, L., Sirianni, C., Brantuo, M., Makhzoum, N. et Erdodi, L. A. (2021). Introducing a forced choice recognition trial to the Hopkins Verbal Learning Test - Revised. *The Clinical Neuropsychologist (Neuropsychology, Development and Cognition: Sec*, 35(8), 1442-1470. <https://doi.org/10.1080/13854046.2020.1779348>
- Acquin, J.-M., Desjardins, Y., Deschamps, A., Fallu, É., Fait, P. et Corbin-Berrigan, L.-A. (2024). Impact of biological sex, concussion history and sport on baseline NeuroTracker performance in university varsity athletes. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1372350>
- Alsalaheen, B., Stockdale, K., Pechumer, D. et Broglio, S. P. (2016). Validity of the Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT). *Sports Medicine*, 46(10), 1487-1501. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0532-y>
- Arden, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A. et Webster, K. E. (2013). A systematic review of the psychological factors associated with returning to sport following injury. *British Journal of Sports Medicine*, 47(17), 1120-1126. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091203>
- Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action: A social cognitive theory*. Prentice-Hall, Inc.
- Barker, T., Russo, S. A., Barker, G., Rice, M. A., Jeffrey, M. G., Broderick, G. et Craddock, T. J. A. (2017). A case matched study examining the reliability of using ImPACT to assess effects of multiple concussions. *BMC Psychology*, 5, 14. <https://doi.org/10.1186/s40359-017-0184-1>
- Bell, D. R., Guskiewicz, K. M., Clark, M. A. et Padua, D. A. (2011). Systematic Review of the Balance Error Scoring System. *Sports Health*, 3(3), 287-295. <https://doi.org/10.1177/1941738111403122>
- Broglio, S. P., Ferrara, M. S., Piland, S. G. et Anderson, R. B. (2006). Concussion history is not a predictor of computerised neurocognitive performance. *British Journal of Sports Medicine*, 40(9), 802-805. <https://doi.org/10.1136/bjism.2006.028019>

- Bunt, S. C., Didehbani, N., LoBue, C., Stokes, M., Heinzelmann, M., Rossetti, H., Miller, S. M., Nakonezny, P. A., Bell, K., Batjer, H. et Cullum, C. M. (2022). Sex differences in reporting of concussion symptoms in adults. *The Clinical Neuropsychologist*, 36(6), 1290-1303. <https://doi.org/10.1080/13854046.2020.1842500>
- Burk, J. M., Munkasy, B. A., Joyner, A. B. et Buckley, T. A. (2013). Balance error scoring system performance changes after a competitive athletic season. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 23(4), 312-7. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e318285633f>
- Catena, R. D., Van Donkelaar, P., Halterman, C. I. et Chou, L.-S. (2009). Spatial orientation of attention and obstacle avoidance following concussion. *Experimental Brain Research*, 194(1), 67-77. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1669-1>
- Cavanagh, P. et Alvarez, G. A. (2005). Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 349-354. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.009>
- Chandran, A., Boltz, A. J., Morris, S. N., Robison, H. J., Nedimyer, A. K., Collins, C. L. et Register-Mihalik, J. K. (2022). Epidemiology of Concussions in National Collegiate Athletic Association (NCAA) Sports: 2014/15-2018/19. *The American Journal of Sports Medicine*, 50(2), 526-536. <https://doi.org/10.1177/03635465211060340>
- Chermann, J.-F., Romeas, T., Marty, F. et Faubert, J. (2018). Perceptual-cognitive three-dimensional multiple-object tracking task can help the monitoring of sport-related concussion. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 4(1), e000384. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2018-000384>
- Churchill, N. W., Hutchison, M. G., Graham, S. J. et Schweizer, T. A. (2021). Sex differences in acute and long-term brain recovery after concussion. *Human Brain Mapping*, 42(18), 5814-5826. <https://doi.org/10.1002/hbm.25591>
- Conway, F. N., Domingues, M., Monaco, R., Lesnewich, L. M., Ray, A. E., Alderman, B. L., Todaro, S. M. et Buckman, J. F. (2018). Concussion Symptom Underreporting Among Incoming National Collegiate Athletic Association Division I College Athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine, Publish Ahead of*(3), 203-209. <https://doi.org/10.1097/jsm.0000000000000557>

- Corbin-Berrigan, L.-A., Faubert, J. et Gagnon, I. (2020). Neurotracker as a potential mean of active rehabilitation in children with atypical mild traumatic brain injury recovery: A pilot safety study. *Translational Sports Medicine*, 3(3), 235-242. <https://doi.org/10.1002/tsm2.132>
- Corbin-Berrigan, L.-A., Kowalski, K., Faubert, J., Christie, B. et Gagnon, I. (2018). Three-dimensional multiple object tracking in the pediatric population: The NeuroTracker and its promising role in the management of mild traumatic brain injury. *NeuroReport*, 29, 1. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000000988>
- Corbin-Berrigan, L.-A., Kowalski, K., Faubert, J., Christie, B. et Gagnon, I. (2020). Could Neurotracker be used as a clinical marker of recovery following pediatric mild traumatic brain injury? An exploratory study. *Brain Injury*, 34, 1-5. <https://doi.org/10.1080/02699052.2020.1723699>
- Covassin, T. et Elbin, R. J. (2011). The female athlete: the role of gender in the assessment and management of sport-related concussion. *Clinics in Sports Medicine*, 30(1), 125-131, x. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2010.08.001>
- Crofts, R., Morris, A. J., Quammen, D. L., Petersell, T. L., Liebel, S. W., Podlog, L. et Fino, P. C. (2024). Confidence to Return to Play After Concussion. *Journal of sport rehabilitation*, 1-7. <https://doi.org/10.1123/jsr.2023-0383>
- Del Rossi, G. (2017). Evaluating the Recovery Curve for Clinically Assessed Reaction Time After Concussion. *J Athl Train*, 52(8), 766-770. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.6.02>
- Del Rossi, G., Malaguti, A. et Rossi, S. D. (2014). Practice Effects Associated With Repeated Assessment of a Clinical Test of Reaction Time. *Journal of Athletic Training*, 49(3), 356. <https://doi.org/10.4085/1062-6059-49.2.04>
- Deschamps, A., Giguère-Lemieux, É., Fait, P. et Corbin-Berrigan, L.-A. (2022). Test–retest reliability of the neurotracker compared to the impact test for the management of mild traumatic brain injuries during two consecutive university sport seasons. *Brain Injury*, 36(8), 977-984. <https://doi.org/10.1080/02699052.2022.2109738>
- Dessy, A. M., Yuk, F. J., Maniya, A. Y., Gometz, A., Rasouli, J. J., Lovell, M. R. et Choudhri, T. F. (2017). Review of Assessment Scales for Diagnosing and Monitoring Sports-related Concussion. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.1922>

