

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

FIABILITÉ TEST-RETEST DU NEUROTRACKER EN COMPARAISON AU
TEST IMPACT COMME MESURE DE SUIVI DES TRAUMATISMES
CRANIOCÉRÉBRAUX LÉGERS LORS DE DEUX SAISONS CONSÉCUTIVES
CHEZ DES ATHLÈTES UNIVERSITAIRES

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

PAR

ALEXANDRE DESCHAMPS

DÉCEMBRE 2021

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAITRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Direction de recherche :

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

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

Jury d'évaluation

<u>Philippe Fait, CAT(C), Ph.D.</u>	<u>Université du Québec à Trois-Rivières</u>
Prénom et nom	Membre de jury

<u>Jean Lemoyne, Ph.D.</u>	<u>Université du Québec à Trois-Rivières</u>
Prénom et nom	Membre de jury

<u>Martin Lavallière, Ph.D.</u>	<u>Université du Québec à Chicoutimi</u>
Prénom et nom	Membre de jury

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

Le traumatisme craniocérébral léger (TCCL) est reconnu en tant que problème de santé publique et les activités sportives représentent une part notable des hospitalisations et des visites à l'urgence associées à ce problème.

L'évaluation ainsi que la prise en charge du TCCL représentent un défi pour les professionnels de la santé qui doivent balancer le risque de complications avec les aspirations de retour au sport de l'athlète. Un risque existe puisque certains athlètes retournent à leur sport en exhibant toujours des déficits difficiles à détecter. Ce problème se présente puisqu'il n'existe pas encore de test unique apte à diagnostiquer cette pathologie avec certitude. Pour optimiser la prise en charge, une batterie d'évaluations multimodales répétée dans le temps est conseillée. Parmi ces évaluations, l'utilisation de tests spécifiques aux fonctions cognitives représente une avenue prometteuse en raison de leur sensibilité à certains déficits pouvant affecter les athlètes au-delà des symptômes qu'ils perçoivent et qu'ils peuvent plus difficilement cacher. Lors de l'utilisation de ces tests, il est recommandé de procéder à des évaluations comparatives de référence en pré-saison afin que chaque athlète soit son propre contrôle dans l'éventualité d'un TCCL. Toutefois, il faut préalablement mieux connaître la fiabilité test-retest des outils d'évaluation utilisés pour bien planifier ces évaluations de référence.

Parmi les tests cognitifs, le Neurotracker, un système de Three-Dimensional Multiple Object Tracking (3D-MOT), permet l'évaluation de capacités perceptivo-cognitives à l'aide d'un test dynamique et immersif impliquant le champ de vision périphérique et

semble être un marqueur de récupération post-TCCL prometteur. Cependant, aucune étude n'a évalué sa fiabilité à ce jour. De son côté l'Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT) servira de comparatif puisqu'il est le programme neurocognitif le plus utilisé et étudié en Amérique du Nord, qu'il possède une bonne capacité à identifier les TCCL à court terme et qu'il présente une fiabilité test-retest satisfaisante.

L'étude présentée dans ce mémoire a évalué la fiabilité test-retest du Neurotracker et de l'ImPACT après un intervalle d'un an chez 30 athlètes universitaires. Les coefficients de corrélation intraclasse entre les deux saisons variaient de 0,171 à 0,628 et n'étaient significatifs que pour le Neurotracker (0,628 ; IC à 95 % 0,355 à 0,803) et le score composite Visual Motor Speed (VMS) de l'ImPACT (0,543 ; IC à 95 % 0,185 - 0,776). Cinq résultats de différence de moyenne standardisée de l'ImPACT avaient des valeurs s'approchant du zéro indiquant une bonne fiabilité tandis que le Neurotracker avait l'intervalle de confiance le plus petit ce qui pourrait démontrer une moindre variabilité entre les individus. Le graphique de Bland-Altman du Neurotracker a montré un biais significatif de +0,179 m/s alors qu'aucun n'était présent pour les résultats ImPACT. Ces résultats permettent de conclure que le Neurotracker démontre une fiabilité égale ou supérieure à celle des scores composites de l'ImPACT. Parmi les scores composites de l'ImPACT, le visual motor speed (VMS) était le plus fiable. À notre connaissance, ces données sont les premières à être publiées à ce sujet pour le Neurotracker et pourront servir de comparatif lors des prochaines années afin d'améliorer l'utilisation des évaluations de présaison en gestion des TCCL.

Mots clés : Traumatisme craniocérébral léger; Neurotracker; ImPACT; sport; fiabilité

SUMMARY

Mild traumatic brain injury (mTBI) is recognized as a public health problem and sports activities represent a significant portion of hospitalizations and emergency room visits associated with this problem.

The assessment and management of mTBI presents a challenge for healthcare professionals who must balance the risk of complications with the athlete's aspirations to return to sport. There is a risk since some athletes return to their sport still exhibiting deficits that are difficult to detect. This problem arises because there is not yet a single test that can diagnose this condition with certainty. To optimize mTBI management, a battery of multimodal evaluations repeated over time is recommended. Among these assessments, the use of specific cognitive tests represents a promising avenue because of their sensitivity to certain deficits that can affect athletes beyond the symptoms they experience and that can hardly be hidden. When using these tests, it is recommended that pre-season baseline assessments are performed so that each athlete is their own control in the event of an mTBI. However, a better understanding of the test-retest reliability of the assessment tools is required in order to properly plan the frequency of these baseline assessments.

Among the cognitive tests, the Neurotracker, a Three-Dimensional Multiple Object Tracking (3D-MOT) system, allows the assessment of perceptual-cognitive abilities using a dynamic and immersive test involving the peripheral vision and appears to be a promising marker of post-mTBI recovery. However, no study has evaluated the test-retest reliability of the Neurotracker to date. On the other hand, the Immediate Post

Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT) will serve as a comparison since it is the most widely used and studied neurocognitive program in North America, it has a good ability to identify short-term mTBI and it has already demonstrated satisfactory test-retest reliability

This study evaluated the test-retest reliability of Neurotracker and ImPACT over a one-year period in 30 university athletes. Intra-class correlations coefficient between the two seasons ranged between 0,171-0,628 and were only significant for the Neurotracker (0,628; 95% C.I. 0,355 – 0,803) and the Visual Motor Speed (VMS) composite score of the ImPACT (0,543; 95% C.I. 0,185 - 0,776). Five outcomes of the ImPACT had lower values of standardized mean difference indicating good reliability while the Neurotracker had the smallest confidence interval which could demonstrate less variability between individuals. Neurotracker's Bland-Altman plot showed a significative bias of +0.179 m/s while none was present for the ImPACT outcomes. The results obtained allow us to conclude that the Neurotracker has demonstrated a reliability equal to or better than that of the composite scores of the ImPACT. Among the composite ImPACT scores, visual motor speed (VMS) was the most reliable. To our knowledge, these data are the first to be published on this subject for the Neurotracker and can be used as a comparison in order to improve the use of preseason assessments in the management of mTBI in the coming years.