- Dick, R. W. (2009). Is there a gender difference in concussion incidence and outcomes? *British Journal of Sports Medicine*, 43(Suppl 1), i46-i50. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.058172>
- Dobney, D. M., Thomas, S. G., Taha, T. et Keightley, M. (2018). Physiological and Performance Measures for Baseline Concussion Assessment. *Journal of Sport Rehabilitation*, 27(4), 312-318. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0038>
- Eckner, J. T., Kutcher, J. S., Broglio, S. P. et Richardson, J. K. (2014). Effect of Sport Related Concussion on Clinically Measured Simple Reaction Time. *British journal of sports medicine*, 48(2), 10.1136/bjsports-2012-091579. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091579>
- Eckner, J. T., Lipps, D. B., Kim, H., Richardson, J. K. et Ashton-Miller, J. A. (2011). Can a Clinical Test of Reaction Time Predict a Functional Head-Protective Response? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(3), 382-387. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181f1cc51>
- Eckner, J. T., Whitacre, R. D., Kirsch, N. L. et Richardson, J. K. (2009). Evaluating a clinical measure of reaction time: an observational study. *Perceptual and Motor Skills*, 108(3), 717-720. <https://doi.org/10.2466/PMS.108.3.717-720>
- Fait, P., McFadyen, B. J., Swaine, B. et Cantin, J. F. (2009). Alterations to locomotor navigation in a complex environment at 7 and 30 days following a concussion in an elite athlete. *Brain Injury*, 23(4), 362-369. <https://doi.org/10.1080/02699050902788485>
- Faubert, J. (2013). Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific Reports*, 3, 1154. <https://doi.org/10.1038/srep01154>
- Faubert, J. et Sidebottom, L. (2012). Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 6(1), 85-102. <https://doi.org/10.1123/jcsp.6.1.85>
- Fehd, H. M. et Seiffert, A. E. (2010). Looking at the center of the targets helps multiple object tracking. *Journal of Vision*, 10(4), 19. <https://doi.org/10.1167/10.4.19>
- Finnoff, J. T., Peterson, V. J., Hollman, J. H. et Smith, J. (2009). Intrarater and Interrater Reliability of the Balance Error Scoring System (BESS). *PM&R*, 1(1), 50-54. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2008.06.002>

- Fleddermann, M.-T., Heppe, H. et Zentgraf, K. (2019). Off-Court Generic Perceptual-Cognitive Training in Elite Volleyball Athletes: Task-Specific Effects and Levels of Transfer. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01599>
- Ford, J., Ildefonso, K., Jones, M. et Arvinen-Barrow, M. (2017). Sport-related anxiety: current insights. *Open Access Journal of Sports Medicine, Volume 8*, 205-212. <https://doi.org/10.2147/oajsm.s125845>
- Forsdyke, D., Smith, A., Jones, M. et Gledhill, A. (2016). Psychosocial factors associated with outcomes of sports injury rehabilitation in competitive athletes: a mixed studies systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 50(9), 537-544. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094850>
- Gagnon, I., Swaine, B., Friedman, D. et Forget, R. (2005). Exploring children's self-efficacy related to physical activity performance after a mild traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 20(5), 436-449. <https://doi.org/10.1097/00001199-200509000-00005>
- Gallagher, V., Kramer, N., Abbott, K., Alexander, J., Breiter, H., Herrold, A., Lindley, T., Mjaanes, J. et Reilly, J. (2018). The Effects of Sex Differences and Hormonal Contraception on Outcomes after Collegiate Sports-Related Concussion. *Journal of Neurotrauma*, 35(11), 1242-1247. <https://doi.org/10.1089/neu.2017.5453>
- Gaudet, C. E. et Weyandt, L. L. (2017). Immediate Post-Concussion and Cognitive Testing (ImPACT): a systematic review of the prevalence and assessment of invalid performance. *The Clinical Neuropsychologist*, 31(1), 43-58. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1220622>
- Glazer, D. D. (2009). Development and Preliminary Validation of the Injury-Psychological Readiness to Return to Sport (I-PRRS) Scale. *Journal of Athletic Training*, 44(2), 185-189.
- Goulart, J. B., Aitken, L. S., Siddiqui, S., Cuevas, M., Cardenas, J., Beathard, K. M. et Riechman, S. E. (2023). Nutrition, lifestyle, and cognitive performance in esport athletes. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1120303>
- Gouvernement du Canada. (2018). *Commotions cérébrales et autres traumatismes crâniens attribuables aux activités sportives et récréatives chez les enfants et les jeunes canadiens*.

- Gouvernement du Canada, S. C. (2023, 21 juin). *Commotions cérébrales autodéclarées au Canada : une étude transversale*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/82-003-x/2023006/article/00002-fra.htm>
- Gouvernement du Québec. (2022). *Traumatismes craniocérébraux, incluant les commotions cérébrales, subis au moment de la pratique d'activités récréatives et sportives au Québec - Analyses secondaires de données*, 34.
- Guskiewicz, K. M. (2011). Balance Assessment in the Management of Sport-Related Concussion. *Clinics in Sports Medicine*, 30(1), 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2010.09.004>
- Guskiewicz, K. M., Ross, S. E. et Marshall, S. W. (2001). Postural Stability and Neuropsychological Deficits After Concussion in Collegiate Athletes. *J Athl Train*, 36(3), 263-273.
- Harmon, K. G., Whelan, B. M., Aukerman, D. F., Hwang, C. E., Poddar, S. K., DeLeo, A., Elkington, H. A., Garruppo, G., Holliday, M. et Bruce, J. M. (2024). Diagnosis of Sports-Related Concussion Using Symptom Report or Standardized Assessment of Concussion. *JAMA Network Open*, 7(6), e2416223. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.16223>
- Haynes, N. et Goodwin, T. (2023). Literature Review of Sex Differences in mTBI. *Military Medicine*, 188(5-6), e978-e984. <https://doi.org/10.1093/milmed/usab472>
- Heil, J. (1993). *Psychology of sport injury* (p. xiv, 338). Human Kinetics Publishers.
- ImPACT Applications, Inc. Administration and Interpretation Manual | ImPACT Version 4. <https://impacttest.com/manual/administration-and-scoring-of-impact-version-4/impact-version-4-invalidity-indicators/> 7 mars 2021.
- Jackson, W. T. et Starling, A. J. (2019). Concussion Evaluation and Management. *Medical Clinics of North America*, 103(2), 251-261. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2018.10.005>
- Jewell, C. B., Caron, J. G., Pope, J. P. et Rathwell, S. (2024). *The Role of Social Support in Concussion Rehabilitation: A Prospective Mixed Methods Study of Canadian University Athletes' Return to Sport*. <https://doi.org/10.1123/jsr.2024-0002>