Keywords: Mild craniocerebral trauma; Neurotracker; Impact; sport; reliability

Table des matières

Résumé du mémoire	III
Summary	V
Table des matières	VII
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Liste des abréviations	X
Remerciements	XI
Introduction.....	1
1. TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL LÉGER	2
1.1 <i>Description</i>	2
1.2 <i>Épidémiologie</i>	4
1.3 <i>Physiopathologie</i>	7
1.4 <i>Pronostic et complications</i>	10
2. DIAGNOSTIC DU TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL LÉGER	14
2.1 <i>Processus diagnostic</i>	14
2.2 <i>Outils de diagnostic</i>	18
2.3 <i>Questionnaires de symptômes</i>	20
2.4 <i>Évaluations neurocognitives</i>	20
Problématique	30
Objectif de recherche	34
Hypothèse	34
Article scientifique.....	35
ABSTRACT	37
INTRODUCTION	39
METHODS	43
ANALYSIS.....	47
RESULTS.....	48
DISCUSSION.....	54
Discussion.....	60
LIMITATIONS	70
PERSPECTIVES	74
CONCLUSION	75
Bibliographie	77
Annexes	89
CERTIFICAT D'ÉTHIQUE	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: <i>Quatre domaines symptomatologiques du TCCL</i>	4
Tableau 2: <i>Participants' characteristics</i>	48
Tableau 3: <i>Reliability statistics of the Neurotracker and ImPACT</i>	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1: <i>Cascade neurométabolique du TCCL</i>	10
Figure 2: <i>Neurotracker's trial five steps</i>	46
Figure 3: <i>Becker's d forest plot</i>	49
Figure 4: <i>Bland-Altman plot: Neurotracker</i>	52-53

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3D-MOT: Three-dimension multiple object tracking

C.I.: Confidence interval

dB: Becker's standardized mean difference

mTBI: Mild traumatic brain injury

HCP: Health care professionals

I.C.: Intervalle de confiance

ICC : Coefficient de corrélation intraclasse / Intra-class correlation coefficient

ImPACT: Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test

MDC: Minimal detectable change / Changement minimal détecté

MOT: Multiple object tracking

PCSS: Post-Concussion Symptom Scale

TCC : Traumatisme craniocérébral

TCCL: Traumatisme craniocérébral léger

VMS: Visual Motor Speed

REMERCIEMENTS

En complément à ma formation de chiropraticien, je recherchais un projet de maîtrise qui puisse se transposer au contexte clinique tout en rendant service aux athlètes de Trois-Rivières. Dans cette optique, le choix du traumatisme craniocérébral léger (TCCL) proposé par Martin ne pouvait pas tomber plus à point.

Le processus de recherche des dernières années en fut une d'adaptation, et ce particulièrement avec l'entrée dans nos vies de la COVID-19. Malgré tout, l'objectif de conclure un projet expérimental a été atteint. Ceci n'aurait pu être possible sans le support de plusieurs personnes, mais commençons par mes co-directeur(trice)s Laurie-Ann et Philippe. Merci de votre créativité et de votre rigueur afin de m'aider à me réinventer et à pousser jusqu'à la fin. Vous m'avez permis de découvrir la thérapie du sport en m'entourant d'une belle équipe d'étudiants qui ont répondu présents à plusieurs reprises pour tester encore un peu plus d'athlètes. Parmi ce groupe, un merci tout particulier à Élisabeth qui a fait 1001 tâches avec passion et minutie ! Pour conclure, je ne peux pas manquer l'occasion de remercier Évelyne, Francine et Nicole qui m'ont fait profiter de leur regard externe et de leur connaissance de la langue française même si le sujet les intéressait un peu ou pas du tout par moment.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. Traumatisme craniocérébral léger

1.1 Description

Le traumatisme craniocérébral léger (TCCL), également connu sous le nom de commotion cérébrale, est une atteinte traumatique du cerveau résultant de forces biomécaniques directes ou indirectes au niveau de la boîte crânienne (McCrory et al., 2017). Ces forces biomécaniques sont communes lors de la pratique du sport, comme lors d'un contact tête à tête ou lors d'une chute. L'impact entraîne un processus physiopathologique local complexe menant à l'apparition rapide de symptômes d'ordre neurologique ne s'expliquant pas par une atteinte structurelle, l'utilisation de drogue, d'alcool, de médication ou toute autre condition associée (Harmon et al., 2019; McCrory et al., 2017).

Le TCCL est une sous-catégorie des traumatismes craniocérébraux (TCC) dont le spectre complet est généralement subdivisé en trois niveaux de gravité (léger, modéré et grave) (Tenovuo et al., 2021). Il s'agit de la forme la moins sévère puisqu'il n'est pas associé à une altération prolongée de l'état de conscience ou à une fracture du crâne (Hawryluk et al., 2015) alors que ces présentations sont possibles en cas de TCC modéré ou grave. La proportion de TCCL oscille entre 78% et 84% chez les adultes parmi les personnes se présentant à l'hôpital pour l'évaluation d'un TCC (Savitsky et al., 2016). Au début du XI^e siècle, des critères de classification s'intéressant particulièrement à l'état de conscience ont été établis par le World Health Organisation Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury pour identifier et classer le TCCL (Carroll et al., 2004). Ces recommandations utilisaient l'échelle de

Glasgow pour quantifier l'état de conscience simplement et rapidement lors des premiers moments de l'examen clinique (Teasdale et al., 2014). En se fiant aux réponses oculaire, verbale et motrice suite à une commande ou un stimulus, un score est établi et permet de subdiviser les TCC entre léger (13-15 points), modéré (9-12 points) et grave (3-8 points) (Hawryluk et al., 2015; Teasdale et al., 2014). À ceci s'ajoutait quelques critères symptomatiques (perte de conscience, amnésie post-traumatique, altération de l'état de conscience et déficits neurologiques transitoires) pour distinguer le TCCL des autres TCC (Carroll et al., 2004). Toutefois, les manifestations du TCCL sont très variées, ce qui limite l'efficacité d'un système de classification qui accorde beaucoup d'importance à l'état de conscience (INESS, 2018). Habituellement, les patients présentent des symptômes affectant quatre domaines soit : cognitif, physique, affectif et liés au sommeil (Tableau 1) (Asken et al., 2017) qui apparaissent la plupart du temps rapidement (McCrory et al., 2017). C'est pourquoi plusieurs organismes tel que l'Institut nationale d'excellence en santé et en services sociaux du Québec (INESS) ont mis à jour leurs critères pour définir le TCCL comme un traumatisme crânien causant l'apparition d'une ou de plusieurs des composantes cliniques suivantes (INESS, 2018) :

1. Symptômes cliniques – somatiques (ex. : céphalées), cognitifs (ex. : avoir l'impression d'être dans un brouillard) et/ou émotionnels (ex. : humeur labile);
2. Signes physiques (ex. : perte de conscience, amnésie);
3. Changements comportementaux (ex. : irritabilité);
4. Déficits cognitifs (ex. : temps de réaction diminué);
5. Troubles du sommeil (ex. : insomnie).

La chronologie symptomatologique caractéristique se compose des quatre étapes suivantes : 1) brève altération de l'état de conscience et/ou des fonctions neurologiques (ex. vitesse de traitement d'information), 2) symptômes physiques (ex. céphalée, étourdissement, vertige, fatigue, etc.), 3) troubles cognitifs principalement en multitâches (ex. mémoire à court terme, attention et concentration) et 4) changements caractériels et émotionnels (ex. anxiété, tristesse, dépression, etc.) (Bigler, 2008). Cependant, pour certains, les principaux effets peuvent prendre quelques minutes à quelques heures avant d'être ressentis (McCrory et al., 2017).

Tableau 1 : Quatre domaines symptomatologiques du TCCL
Adapté de Asken et al. (2017)

Cognitif	Physique	Affectif	Sommeil
Sentiment d'être au ralenti Difficulté à se concentrer Problème de mémoire Confusion	Maux de tête Nausée Vomissement Vertige Troubles d'équilibre Sensibilité à la lumière Sensibilité au bruit Problèmes visuels Engourdissements ou picotements	Irritabilité Anxiété Sentimentalité Tristesse	Fatigue Difficulté à s'endormir Manque de sommeil Excès de sommeil Somnolence

1.2 Épidémiologie

Le TCCL est reconnu en tant que problème de santé publique depuis le début du XXI^e siècle ce qui entraîna une prise de conscience des institutions sportives et publiques (Wiebe et al., 2011). Récemment, son incidence annuelle à l'échelle mondiale a été

estimée à 319 par 100 000 personnes-années (Nguyen et al., 2016) ce qui est plus du double que le nombre de crises cardiaques annuelles qui est évalué à 150,5 par 100 000 personnes-années (Avan et al., 2017). Dans la population canadienne, il y a eu 8 254 admissions à l'hôpital suite à un TCCL lors d'activités de loisirs ou sportives de 2011 à 2018. Les groupes d'âges démontrant une prévalence plus élevée dans cette population sont les adolescents de 10-14 ans (14,2 hospitalisations:100 000 personnes) et 15 à 19 ans (10,6 :100 000) alors que les jeunes adultes de 20-29 ans présentaient une prévalence plus réduite (3,1 :100 000) bien que supérieure aux tranches d'âge suivantes (PHAC, 2020). La même tendance est observée au Québec alors que l'incidence annuelle de TCCL de toute cause dépassait la moyenne mondiale chez les adolescents (13 - 17 ans) en atteignant près de 500 TCCL par 100 000 personnes de 2014 à 2016 (INSPQ, 2016). La diminution progressive observée suite à l'adolescence semble être associée à une réduction de la pratique de sport organisée et des comportements à risque qui y sont associés (Bang et al., 2020).

Les athlètes universitaires, bien qu'ils soient des adultes, maintiennent un style de vie plus à risque pour le TCCL puisque leur quantité d'entraînement et leur niveau de compétition restent élevés. Une étude réalisée auprès d'athlètes de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), a démontré que lors d'une saison le TCCL était représentait 12% des blessures avec une proportion bien supérieur pour les sports d'équipes (11%) par rapport aux sports individuels (2%) (Lemoyne et al., 2017). Même constatation aux États-Unis alors qu'il y a un taux de TCCL considérable atteignant 4,5 TCCL par 10 000 heures de sport dans cette tranche de la population (Zuckerman et al., 2015) et ce, particulièrement s'ils pratiquent un sport de collision

comme le football ou un sport de contact tels le hockey et le soccer (Baldwin et al., 2018; Bang et al., 2020; Gessel et al., 2007). Pour la majorité des sports, l'occurrence du TCCL est plus grande en compétition (Zuckerman et al., 2015) à l'exception du cheerleading où les entraînements sont responsables de la majorité des blessures (Shields et al., 2009). Pour les jeunes adultes, le nombre total de TCCL est supérieur chez les hommes (Bang et al., 2020; Coronado et al., 2015; Nguyen et al., 2016) alors que le risque relatif est plus grand chez les femmes lorsqu'un même sport est comparé (Black et al., 2017; Giza et al., 2013; Zuckerman et al., 2015).

Alors que l'incidence annuelle de traumatismes crâniens associés au sport au Canada était relativement stable jusqu'en 2003, celle-ci a augmenté de près de deux fois et demie entre 2005-2006 et 2013-2014 avant de se stabiliser à nouveau au cours des dernières années (Gordon et al., 2020). Une variation comparable sur la même période fut observée aux États-Unis alors que le nombre d'admissions à l'urgence pour les TCCL sportifs a augmenté de 108% de 2001 à 2012 (Coronado et al., 2015) et que le taux de TCCL parmi les étudiants de niveau collégial est passé de 1,7 en 1988-1989 à 4,47 par 10 000 heures de pratique sportive en 2013-2014 (Zuckerman et al., 2015).

Cette augmentation du taux de TCCL peut être attribuable à la hausse historique des inscriptions au sein de programmes sportifs au cours des dernières années, à l'amélioration des formations portant sur le diagnostic et l'identification du TCCL, à la mise en place de lois et réglementations sur le retour au jeu et à une sensibilisation accrue de la population poussant plus de personnes à consulter un professionnel de la santé pour cette blessure (Baldwin et al., 2018; Coronado et al., 2015). Malgré tout, ces valeurs restent probablement sous-estimées en sachant que plusieurs des analyses

épidémiologiques sont basées sur les admissions à l'urgence alors qu'il est estimé que seulement un tiers des patients atteints de TCCL privilégieront ce milieu de soins par rapport à une clinique médicale externe (Bang et al., 2020). Il est probable que les cas les plus symptomatologiques de traumatismes crâniens soient ceux qui consultent à l'urgence ce qui limite la représentativité de ces données (Bang et al., 2020). De plus, un stigma autour de cette pathologie est maintenu entraînant un sous-diagnostic et une utilisation variable des soins de santé ce qui complique les analyses épidémiologiques (Voss et al., 2015). En effet, plusieurs athlètes subissant un TCCL admettent ne pas le mentionner à l'équipe médicale par crainte de perdre du temps de jeu ou d'entraînement (Anderson et al., 2021; McCrea et al., 2004). Bien que des programmes d'éducatons aient été développés pour sensibiliser et éduquer ceux-ci, il semble que le refus de divulguer des informations relatives à l'historique ou aux symptômes d'un TCCL ne dépende pas du niveau de connaissance de l'athlète au sujet du TCCL (Doucette et al., 2021). C'est pourquoi certaines ligues sportives comme la NFL ont des arbitres responsables d'exclure les joueurs recevant un coup pouvant occasionner un TCCL.