- Kamins, J., Bigler, E., Covassin, T., Henry, L., Kemp, S., Leddy, J. J., Mayer, A., McCrea, M., Prins, M., Schneider, K. J., Valovich Mcleod, T. C., Zemek, R. et Giza, C. C. (2017). What is the physiological time to recovery after concussion? A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 51(12), 935-940. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097464>
- Kontos, A. P., Jorgensen-Wagers, K., Trbovich, A. M., Ernst, N., Emami, K., Gillie, B., French, J., Holland, C., Elbin, R. J. et Collins, M. W. (2020). Association of Time Since Injury to the First Clinic Visit With Recovery Following Concussion. *JAMA Neurology*, 77(4), 435-440. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2019.4552>
- Legault, I., Allard, R. et Faubert, J. (2013). Healthy Older Observers Show Equivalent Perceptual-Cognitive Training Benefits to Young Adults for Multiple Object Tracking. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00323>
- Lempke, L. B., Howell, D. R., Eckner, J. T. et Lynall, R. C. (2020). Examination of Reaction Time Deficits Following Concussion: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(7), 1341-1359. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01281-0>
- Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49, Suppl 2:467+. <https://doi.org/10.1121/1.1912375>
- Liu, H. J., Zhang, Q., Chen, S., Zhang, Y. et Li, J. (2024). A meta-analysis of performance advantages on athletes in multiple object tracking tasks. *Scientific Reports*, 14(1), 20086. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70793-w>
- Lovell, Mark. R. et Solomon, G. S. (2013). Neurocognitive Test Performance and Symptom Reporting in Cheerleaders with Concussions. *The Journal of Pediatrics*, 163(4), 1192-1195.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2013.05.061>
- Lysenko-Martin, M. R., Hutton, C. P., Sparks, T., Snowden, T. et Christie, B. R. (2020). Multiple Object Tracking Scores Predict Post-Concussion Status Years after Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurotrauma*, 37(16), 1777-1787. <https://doi.org/10.1089/neu.2019.6842>
- Makdissi, M., Davis, G. et McCrory, P. (2015). Clinical challenges in the diagnosis and assessment of sports-related concussion. *Neurology: Clinical Practice*, 5(1), 2-5. <https://doi.org/10.1212/cpj.0000000000000061>

- Maroon, J. C., Lovell, M. R., Norwig, J., Podell, K., Powell, J. W. et Hartl, R. (2000). Cerebral concussion in athletes: evaluation and neuropsychological testing. *Neurosurgery*, 47(3), 659-669; discussion 669-672. <https://doi.org/10.1097/00006123-200009000-00027>
- Marteniuk, R. G. (1976). *Information processing in motor skills*. Holt, Rinehart and Winston.
- Mathias, J. L., Beall, J. A. et Bigler, E. D. (2004). Neuropsychological and information processing deficits following mild traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(2), 286-297. <https://doi.org/10.1017/s1355617704102117>
- McCrea, M., Broglio, S., McAllister, T., Zhou, W., Zhao, S., Katz, B., Kudela, M., Harezlak, J., Nelson, L., Meier, T., Marshall, S. W. et Guskiewicz, K. M. (2020). Return to play and risk of repeat concussion in collegiate football players: comparative analysis from the NCAA Concussion Study (1999–2001) and CARE Consortium (2014–2017). *British Journal of Sports Medicine*, 54(2), 102-109. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-100579>
- McCrea, M., Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Barr, W., Randolph, C., Cantu, R. C., Onate, J. A., Yang, J. et Kelly, J. P. (2003). Acute Effects and Recovery Time Following Concussion in Collegiate Football Players. *JAMA*, 290(19), 2556. <https://doi.org/10.1001/jama.290.19.2556>
- McCrea, M., Guskiewicz, K., Randolph, C., Barr, W. B., Hammeke, T. A., Marshall, S. W., Powell, M. R., Woo Ahn, K., Wang, Y. et Kelly, J. P. (2013). Incidence, Clinical Course, and Predictors of Prolonged Recovery Time Following Sport-Related Concussion in High School and College Athletes. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 19(1), 22-33. <https://doi.org/10.1017/s1355617712000872>
- McInnes, K., Friesen, C. L., Mackenzie, D. E., Westwood, D. A. et Boe, S. G. (2017). Mild Traumatic Brain Injury (mTBI) and chronic cognitive impairment: A scoping review. *PLOS ONE*, 12(4), e0174847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174847>
- Meier, T. B., Brummel, B. J., Singh, R., Nerio, C. J., Polanski, D. W. et Bellgowan, P. S. F. (2015). The underreporting of self-reported symptoms following sports-related concussion. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(5), 507-511. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.008>

- Messa, I., Korcsog, K. et Abeare, C. (2022). An updated review of the prevalence of invalid performance on the Immediate Post-Concussion and Cognitive Testing (ImPACT). *The Clinical Neuropsychologist*, 36(7), 1613-1636. <https://doi.org/10.1080/13854046.2020.1866676>
- Michaels, J., Chaumillon, R., Nguyen-Tri, D., Watanabe, D., Hirsch, P., Bellavance, F., Giraudet, G., Bernardin, D. et Faubert, J. (2017). Driving simulator scenarios and measures to faithfully evaluate risky driving behavior: A comparative study of different driver age groups. *PLoS ONE*, 12(10), e0185909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185909>
- Murray, N. G., Szekely, B., Islas, A., Munkasy, B., Gore, R., Berryhill, M. et Reed-Jones, R. J. (2020). Smooth Pursuit and Saccades after Sport-Related Concussion. *Journal of Neurotrauma*, 37(2), 340-346. <https://doi.org/10.1089/neu.2019.6595>
- Ogoh, S. (2017). Relationship between cognitive function and regulation of cerebral blood flow. *The Journal of Physiological Sciences : JPS*, 67(3), 345-351. <https://doi.org/10.1007/s12576-017-0525-0>
- Parsons, B., Magill, T., Boucher, A., Zhang, M., Zogbo, K., Bérubé, S., Scheffer, O., Beauregard, M. et Faubert, J. (2016). Enhancing Cognitive Function Using Perceptual-Cognitive Training. *Clinical EEG and Neuroscience*, 47(1), 37-47. <https://doi.org/10.1177/1550059414563746>
- Paterno, M. V., Flynn, K., Thomas, S. et Schmitt, L. C. (2018). Self-Reported Fear Predicts Functional Performance and Second ACL Injury After ACL Reconstruction and Return to Sport: A Pilot Study. *Sports Health*, 10(3), 228-233. <https://doi.org/10.1177/1941738117745806>
- Patricios, J. S., Schneider, G. M., Van Ierssel, J., Purcell, L. K., Davis, G. A., Echemendia, R. J., Fremont, P., Fuller, G. W., Herring, S. A., Harmon, K. G., Holte, K., Loosemore, M., Makdissi, M., McCrea, M., Meehan, W. P., O'Halloran, P., Premji, Z., Putukian, M., Shill, I. J., ... Schneider, K. J. (2023a). Beyond acute concussion assessment to office management: a systematic review informing the development of a Sport Concussion Office Assessment Tool (SCOAT6) for adults and children. *British Journal of Sports Medicine*, 57(11), 737-748. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106897>