1.3 Physiopathologie

Dans le milieu sportif, les TCCL surviennent principalement suite à un contact de la tête ou d'une autre région du corps avec un autre joueur, l'équipement ou le sol (Zuckerman et al., 2015). Toutefois, une multitude de mécanismes peut causer un transfert de forces jusqu'à la boîte crânienne et entraîner un TCCL ce qui en complexifie considérablement l'identification (McCrory et al., 2017). Au niveau cérébral, des mécanismes par percussion directe ou par accélération ou décélération

rapide peuvent être à l'origine d'un TCCL. Ces événements sont fréquemment présents en combinaison et peuvent suivre un axe linéaire ou rotationnel qui influencera les conséquences du TCCL (Hawryluk et al., 2015; McKee et al., 2015). Le cerveau est particulièrement sensible aux forces rotationnelles qui causent généralement des symptômes plus importants (McKee et al., 2015).

Lors de l'impact initial, le cerveau accompagne le mouvement de la tête qui se verra limité par les structures cervicales ou une force externe contraire au mouvement. Ceci cause un changement de direction de la tête que le centre de masse du cerveau suit à retardement en raison de l'inertie. À ce moment, une partie de l'encéphale est comprimée contre la boîte crânienne alors que d'autres parties sont étirées en raison des tractions sur de nombreux ancrages méningés et vasculaires (Bayly et al., 2006). Toutefois, la base de l'encéphale est limitée par la fosse hypophysaire ce qui augmente les forces de traction et de cisaillement à ce niveau et augmente le risque de lésion (Bayly et al., 2006). De plus, le phénomène se complique lors d'un événement en rotation qui est plus dommageable puisque la faux du cerveau limite la mobilité entre les deux hémisphères augmentant l'étendue de la surface affectée par les forces de torsion et d'étirement, ce qui peut augmenter le temps de guérison (Vander Vorst et al., 2007).

Malgré tout, le TCCL ne cause généralement pas de changements structuraux visibles à l'aide des techniques usuelles d'imagerie chez l'humain (Chong et al., 2018). Toutefois, des études chez l'animal ont permis d'identifier des microlésions focales et diffuses au niveau cérébral permettant d'améliorer la compréhension du processus physiopathologique y étant associé (McKee et al., 2015). Ces microlésions sont

principalement localisées au niveau des commissures, le long des axones servant de connexions interhémisphériques (Bigler, 2008) ou entre la matière blanche et grise (Viano et al., 2005).

Les microlésions sont la conséquence d'une cascade neurométabolique de dix étapes (Giza et al., 2014) décrites à la Figure 1 qui débute 1) par un étirement axonal rapide. Il ne faut que 25 à 50 ms suite au TCCL (Bigler, 2008) avant que 2) le niveau synaptique de glutamate, un neurotransmetteur excitateur, s'élève considérablement. Ceci mène à son entrée massive dans le neurone et à 3) une dépolarisation membranaire majeure causant 4) un efflux de potassium ainsi qu'un influx de calcium et de sodium pendant 5 à 7 minutes en raison de la perméabilité augmentée des canaux ioniques membranaires. Pour rétablir l'équilibre, 5) les pompes calcium/potassium ATP-dépendantes s'activent, ce qui nécessite l'absorption d'importantes quantités de glucose sanguin par les mitochondries. La production d'ATP s'accompagne 6) d'une accumulation intracellulaire de radicaux libres qui semble être la source de complications à long terme puisqu'ils 7) sont délétères pour les membranes lipidiques ainsi que l'ADN. L'utilisation accrue du glucose entraîne 8) une hypoglycémie en 30 minutes qui cause de la fatigue et une altération de l'état de conscience. Il ne faudra que 9) quelques heures pour que le calcium intracellulaire élevé qui est absorbé par les mitochondries entraîne la défaillance progressive de celles-ci. La diminution locale du flot sanguin combinée à la défaillance des mitochondries contribue au développement d'une crise énergétique qui limite les fonctions cognitives de cette région et est responsable de plusieurs des troubles secondaires au TCCL. Finalement, 10) les dommages secondaires à l'étirement des axones peuvent causer une

inflammation impliquant l'activation des microglies et des troubles de connectivité neuronale progressifs qui peuvent être présents jusqu'à 30 jours post-TCCL. Ces conséquences affectent principalement les axones non myélinisés et sont associées à l'état de fragilité suivant un TCCL (Giza et al., 2014; Graham et al., 2014).