- Patricios, J. S., Schneider, K. J., Dvorak, J., Ahmed, O. H., Blauwet, C., Cantu, R. C., Davis, G. A., Echemendia, R. J., Makdissi, M., McNamee, M., Broglio, S., Emery, C. A., Feddermann-Demont, N., Fuller, G. W., Giza, C. C., Guskiewicz, K. M., Hainline, B., Iverson, G. L., Kutcher, J. S., ... Meeuwisse, W. (2023b). Consensus statement on concussion in sport: the 6th International Conference on Concussion in Sport—Amsterdam, October 2022. *British Journal of Sports Medicine*, 57(11), 695-711. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106898>
- Pierpoint, L. A. et Collins, C. (2021). Epidemiology of Sport-Related Concussion. *Clinics in Sports Medicine*, 40(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2020.08.013>
- Podlog, L., Banham, S. M., Wadey, R. et Hannon, J. C. (2015). Psychological Readiness to Return to Competitive Sport Following Injury: A Qualitative Study. *The Sport Psychologist*, 29(1), 1-14. <https://doi.org/10.1123/tsp.2014-0063>
- Putukian, M., Purcell, L., Schneider, K. J., Black, A. M., Burma, J. S., Chandran, A., Boltz, A., Master, C. L., Register-Mihalik, J. K., Anderson, V., Davis, G. A., Fremont, P., Leddy, J. J., Maddocks, D., Premji, Z., Ronksley, P. E., Herring, S. et Broglio, S. (2023). Clinical recovery from concussion-return to school and sport: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 57(12), 798-809. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106682>
- Pylyshyn, Z. W. et Storm, R. W. (1988). *Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism**. <https://doi.org/10.1163/156856888X00122>
- Renziehausen, J. M., Bergquist, A. M., Stout, J. R., Wells, A. J. et Fukuda, D. H. (2022). Effects of a Multi-Ingredient Oral Supplement on Multiple Object Tracking, Reaction Time, and Reactive Agility. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 19(1), 638-649. <https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2140014>
- Riemann, B. L. et Guskiewicz, K. M. (2000). Effects of mild head injury on postural stability as measured through clinical balance testing. *J Athl Train*, 35(1), 19-25.
- Romeas, T., Goujat, M., Faubert, J. et Labbé, D. (2024). No transfer of 3D-Multiple Object Tracking training on game performance in soccer: a follow-up study. *Psychology of sport and exercise*, 102770. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2024.102770>

- Romeas, T., Guldner, A. et Faubert, J. (2016). 3D-Multiple Object Tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players. *Psychology of Sport and Exercise*, 22, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2015.06.002>
- Schatz, P., Pardini, J. E., Lovell, M. R., Collins, M. W. et Podell, K. (2006). Sensitivity and specificity of the ImPACT Test Battery for concussion in athletes. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(1), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2005.08.001>
- Schneider, K. J., Critchley, M. L., Anderson, V., Davis, G. A., Debert, C. T., Feddermann-Demont, N., Gagnon, I., Guskiewicz, K. M., Hayden, K. A., Herring, S., Johnstone, C., Makdissi, M., Master, C. L., Moser, R. S., Patricios, J. S., Register-Mihalik, J. K., Ronksley, P. E., Silverberg, N. D. et Yeates, K. O. (2023). Targeted interventions and their effect on recovery in children, adolescents and adults who have sustained a sport-related concussion: a systematic review. *Br J Sports Med*, 57(12), 771-779. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106685>
- Sherry, N. S., Fazio-Sumrok, V., Sufrinko, A., Collins, M. W. et Kontos, A. P. (2021). Multimodal Assessment of Sport-related Concussion. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 31(3), 244-249. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000740>
- Sicard, V., Moore, R. D. et Ellemberg, D. (2018). Long-term cognitive outcomes in male and female athletes following sport-related concussions. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 132(Pt A), 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.03.011>
- Silverberg, N. D., Iverson, G. L., Cogan, A., Dams-O'Connor, K., Delmonico, R., Graf, M. J. P., Iaccarino, M. A., Kajankova, M., Kamins, J., McCulloch, K. L., McKinney, G., Nagele, D., Panenka, W. J., Rabinowitz, A. R., Reed, N., Wethe, J. V., Whitehair, V., Anderson, V., Arciniegas, D. B., ... Zemek, R. (2023). The American Congress of Rehabilitation Medicine Diagnostic Criteria for Mild Traumatic Brain Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.03.036>
- Singh, R., Mason, S., Lecky, F. et Dawson, J. (2018). Prevalence of depression after TBI in a prospective cohort: The SHEFBIT study. *Brain Injury*, 32(1), 84-90. <https://doi.org/10.1080/02699052.2017.1376756>