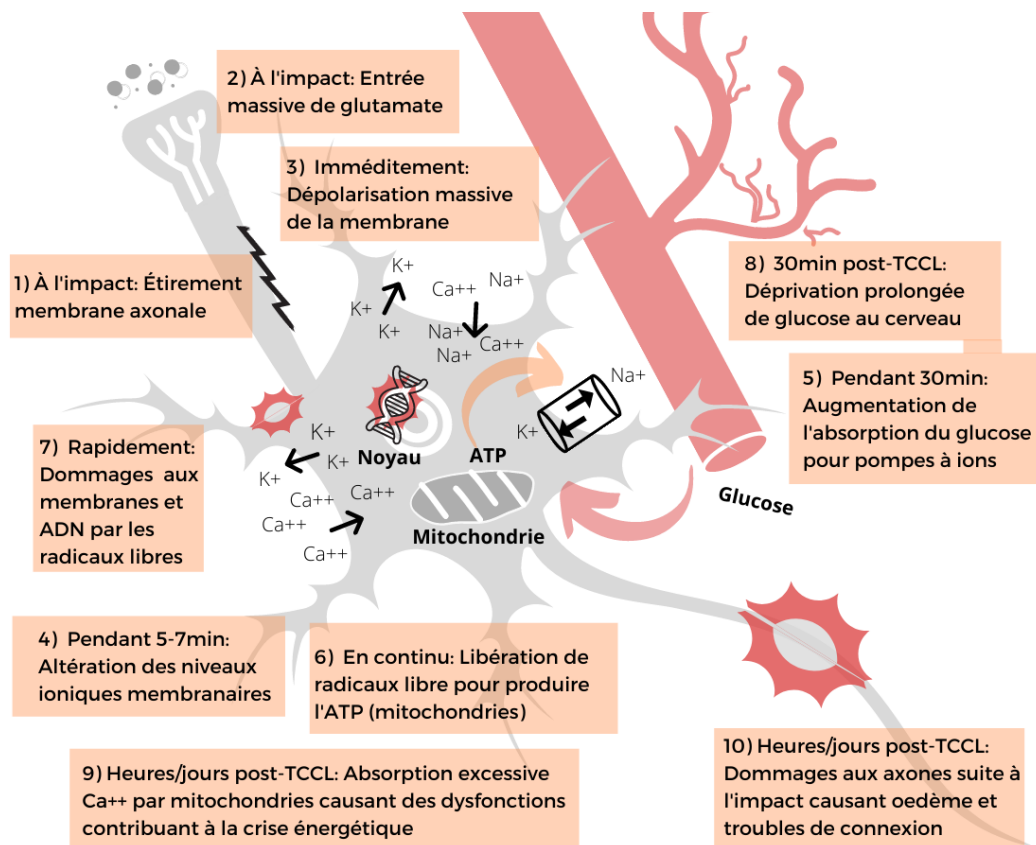


Figure 1 : Cascade neurométabolique du TCCL
Adapté de Giza *et al.* (2001); Giza *et al.* (2014)

1.4 Pronostic et complications

La cascade neurométabolique secondaire au TCCL place le cerveau en position de vulnérabilité tant qu'un retour à l'équilibre lors de la guérison ne soit pas atteint. Lors des premiers jours suivants la blessure, le syndrome du second impact, bien qu'il soit rare, est la principale complication à considérer (Giza et al., 2014). Celui-ci se présente lorsqu'un deuxième traumatisme crânien a lieu avant la rémission de l'épisode

précédent (Giza et al., 2014). Les complications sont généralement plus importantes que lors du premier impact (Graham et al., 2014) et peuvent varier d'une augmentation rapide des symptômes préléSIONNELS à un œdème cérébral potentiellement mortel (McKee et al., 2015; McLendon et al., 2016). Ce type de blessure subséquente est d'une grande importance pour l'équipe de soins puisqu'un athlète post-TCCL a un risque trois fois plus élevé d'en subir un second lors de la même saison que ses coéquipiers sains (Gardner et al., 2019).

Au-delà des complications à court terme, certains patients sont plutôt à risque de voir leur rémission s'étirer dans le temps. Cette complication chronique du TCCL, nommé syndrome post-commotionnel, affecte 10% à 30% des individus (Hou et al., 2012; Permenter et al., 2021) et se manifeste par la persistance des symptômes et des affections cognitives pour une période supérieure à un ou trois mois selon les auteurs (American Psychiatric Association, 2013; Permenter et al., 2021; World Health Organisation, 2012). Comme pour le TCCL, la présentation clinique du syndrome post-commotionnel est composée de nombreux symptômes somatiques et cognitifs non spécifiques sauf que la propension aux troubles d'ordres psychologiques est augmentée (American Psychiatric Association, 2013; Bigler, 2008; Leddy et al., 2012; Permenter et al., 2021). Le diagnostic repose sur la présence de symptômes modérés dans au moins trois domaines différents, tel que présenté au tableau 1, au-delà de temps attendu de récupération (Iverson et al., 2021).

Chez les athlètes adultes, il est attendu que la récupération normale d'un TCCL prenne de 10 à 14 jours (McCrory et al., 2017). Toutefois, la présence de symptômes autorapportés représente le principal critère de rémission pour établir ce pronostic.

Cette méthode risque de sous-représenter le problème puisque certaines affections cognitives se rétablissent tardivement par rapport aux symptômes (McCrea et al., 2013; McInnes et al., 2017). C'est pourquoi les standards de guérisons de la population athlétique ne se limitent pas à l'absence de symptômes (Doolan et al., 2012). Ce dernier point est important pour les athlètes qui se doivent de retourner à un niveau de compétences élevé tant sur le plan physique, cognitif que psychologique pour revenir sécuritairement à leur sport avec un bon niveau de performance. En ce sens, une étude récente rapportait qu'aussi peu que 45% des athlètes atteignaient les objectifs de retour au jeu en 14 jours alors qu'après un mois cette proportion augmentait à 77% (Kara et al., 2020). Ces résultats sont en accord avec des revues de littérature statuant que la rémission complète d'un TCCL sportif prend de quelques jours à un mois (Cancelliere et al., 2014; Haider et al., 2018; McInnes et al., 2017). Certains facteurs semblent prédisposer à une rémission prolongée tels un historique de multiples TCCL (Cancelliere et al., 2014; Guskiewicz et al., 2007), une amnésie post-traumatique (McCrea et al., 2013), une symptomatologie élevée tout de suite après le trauma (McCrea et al., 2013; Lau et al., 2011), une prise en charge clinique tardive (Kara et al., 2020), un diagnostic antérieur de migraines (Zemek et al., 2016), des facteurs psychologiques comme la dépression (Cassidy et al., 2014), l'anxiété (Cancelliere et al., 2014; Leddy et al., 2012) ou une pensée extrémiste de type « tout ou rien » (Leddy et al., 2012) et de façon plus variable, le sexe féminin (Black et al., 2017; Cancelliere et al., 2014; Kara et al., 2020; Zemek et al., 2016).

Une piste d'explication supplémentaire pour le délai prolongé d'atteinte des objectifs de retour au sport provient du fait que les fonctions cognitives reviennent à la normale

tardivement par rapport aux fonctions physiques (McCrea et al., 2013; McInnes et al., 2017). Lors du premier mois suivant le TCCL, les athlètes démontrent une diminution de l'habilité à exécuter des actions complexes telles la réaction d'évitement lors de mouvements pouvant mener à une collision au niveau de la tête (Eckner et al., 2011), l'évitement d'obstacles au sol (Catena et al., 2009) et la réalisation de doubles tâches (Fait et al., 2013; Urban et al., 2017). Également, il a été démontré que des fonctions cognitives plus primaires permettant d'interagir avec l'environnement peuvent être affecté par le TCCL. Plus précisément, l'attention multifocale (Milleville-Pennel et al., 2010), l'attention sélective (Mathias et al., 2004), le temps de réaction (Eckner et al., 2014; Mathias et al., 2004) ainsi que l'exploration visuelle (Catena et al., 2009; Milleville-Pennel et al., 2010) seraient réduits plusieurs semaines suite au traumatisme. Parmi celles-ci, les capacités cérébrales perceptivo-cognitives permettant l'exécution de tâches intégrant plusieurs stimuli semblent être les dernières à se rétablir (Mathias et al., 2004). Ces capacités sont mises à profit lorsque l'attention est utilisée de façon *top-down* ou orientée vers un but afin de suivre ou de rechercher des informations spécifiques au contexte afin de bien compléter la tâche en cours (Bressler et al., 2008). L'attention *top-down* est généralement opposée à l'attention *bottom-up* ou mené par les stimuli afin de réagir rapidement à un nouvel événement (Schreij et al., 2008). Bien que les deux types d'attention soient importantes, dans un contexte sportif c'est l'attention *top-down* qui exige le plus de ressources en continu puisque l'athlète décide à surveiller continuellement certaines informations prioritaires (ex. position du ballon, déplacement de l'équipe adverse, signaux des membres de son équipe, etc.) (Carrasco et al., 2011). Un tel niveau d'attention à l'environnement peut être délétère pour un individu dont la capacité d'intégration de

nombreux stimuli est affectée comme c'est le cas suite à un TCCL. En contexte sportif, les demandes à ce niveau sont fréquentes et essentielles pour suivre le déroulement de la partie, réagir adéquatement aux actions des adversaires, éviter les collisions et bien performer.

2. Diagnostic du traumatisme craniocérébral léger

2.1 Processus diagnostic

Pour assurer le traitement approprié, un athlète doit recevoir un diagnostic peu de temps après la survenue du TCCL. Par mesure de sécurité, la meilleure intervention consiste à retirer préventivement un athlète lorsqu'il subit un impact susceptible de causer un TCCL (McCrory et al., 2017). Cette période de retrait s'étend généralement jusqu'au lendemain puisque certains athlètes développent des symptômes à retardement (McCrory et al., 2017) en raison du développement progressif de la cascade neurométabolique (Giza et al., 2014). Pour s'assurer qu'il n'y a pas de détérioration des affections associées au TCCL, les professionnels de la santé se doivent d'effectuer une évaluation multimodale dès les premiers moments et de réévaluer l'athlète toutes les 30 minutes jusqu'à une stabilisation de la condition 48 à 72 heures suite au traumatisme (Hyden et al., 2016; McCrory et al., 2017). Il faut s'attendre à une atteinte variable des quatre domaines symptomatiques du TCCL (cognitif, physique, affectif et liés au sommeil) d'où la nécessité d'utiliser des outils d'évaluations diversifiés (Asken et al., 2017). Cette approche est essentielle du fait que malgré l'émergence de procédures expérimentales se basant sur des biomarqueurs et de l'imagerie avancée il n'existe pas, à ce jour, de test unique apte à diagnostiquer

le TCCL (Graham et al., 2014; McCrory et al., 2017; McKee et al., 2015; Najem et al., 2018). Ainsi, les professionnels de la santé doivent se fier aux résultats de différents tests et à leur suspicion clinique de TCCL lorsqu'un coup direct ou indirect à la tête est associé à des symptômes (Hyden et al., 2016). Une batterie d'évaluation complète devrait inclure les fonctions neurocognitives, fonctions oculomotrices, le rachis cervical, les signes et symptômes, les nerfs crâniens et périphériques, l'équilibre ainsi que l'exécution de tâches motrices complexes (McCrory et al., 2017). En raison des risques associés à une mauvaise prise en charge, les tests composant cette batterie d'évaluations se doivent de respecter certains critères de qualité :

- Validité de construit : capacité réelle d'un test à évaluer des capacités ou fonctions précises comme il le prétend (Strauss et al., 2009). Dans le contexte du TCCL, il est important que les tests sélectionnés le soient et qu'ils évaluent une variété d'atteintes pouvant se manifester à court terme ainsi qu'à plus long terme dans le continuum de guérison.
- Sensibilité : aptitude d'un test à reconnaître la pathologie pour laquelle il est conçu (Altman et al., 1994). Généralement exprimée en pourcentage, la sensibilité indique la probabilité d'obtenir un résultat de test positif chez les athlètes ayant subi un TCCL.
- Spécificité : aptitude d'un test à reconnaître l'absence de la pathologie pour laquelle il est conçu (Altman et al., 1994). Exprimé en pourcentage, la spécificité indique la probabilité d'obtenir un résultat de test négatif chez les athlètes n'ayant pas subi de TCCL.

- Précision de mesure : degré de précision avec lequel un test peut discriminer les résultats entre différentes prises de mesure. Un résultat au degré de précision élevé n'offrant pas toujours plus d'information, c'est le changement minimal détecté (MDC) qui est d'intérêt clinique. Le MDC correspond au plus petit degré de changement détecté par un test qui n'est pas attribuable à une erreur de mesure (Beaton et al., 2001). Un petit MDC par rapport aux résultats moyens au test indique une bonne précision de mesure lors de l'utilisation clinique.
- Fiabilité test-retest: cohérence entre les scores obtenus à partir d'un test. En l'absence d'un TCCL, les résultats d'un athlète ne devraient pas significativement varier entre les périodes de réévaluation. Une différence significative des résultats sans qu'un TCCL se soit produit indique une erreur de mesure et réduit le niveau de fiabilité d'un test (Farnsworth et al., 2017). Généralement, bien que non-exclusivement, mesuré par le coefficient de corrélation intraclass (CCI) la fiabilité est classifiée par Baumgartner et al. (2015) comme inférieure à la moyenne acceptable de 0,70 à 0,79; dans la moyenne acceptable de 0,80 à 0,89 et supérieure à la moyenne acceptable de 0,9 à 1,0. Il n'y a pas de consensus quant à l'intervalle test-retest idéal (Harmon et al., 2013) bien qu'en contexte sportif il soit de convenance que les résultats restent fiables pour une saison complète (Tsushima et al., 2016).

Il n'y a pas de standards généralisés pour évaluer la sensibilité et la spécificité d'un test diagnostic puisque l'importance accordée à ces deux critères dépend du contexte. De plus, la sensibilité et la spécificité sont inversement proportionnelles ce qui signifie

qu'un test très sensible réussira à identifier la majorité des personnes ayant la pathologie bien que cela puisse mener à l'obtention de faux positifs parmi des individus n'ayant pas la pathologie qui ont obtenu un résultat en dehors des normes du test. Il en va de même pour un test très spécifique qui risque de manquer quelques cas de la pathologie qui seront des faux négatifs bien qu'il soit excellent pour éviter les faux-positifs (Parihk et al., 2008). Dans le contexte d'évaluation du TCCL, il est proposé que des valeurs supérieures à 80% indique un niveau acceptable de sensibilité et de spécificité (Resch, 2016).