- Snegireva, N., Derman, W., Patricios, J. et Welman, K. E. (2018). Eye tracking technology in sports-related concussion: a systematic review and meta-analysis. *Physiological Measurement*, 39(12), 12TR01. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aaef44>
- Streiner, D. L. et Norman, G. R. (1989). *Health measurement scales: a practical guide to their development and use*. Oxford University Press.
- Su, S. H., Xu, W., Li, M., Zhang, L., Wu, Y. F., Yu, F. et Hai, J. (2014). Elevated C-reactive protein levels may be a predictor of persistent unfavourable symptoms in patients with mild traumatic brain injury: a preliminary study. *Brain Behav Immun*, 38, 111-7. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2014.01.009>
- Tabor, J. B., Brett, B. L., Nelson, L., Meier, T., Penner, L. C., Mayer, A. R., Echemendia, R. J., McAllister, T., Meehan, W. P., Patricios, J., Makdissi, M., Bressan, S., Davis, G. A., Premji, Z., Schneider, K. J., Zetterberg, H. et McCrea, M. (2023). Role of biomarkers and emerging technologies in defining and assessing neurobiological recovery after sport-related concussion: a systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 57(12), 789-797. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106680>
- Tinjust, D., Allard, R. et Faubert, J. (2008). Impact of stereoscopic vision and 3D representation of visual space on multiple object tracking performance. *Journal of Vision*, 8(6), 509. <https://doi.org/10.1167/8.6.509>
- Tremblay, M., Tétreau, C., Corbin-Berrigan, L.-A. et 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. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.822454>
- Tullo, D., Guy, J., Faubert, J. et Bertone, A. (2018). Training with a three-dimensional multiple object-tracking (3D-MOT) paradigm improves attention in students with a neurodevelopmental condition: a randomized controlled trial. *Developmental Science*, 21(6), e12670. <https://doi.org/10.1111/desc.12670>
- Ulman, S., Erdman, A. L., Loewen, A., Worrall, H. M., Tulchin-Francis, K., Jones, J. C., Chung, J. S., Ellis, H. B., Cullum, C. M. et Miller, S. M. (2022). Improvement in balance from diagnosis to return-to-play initiation following a sport-related concussion: BESS scores vs center-of-pressure measures. *Brain Injury*, 36(8), 921-930. <https://doi.org/10.1080/02699052.2022.2109736>

- van Ierssel, J., Pennock, K. F., Sampson, M., Zemek, R. et Caron, J. G. (2022). Which psychosocial factors are associated with return to sport following concussion? A systematic review. *J Sport Health Sci*, 11(4), 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.01.001>
- Vater, C., Gray, R. et Holcombe, A. O. (2021). A critical systematic review of the Neurotracker perceptual-cognitive training tool. *Psychonomic Bulletin & Review*, 28(5), 1458-1483. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-01892-2>
- Vona, M., de Guise, É., Leclerc, S., Deslauriers, J. et Romeas, T. (2024). Multiple domain-general assessments of cognitive functions in elite athletes: Contrasting evidence for the influence of expertise, sport type and sex. *Psychology of Sport and Exercise*, 75, 102715. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2024.102715>
- Ware, J. B., Dolui, S., Duda, J., Gaggi, N., Choi, R., Detre, J., Whyte, J., Diaz-Arrastia, R. et Kim, J. J. (2020). Relationship of Cerebral Blood Flow to Cognitive Function and Recovery in Early Chronic Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurotrauma*, 37(20), 2180-2187. <https://doi.org/10.1089/neu.2020.7031>
- Wasserman, E. B., Bazarian, J. J., Mapstone, M., Block, R. et van Wijngaarden, E. (2016). Academic Dysfunction After a Concussion Among US High School and College Students. *American Journal of Public Health*, 106(7), 1247-1253. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2016.303154>
- Wiebe, D. J., Comstock, R. D. et Nance, M. L. (2011). Concussion research: a public health priority. *Injury Prevention*, 17(1), 69-70. <https://doi.org/10.1136/ip.2010.031211>
- Zelinsky, G. J. et Neider, M. B. (2008). An eye movement analysis of multiple object tracking in a realistic environment. *Visual Cognition*, 16(5), 553-566. <https://doi.org/10.1080/13506280802000752>
- Zelinsky, G. J. et Todor, A. (2010). The role of “rescue saccades” in tracking objects through occlusions. *Journal of Vision*, 10(14), 29. <https://doi.org/10.1167/10.14.29>
- Zhang, X., Maso, F., Ekpe-Lordonnois, B., Poncelet, T., Ennequin, G., Blazeovich, A. J. et Ratel, S. (2025). Effects of maturity status, training background and stereopsis on perceptual-cognitive skills from childhood into adolescence. *Physiology & Behavior*, 291, 114815. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2025.114815>

Zuckerman, S. L., Kerr, Z. Y., Yengo-Kahn, A., Wasserman, E., Covassin, T. et Solomon, G. S. (2015). Epidemiology of Sports-Related Concussion in NCAA Athletes From 2009-2010 to 2013-2014: Incidence, Recurrence, and Mechanisms. *Am J Sports Med*, 43(11), 2654-62. <https://doi.org/10.1177/0363546515599634>

ANNEXES

Annexe A : Questionnaire d'efficacité personnelle

Aujourd'hui, avec quelle confiance crois-tu pouvoir accomplir les items suivants :

Items reliés aux problèmes spécifiques des TCC légers

Je crois que si je le veux je suis capable de...

1. Jouer/m'entraîner seul(e) sans tomber ou me blesser?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 2. Faire toutes mes activités sportives sans que ça me donne mal à la tête?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 3. Faire toutes mes activités sportives sans être plus fatigué(e) que d'habitude?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 4. Réagir rapidement pendant mes activités sportives?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 5. Jouer/m'entraîner avec mes amis sans avoir besoin de me reposer plus qu'à l'habitude?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 6. Jouer/m'entraîner avec mes amis sans tomber ou me blesser?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 7. Participer à mes activités sportives sans que les muscles de mes jambes ou de mes bras soient endoloris ou me fassent mal?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance
 8. Participer à mes activités sportives sans que je sois plus essoufflé(e) qu'à l'habitude?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
très peu modérément très
confiance confiance confiance

Items reliés à la compétence sportive

Je crois que si je le veux, je suis capable de...

1. Bien réussir lorsque je joue/m'entraîne seul(e)?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
2. Bien réussir lorsque je dois faire partie d'une équipe sportive?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
3. Bien réussir à une activité sportive si je sais que les autres me regardent?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
4. Participer à mes activités sportives de manière à ce que mes parents soient contents?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
5. Participer à mes activités sportives de manière à ce que je sois content(e) de ma performance?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
6. Participer à mes activités sportives de manière à ce que mon entraîneur ou mes coéquipiers soient contents de ma performance?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
7. Participer à mes activités sportives sans avoir peur que les autres me jugent négativement?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
8. Être sûr(e) je serai choisi(e) en premier lorsque nous devons composer des équipes pour des activités sportives?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
9. Donner toujours mon maximum lorsque je pratique mes activités sportives?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |
10. Être aussi bon(e) qu'à l'habitude lorsque je pratique mes activités sportives?