Lorsqu'un test est utilisé pour une condition de santé telle que le TCCL, des critères normatifs sont proposés afin d'aider les cliniciens à identifier les résultats indicateurs de la pathologie ainsi que ceux qui signifient un état de normalité. Ces critères d'une grande importance pour les cliniciens sont obtenus à partir des résultats moyens de l'ensemble de la population et sont généralisées ou précisées pour certaines sous-catégories (âge, sexe, maladie, sport, etc.). Bien que pratique, l'utilisation de critères normatives est associée à un intervalle de confiance plus large des résultats acceptés comme « normaux » et une plus grande probabilité de faux positifs (Schatz et al., 2014). Ceci représente un défi important puisque les athlètes, suite au processus de spécialisation sportive, démontrent des habiletés physiques et cognitives qui les distinguent à la fois de la population générale (Mangine et al., 2014) et des athlètes d'autres disciplines (Sandel et al., 2018). Pour que les tests de diagnostic et de suivi post-TCCL soient le mieux adaptés à la réalité de chaque athlète, il est recommandé de procéder à des évaluations comparatives de référence en présaison (Lovell et al., 2001; Schatz et al., 2014). Cette méthode permet à chaque athlète d'être son propre

contrôle et offre un aperçu de l'état « normal » de celui-ci. Cependant, il n'y a pas de lignes directrices cohérentes au sujet de la fréquence à laquelle ces évaluations de références doivent être mises à jour (Elbin et al., 2011). Les recommandations varient considérablement pour la population universitaire alors que certains chercheurs suggèrent qu'elles devraient être réadministrées annuellement (Houston et al., 2021) et d'autres ne recommandent qu'une évaluation lors de l'intégration au sein de l'équipe au début de la carrière collégiale aux États-Unis (Broglia et al., 2018). Pour leur part, les auteurs du consensus de Berlin au sujet de la gestion des commotions cérébrales dans le sport ont considéré que les évaluations de référence en présaison représentent une avenue intéressante pour ajouter des informations à l'interprétation des résultats post-TCCL bien que leur utilisation ne nécessite pas d'être considéré comme un élément obligatoire de chaque évaluation (McCrory et al., 2017). Tout de même, la mise en place d'évaluations de présaison n'est pas à prendre à la légère lorsque l'on considère le risque d'obtenir des scores invalides en raison d'erreurs ou de sous-performance volontaire des athlètes (Tsushima et al., 2021) et les ressources considérables qui doivent être déployées pour bien structurer ce processus (Broglia et al., 2018). À cet égard, malgré certaines différences entre les institutions québécoises le sport universitaire se distingue par la présence d'une meilleure structure d'encadrement des athlètes qu'aux niveaux inférieurs et dispose de plus d'effectifs pour implanter un programme d'évaluations de présaison spécifique au TCCL.

2.2 Outils de diagnostic

Il est important de bien sélectionner les tests qui compléteront la batterie d'évaluations multimodales du TCCL afin de s'assurer qu'ils servent bien les besoins du milieu au

sein duquel ils seront utilisés. Par exemple, certains tests sont plus utiles lors de l'évaluation aiguë du TCCL puisqu'ils ont une bonne sensibilité et s'utilisent sur le terrain alors que d'autres tests plus spécifiques sont utilisés en clinique afin de dépister les déficits pouvant persister lors au cours de la guérison.

Afin de structurer un processus d'évaluation qui doit couvrir autant d'aspects différents, des outils de diagnostic multimodaux ont été développés. Parmi les plus répandu on retrouve le Sport Concussion Assessment Tool (Echemendia et al., 2017), le World Rugby Head Injury Assessment Screening Tool (Fuller et al., 2020) et le C3-Logix (Bernstein et al., 2019). Ces outils ont pour avantages de simplifier leur implantation puisque toutes les étapes s'effectuent sur la même plateforme, de permettre une analyse globale ainsi que spécifique à chaque sous-section selon des barèmes préétablis, et ce dans un temps raisonnable. Toutefois, la majorité de ces batteries d'évaluations ont été développées pour répondre à un objectif d'identification initial du TCCL (Dessy et al., 2017; Echemendia et al., 2017; McGeown et al., 2019). Ainsi, l'importance accordée aux fonctions neurocognitives complexes est réduite pour favoriser l'apport des questionnaires de symptômes et des épreuves physiques (ex. équilibre statique) ainsi que cognitives (ex. mémoire différée de mots, temps de réaction) plus simples. Pour cette raison, ces outils servent fréquemment de première ligne d'évaluation suite au TCCL alors que des tests plus exigeants sont effectués une fois le diagnostic confirmé et tout au long de la rémission. Ce mémoire s'intéresse aux évaluations neurocognitives effectuées suite au dépistage sur le terrain et discutera des questionnaires de symptômes qui les accompagnent.

2.3 Questionnaires de symptômes

Les symptômes sont régulièrement investigués à l'aide de questionnaires en raison de leur faible coût et de leur simplicité. Ceux-ci prennent la forme de listes dont chaque élément représente un symptôme fréquemment associé au TCCL. L'athlète indique lui-même la présence et l'intensité de chaque symptôme ce qui permet d'obtenir un score comparable dans le temps. Par exemple, un questionnaire fréquemment utilisé est le Post-Concussion Symptom Scale (PCSS) qui utilise le score cumulé de 22 symptômes que l'athlète cote en termes d'intensité selon une échelle de Likert de 0 à 6 (0 = absent; 6 = sévère). Le PCSS a une fiabilité interne élevée (Dessy et al., 2017; Graham et al., 2014; Sinnott et al., 2019) et identifie les athlètes à risque d'avoir une rémission prolongée post-TCCL avec une sensibilité de 40,8% et une spécificité de 79,3% (Lau et al., 2011). Pour répondre à la variété des présentations cliniques et des contextes d'intervention, une grande quantité de questionnaires spécifiques au TCCL ont été développés (Doolan et al., 2012) causant une inconstance dans l'interprétation des résultats (Feddermann-Demont et al., 2017). Une faiblesse inhérente à tous les questionnaires est l'utilisation de mesures autorapportées puisque jusqu'au tiers des athlètes omettent involontairement de mentionner des symptômes (Broglio et al., 2009) et que d'autres faussent leurs réponses volontairement, d'où l'importance de ne pas les utiliser seuls (Dessy et al., 2017; Doolan et al., 2012).