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|-------------------------|----|----|----|----|-------------------|
| 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| très peu confiance | | | | modérément confiance | | | | | très confiance |

Annexe B : Tableaux supplémentaires de l'article

Table 4. Supplementary file 1: Neurotracker and tests battery performances comparisons between preseason, T1 and T5

| Neurotracker | Overall | | | Women | | | Men | | |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Neurotracker (m/s) | 1.19 \pm 0.26 | 1.13 \pm 0.28 | 1.41 \pm 0.28 | 1.14 \pm 0.27 | 1.12 \pm 0.21 | 1.29 \pm 0.17 | 1.24 \pm 0.26 | 1.13 \pm 0.34 | 1.49 \pm 0.33 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T1 Mean NT vs PS Mean NT | -1.25 | | 0.21 | -0.83 | | 0.41 | -1.16 | | 0.25 |
| T5 Mean NT vs PS Mean NT | -1.54 | | 0.12 | -1.60 | | 0.11 | -0.67 | | 0.50 |
| T5 Mean NT vs T1 Mean NT | -2.52 | | 0.01 | -1.60 | | 0.11 | -2.02 | | 0.04 |
| ImPACT | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Memory composite verbal | 89.05 \pm 10.82 | 90.07 \pm 11.73 | 89.25 \pm 13.37 | 92.75 \pm 9.11 | 94.14 \pm 5.96 | 88.25 \pm 15.09 | 86.37 \pm 11.56 | 86.50 \pm 14.62 | 90.25 \pm 13.67 |
| Memory composite visual | 79.84 \pm 10.55 | 76.93 \pm 11.79 | 78.00 \pm 12.29 | 83.13 \pm 10.96 | 84.29 \pm 6.34 | 81.50 \pm 14.27 | 77.45 \pm 10.06 | 70.50 \pm 11.93 | 74.50 \pm 10.79 |
| Visual motor speed composite | 38.72 \pm 5.52 | 37.92 \pm 5.34 | 38.16 \pm 5.50 | 39.72 \pm 7.12 | 37.12 \pm 4.30 | 38.19 \pm 7.70 | 38.00 \pm 4.23 | 38.63 \pm 6.33 | 38.14 \pm 3.36 |
| Reaction time composite | 0.65 \pm 0.12 | 0.64 \pm 0.09 | 0.60 \pm 0.06 | 0.61 \pm 0.11 | 0.67 \pm 0.09 | 0.61 \pm 0.08 | 0.68 \pm 0.13 | 0.62 \pm 0.09 | 0.59 \pm 0.06 |
| Impulse control composite | 5.74 \pm 4.21 | 7.47 \pm 5.72 | 6.00 \pm 5.10 | 7.88 \pm 5.28 | 7.71 \pm 6.65 | 8.25 \pm 6.65 | 4.18 \pm 2.48 | 7.25 \pm 5.23 | 3.75 \pm 1.71 |
| PCSS Number of symptoms | 5.42 \pm 4.88 | 9.32 \pm 6.51 | 3.78 \pm 3.63 | 7.75 \pm 4.98 | 6.78 \pm 4.63 | 4.40 \pm 2.88 | 3.73 \pm 4.24 | 11.60 \pm 7.31 | 3.00 \pm 4.76 |
| PCSS Total Score | 10.32 \pm 10.80 | 19.63 \pm 20.18 | 6.78 \pm 8.11 | 14.38 \pm 11.66 | 11.67 \pm 8.19 | 9.20 \pm 9.26 | 7.36 \pm 9.58 | 26.80 \pm 25.19 | 3.75 \pm 6.24 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |

| | | | | | | |
|---------------------------------|-------|------|-------|------|-------|-------------|
| T1 MC verbal vs PS MC verbal | -0.35 | 0.73 | -0.31 | 0.75 | -0.35 | 0.73 |
| T1 MC visual vs PS MC visual | -0.83 | 0.41 | -0.09 | 0.93 | -1.26 | 0.21 |
| T1 VMSC vs PS VMSC | -1.48 | 0.14 | -1.86 | 0.06 | -0.56 | 0.58 |
| T1 RTC vs PS RTC | -0.35 | 0.73 | -1.70 | 0.09 | -1.27 | 0.20 |
| T1 ICC vs PS ICC | -0.95 | 0.34 | -0.53 | 0.60 | -1.70 | 0.09 |
| T5 MC verbal vs PS MC verbal | -0.09 | 0.93 | -0.82 | 0.41 | -0.73 | 0.47 |
| T5 MC visual vs PS MC visual | -1.19 | 0.23 | -0.73 | 0.47 | -1.10 | 0.27 |
| T5 VMSC vs PS VMSC | -0.14 | 0.89 | -0.73 | 0.47 | -0.37 | 0.72 |
| T5 RTC vs PS RTC | -0.49 | 0.62 | -1.46 | 0.14 | -0.92 | 0.36 |
| T5 ICC vs PS ICC | 0.00 | 1.00 | -0.37 | 0.72 | -0.38 | 0.71 |
| T5 MC verbal vs T1 MC verbal | -0.91 | 0.36 | -0.73 | 0.47 | -1.84 | 0.07 |
| T5 MC visual vs T1 MC visual | -0.07 | 0.94 | -0.18 | 0.85 | 0.00 | 1.00 |
| T5 VMSC vs T1 VMSC | -0.70 | 0.48 | -0.73 | 0.47 | -0.37 | 0.72 |
| T5 RTC vs T1 RTC | -0.25 | 0.80 | -0.73 | 0.47 | -0.54 | 0.59 |
| T5 ICC vs T1 ICC | -0.17 | 0.86 | -0.82 | 0.41 | -1.30 | 0.19 |
| T1 NOS vs PS NOS | -1.85 | 0.06 | -0.17 | 0.86 | -2.09 | 0.04 |
| T1 TSS vs PS TSS | -1.22 | 0.22 | -0.14 | 0.89 | -1.58 | 0.11 |
| T5 NOS vs PS NOS | -0.42 | 0.67 | -0.37 | 0.72 | -0.44 | 0.66 |
| T5 TSS vs PS TSS | -0.52 | 0.60 | -0.73 | 0.47 | -0.45 | 0.66 |
| T5 NOS vs T1 NOS | -1.83 | 0.07 | 0.00 | 1.00 | -1.84 | 0.07 |

| | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| T5 TSS vs T1 TSS | -1.54 | | 0.12 | -0.37 | | 0.72 | -1.83 | | 0.07 |
| Self-efficacy questionnaire | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Athletic skills | 887.06 \pm 87.73 | 662.63 \pm 211.58 | 788.89 \pm 168.26 | 868.75 \pm 93.72 | 596.25 \pm 151.37 | 700.00 \pm 203.80 | 903.33 \pm 84.11 | 710.91 \pm 241.76 | 860.00 \pm 106.07 |
| mTBI presentation related to physical activity score | 731.76 \pm 67.38 | 518.89 \pm 166.13 | 677.78 \pm 75.30 | 717.50 \pm 56.51 | 495.00 \pm 145.80 | 645.00 \pm 62.45 | 744.44 \pm 76.83 | 538.00 \pm 186.24 | 704.00 \pm 80.50 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T1 Athletic skills vs PS Athletic skills | -3.10 | | 0.00 | -2.20 | | 0.03 | -2.19 | | 0.03 |
| T1 mTBI PRPAS vs PS mTBI PRPAS | -3.15 | | 0.00 | -2.20 | | 0.03 | -2.38 | | 0.02 |
| T5 Athletic skills vs PS Athletic skills | -2.21 | | 0.03 | -1.60 | | 0.11 | -1.60 | | 0.11 |
| T5 mTBI PRPAS vs PS mTBI PRPAS | -2.53 | | 0.01 | -1.83 | | 0.07 | -1.83 | | 0.07 |
| T5 Athletic skills vs T1 Athletic skills | -2.52 | | 0.01 | -1.83 | | 0.07 | -1.83 | | 0.07 |
| T5 mTBI PRPAS vs T1 mTBI PRPAS | -2.67 | | 0.01 | -1.83 | | 0.07 | -2.02 | | 0.04 |
| Ruler Drop Test | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Ruler Drop Test | 18.84 \pm 6.53 | 19.88 \pm 8.29 | 15.00 \pm 6.58 | 19.97 \pm 7.86 | 18.77 \pm 9.03 | 16.69 \pm 9.75 | 17.71 \pm 5.09 | 20.76 \pm 8.02 | 13.65 \pm 3.18 |
| | Z | | p | Z | | p | Z | | p |
| T1 Mean RDT vs PS Mean RDT | -0.80 | | 0.42 | -0.68 | | 0.50 | -1.60 | | 0.11 |
| T5 Mean RDT vs PS Mean RDT | -0.84 | | 0.40 | -0.73 | | 0.47 | -0.73 | | 0.47 |
| T5 Mean RDT vs T1 Mean RDT | -1.19 | | 0.24 | -0.37 | | 0.72 | -1.36 | | 0.18 |
| BEES | Overall | | | Women | | | Men | | |
| | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) | PS ($\bar{x} \pm SD$) | T1 ($\bar{x} \pm SD$) | T5 ($\bar{x} \pm SD$) |
| Double | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 | 0.00 \pm 0.00 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--|------|--|
| Single | 2.61 ± 2.23 | 3.59 ± 2.87 | 3.56 ± 2.88 | 2.33 ± 2.56 | 3.14 ± 2.91 | 5.25 ± 2.63 | 2.89 ± 1.97 | 3.900 ± 2.96 | 2.20 ± 2.49 | | | |
| Tandem | 1.06 ± 1.55 | 2.29 ± 2.91 | 1.67 ± 2.18 | 0.78 ± 1.72 | 2.71 ± 3.59 | 1.75 ± 2.06 | 1.33 ± 1.41 | 2.00 ± 2.49 | 1.60 ± 2.51 | | | |
| | Z | | p | | Z | | p | | Z | | p | |
| T1 Double vs PS Double | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | |
| T1 Single vs PS Single | -1.18 | | 0.24 | | -0.65 | | 0.52 | | -0.83 | | 0.40 | |
| T1 Tandem vs PS Tandem | -2.09 | | 0.04 | | -1.60 | | 0.11 | | -1.19 | | 0.24 | |
| T5 Double vs PS Double | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | |
| T5 Single vs PS Single | -1.12 | | 0.26 | | -1.89 | | 0.06 | | 0.00 | | 1.00 | |
| T5 Tandem vs PS Tandem | -0.68 | | 0.50 | | 0.00 | | 1.00 | | -0.82 | | 0.41 | |
| T5 Double vs T1 Double | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | | 0.00 | | 1.00 | |
| T5 Single vs T1 Single | -0.27 | | 0.79 | | -1.41 | | 0.16 | | -0.82 | | 0.41 | |
| T5 Tandem vs T1 Tandem | -0.73 | | 0.47 | | -1.34 | | 0.18 | | -0.45 | | 0.66 | |

ICC: impulse control composite; MC: memory composite; m/s: meter per second; mTBI: mild traumatic brain injury; NOS: number of symptoms; NT: Neurotracker; PCSS: Post-Concussion Symptom Scale; PRPAS: presentation related to physical activity score; PS: preseason; RDT: Ruler Drop Test; RTC: reaction time composite; SD: standard deviation; TSS: total score symptoms; T1: first follow-up visit; T5: fifth follow-up visit; VMSC: visual motor speed composite.

Table 5. Supplementary file 2 : Correlations between symptoms and mTBI tests battery




| Neurotracker | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|--------------------|-------|------|----------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| Mean Neurotracker | Correlation Coefficient | -0.12 | 0.66 | -0.46 | -0.07 | 0.71 | -0.43 | 0.12 | 0.42 | 0.06 | 0.04 | 0.42 | -0.16 | 0.00 | -1.00 | 0.95 | -0.22 | -1.00 | 0.95 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.61 | 0.08 | 0.16 | 0.78 | 0.05 | 0.19 | 0.63 | 0.26 | 0.87 | 0.89 | 0.27 | 0.67 | 1.00 | a | 0.05 | 0.64 | a | 0.05 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 19 | 9 | 10 | 19 | 9 | 10 | 7 | 3 | 4 | 7 | 3 | 4 |
| ImPACT | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
| | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| Memory composite verbal | Correlation Coefficient | 0.31 | 0.03 | 0.24 | 0.32 | 0.15 | 0.22 | 0.08 | -0.29 | 0.55 | -0.14 | -0.62 | 0.36 | 0.37 | -0.32 | 0.95 | 0.22 | -0.32 | 0.95 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.20 | 0.95 | 0.48 | 0.18 | 0.73 | 0.52 | 0.79 | 0.52 | 0.16 | 0.62 | 0.14 | 0.38 | 0.37 | 0.68 | 0.05 | 0.60 | 0.68 | 0.05 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 15 | 7 | 8 | 15 | 7 | 8 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Memory composite visual | Correlation Coefficient | 0.42 | 0.33 | 0.35 | 0.45 | 0.43 | 0.32 | 0.33 | 0.67 | 0.42 | 0.41 | 0.43 | 0.58 | 0.31 | -0.40 | 0.74 | 0.24 | -0.40 | 0.74 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.07 | 0.43 | 0.29 | 0.05 | 0.28 | 0.33 | 0.23 | 0.10 | 0.30 | 0.13 | 0.34 | 0.13 | 0.45 | 0.60 | 0.26 | 0.57 | 0.60 | 0.26 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 15 | 7 | 8 | 15 | 7 | 8 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Visual Motor Speed Composite | Correlation Coefficient | -0.07 | -0.54 | 0.04 | -0.04 | -0.41 | 0.00 | 0.11 | -0.13 | 0.06 | 0.04 | -0.32 | 0.19 | -0.06 | -1.00 | 0.32 | -0.21 | -1.00 | 0.32 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.78 | 0.17 | 0.91 | 0.88 | 0.32 | 1.00 | 0.70 | 0.79 | 0.89 | 0.90 | 0.48 | 0.65 | 0.89 | a | 0.68 | 0.63 | a | 0.68 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 15 | 7 | 8 | 15 | 7 | 8 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Reaction Time Composite | Correlation Coefficient | 0.23 | 0.45 | 0.41 | 0.29 | 0.49 | 0.44 | -0.23 | -0.43 | 0.07 | -0.31 | -0.57 | -0.26 | 0.13 | 0.40 | -0.11 | 0.21 | 0.40 | -0.11 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.34 | 0.27 | 0.22 | 0.23 | 0.22 | 0.18 | 0.42 | 0.33 | 0.87 | 0.25 | 0.18 | 0.53 | 0.76 | 0.60 | 0.90 | 0.61 | 0.60 | 0.90 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 15 | 7 | 8 | 15 | 7 | 8 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------------------|-------------|----------|--------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|
| Impulse Control Composite | Correlation Coefficient | 0.28 | 0.38 | -0.15 | 0.24 | 0.30 | -0.16 | 0.19 | 0.50 | -0.17 | -0.11 | 0.09 | -0.59 | -0.12 | 0.11 | -0.74 | -0.03 | 0.11 | -0.74 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.25 | 0.35 | 0.67 | 0.32 | 0.47 | 0.63 | 0.50 | 0.25 | 0.69 | 0.71 | 0.85 | 0.12 | 0.77 | 0.90 | 0.26 | 0.95 | 0.90 | 0.26 |
| | N | 19 | 8 | 11 | 19 | 8 | 11 | 15 | 7 | 8 | 15 | 7 | 8 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Self-Efficacy Questionnaire | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
| | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Athletic Skills | Correlation Coefficient | -0.48 | 0.02 | -0.67 | -0.46 | -0.09 | -0.65 | -0.24 | -0.35 | -0.21 | -0.32 | -0.48 | -0.31 | -0.52 | 0.20 | -0.32 | -0.49 | 0.20 | -0.32 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.06 | 0.97 | 0.05 | 0.07 | 0.85 | 0.06 | 0.35 | 0.40 | 0.55 | 0.20 | 0.23 | 0.38 | 0.19 | 0.80 | 0.68 | 0.21 | 0.80 | 0.68 |
| | N | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 18 | 8 | 10 | 18 | 8 | 10 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| mTBI presentation related to physical activity score | Correlation Coefficient | -0.34 | -0.23 | -0.42 | -0.31 | -0.41 | -0.41 | -0.42 | -0.58 | -0.19 | -0.44 | -0.86 | -0.25 | -0.69 | -0.60 | -0.32 | -0.65 | -0.60 | -0.32 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.20 | 0.61 | 0.26 | 0.25 | 0.36 | 0.28 | 0.10 | 0.14 | 0.62 | 0.08 | 0.01 | 0.52 | 0.06 | 0.40 | 0.68 | 0.08 | 0.40 | 0.68 |
| | N | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Ruler Drop Test | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
| | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mean Ruler Drop Test | Correlation Coefficient | -0.04 | 0.07 | -0.22 | 0.04 | 0.11 | -0.21 | 0.47 | 0.43 | 0.39 | 0.44 | 0.50 | 0.24 | 0.04 | 0.74 | -0.32 | 0.17 | 0.74 | -0.32 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.88 | 0.87 | 0.57 | 0.88 | 0.80 | 0.58 | 0.06 | 0.29 | 0.30 | 0.08 | 0.21 | 0.53 | 0.93 | 0.26 | 0.68 | 0.69 | 0.26 | 0.68 |
| | N | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| BESS | | Preseason | | | | | | T1 | | | | | | T5 | | | | | |
| | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | | Number of Symptoms | | | Total Score Symptoms | | |
| | | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M | O | W | M |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Double | Correlation Coefficient | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|------|------|------|------|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Sig. (2-tailed) | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b | b |
| | N | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Single | Correlation Coefficient | 0.16 | 0.32 | 0.21 | 0.12 | 0.26 | 0.23 | 0.20 | 0.25 | 0.18 | 0.25 | 0.51 | 0.11 | -0.37 | -0.95 | -0.89 | -0.30 | -0.95 | -0.89 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.55 | 0.45 | 0.59 | 0.64 | 0.53 | 0.55 | 0.46 | 0.59 | 0.65 | 0.35 | 0.24 | 0.77 | 0.37 | 0.05 | 0.11 | 0.46 | 0.05 | 0.11 |
| | N | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |
| Tandem | Correlation Coefficient | -0.60 | -0.38 | -0.58 | -0.60 | -0.44 | -0.58 | 0.18 | 0.21 | 0.15 | 0.37 | 0.87 | 0.05 | -0.56 | -0.95 | -0.39 | -0.56 | -0.95 | -0.39 |
| | Sig. (2-tailed) | 0.01 | 0.35 | 0.11 | 0.01 | 0.28 | 0.10 | 0.50 | 0.65 | 0.71 | 0.16 | 0.01 | 0.90 | 0.15 | 0.05 | 0.61 | 0.15 | 0.05 | 0.61 |
| | N | 17 | 8 | 9 | 17 | 8 | 9 | 16 | 7 | 9 | 16 | 7 | 9 | 8 | 4 | 4 | 8 | 4 | 4 |

a: Unable, because of missing data; b: No results, because all participants scored 0 on this test; M: men; mTBI: mild traumatic brain injury; O: overall; Sig: significance level; T1: first follow-up visit; T5: fifth follow-up visit; W: women.

Annexe C : Certificat d'éthique

| | |
|--|---|
|  Savoir. Surprendre. | 1762 |
| 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 : | Perceptual-cognitive training after a mild traumatic brain injury : towards a sensitive marker of recovery |
| Chercheur(s) : | Philippe Fait Département des sciences de l'activité physique Dre. Isabelle Gagnon MUHC - Montréal Children's Hospital Laurie-Ann Corbin-Berrigan Département des sciences de l'activité physique Alexandre Deschamps Département des sciences de l'activité physique UQTR |
| Organisme(s) : | FIR-Émergence (Laurie-Ann Corbin-Berrigan) |
| N° DU CERTIFICAT | CER-14-205-07.17 |
| PÉRIODE DE VALIDITÉ : | Du 07 octobre 2023 au 07 octobre 2024 |
| <p>En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage à :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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 |
| <i>Décanat de la recherche et de la création</i> Date d'émission : 12 octobre 2023 | |