2.4 Évaluations neurocognitives

Tel que mentionné précédemment, le TCCL est une pathologie cérébrale qui peut affecter une grande variété de fonctions neurocognitives lors des jours ou des semaines suivant le traumatisme (Giza et al., 2014). Il devient alors impératif pour les

professionnels de la santé de mesurer ces différentes atteintes neurocognitives avec un maximum de spécificité. De ce fait, différentes alternatives ont été développées pour investiguer la mémoire, l'attention, le fonctionnement exécutif, le langage et la perception visuelle (McMilla et al., 2013). Ces capacités cognitives seraient un reflet du fonctionnement et de l'état de santé cérébral pouvant orienter le diagnostic et la prise en charge en cas de TCCL (Giza et al., 2014; Ruff et al., 2009). Généralement, il s'agit de tests évaluant la performance lors de tâches nécessitant l'utilisation de fonctions neurocognitives précises sans toutefois mesurer directement l'activité cérébrale. En l'absence de mesure directe de la fonction cérébrale qui ne soit onéreuse ou encore en développement, ces mesures indirectes représentent la meilleure avenue pour les professionnels de la santé (Makdissi et al., 2010). Ce domaine d'étude étant encore en évolution, l'utilisation d'évaluations neurocognitives diversifiées est recommandée et de nouvelles méthodes sont fréquemment proposées puisqu'un consensus au sujet des meilleures combinaisons de tests est toujours attendu (Giza et al., 2013; Lee et al., 2019).

Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT)

L'ImPACT (ImPACT Applications Inc., Coralville É.-U.) est le programme d'évaluation neurocognitive informatisé pour le TCCL le plus utilisé et étudié en évaluation neurocognitive sur ordinateur des TCCL en Amérique du Nord tant dans le milieu sportif que clinique (Dessy et al., 2017). L'évaluation d'une durée de 30 minutes débute par le PCSS comme questionnaire de symptômes. Ensuite, le patient complète six modules d'évaluations neuropsychologiques dans l'ordre suivant : 1) mémoire des mots; 2) mémoire des dessins; 3) X's et O's; 4) correspondance de

symboles; 5) correspondances de couleurs; 6) trois lettres et la reprise différée des deux tests de mémoire initiaux (ImPACT Applications, 2021). Il est possible d'obtenir les résultats bruts de ces tests bien que l'ImPACT est conçu pour être interprété selon des scores composites qui sont calculé à l'aide d'informations provenant de plusieurs modules. Les cinq scores composites sont les suivants : 1) mémoire verbale; 2) mémoire visuelle; 3) vitesse de traitement visuel; 4) temps de réaction et 5) index d'efficacité cognitive (Shuttleworth-Edwards et al., 2013). La validité de construit a été évaluée à plusieurs reprises confirmant la bonne structure du test à l'égard des fonctions cognitives qu'il évalut (Graham et al., 2014). Il en va de même pour l'efficacité de l'ImPACT afin de remplacer les évaluations cognitives classiques sur papier qui sont généralement plus longues ou qui explorent des capacités cognitives moins diversifiées (Haider et al., 2018).

Les scores composites peuvent être utilisés afin de comparer l'évolution des performances cognitives du participant par rapport à son groupe d'âge ou dans le temps. Lorsqu'il n'y a pas de mesure de référence, les résultats de l'ImPACT sont présentés en percentile afin de comparer le participant. D'après un barème produit par le manufacturier, il est possible d'extrapoler le résultat attendu chez un participant selon ses performances scolaires, par exemple l'obtention régulière de A ou de B serait associée à des performances au-delà du 65^e percentile (ImPACT Applications, 2021). Pour détecter la présence de déficits secondaires au TCCL à partir des valeurs normatives, une valeur plancher est déterminé à 1,0 ou 1,5 écart-type de la moyenne du groupe d'âge du participant (Schatz et al., 2014). Bien que ces normes de références soient disponibles, il est recommandé d'utiliser une valeur de référence individuelle,

prise en présaison par exemple, à titre de comparatif afin de suivre l'état cognitif du participant aux différentes étapes de sa guérison du TCCL (Higgins et al., 2017; Schatz et al., 2014). En effet, les athlètes « au-dessus de la moyenne » performant particulièrement bien à l'ImPACT ce qui cause une mauvaise classification post-TCCL de 52 à 54% d'entre eux lorsque les valeurs de références par groupe d'âge sont utilisées au lieu d'un contrôle individuel (Schatz et al., 2014). Lors de l'obtention des résultats d'une seconde évaluation avec l'ImPACT le logiciel met en évidence les scores composites ayant progressé négativement d'un niveau excédant l'indice de changement fiable, reliable change index en anglais, de 90% par rapport à la performance antérieure (ImPACT Applications, 2021). Dans le cas du TCCL, la règle clinique stipule qu'une réduction de performance au-delà de l'indice de changement fiable à deux des cinq scores indique la présence de troubles cognitifs secondaires à la pathologie (Alsalaheen et al., 2016). Nelson et al. (2016), ont démontré que le taux de faux positifs diminuait à 4,8–10,8 % lorsque ce critère est appliqué par rapport à un taux de faux positifs de 29,6–42,7 % lorsqu'une baisse d'un seul score ImPACT est le critère minimal.

Les évidences actuelles indiquent que la fiabilité test-retest de l'ImPACT lorsque mesuré par le CCI maintient un niveau modéré (0.50-0.75) à court terme (Iverson et al., 2003; Schatz et al., 2010) et jusqu'à une période de deux ans tant que les conditions d'évaluation sont semblables (Schatz et al., 2010; Tsushima et al., 2016). Bien que les niveaux de fiabilités test-retest ne soient pas de niveau élevé, ils se comparent favorablement aux autres outils d'évaluation neurocognitifs pour le TCCL (Houston et al., 2020) démontrant la difficulté de mettre au point un tel test. Fait intéressant, la

fiabilité des évaluations faites en présaison avec l'ImPACT ne serait pas réduite au cours d'une saison par la pratique de sport de contact tel le football américain bien que les athlètes puissent subir jusqu'à trois impacts sous-commotionnels par partie (Miller et al., 2007). De plus, les expositions rapprochées dans le temps, seulement un mois, semblent avoir peu d'effet sur la majorité des scores composites. C'est la conclusion d'une étude menée auprès de 25 étudiants universitaires qui observa une amélioration significative de la vitesse motrice visuelle et une absence d'effet de pratique sur les résultats de mémoire et de temps de réaction (Schatz et al., 2013). Cette information ajoute un justificatif supplémentaire pour l'utilisation d'un critère diagnostic impliquant la variation de deux scores composites.

D'après une récente méta-analyse (Dessy et al, 2017), l'efficacité de l'ImPACT est élevée pour évaluer des athlètes ayant subi un TCCL en phase aigüe. Les auteurs concluent que lors des premiers jours, sa sensibilité est de 81,9-91,4 % et sa spécificité de 69,1-89,4 % (Dessy et al., 2017). Lors de cette période initiale, les athlètes post-TCCL seraient jusqu'à 47 fois plus susceptibles d'avoir au moins deux baisses de résultats parmi les cinq scores composites lorsque comparés à des athlètes sans TCCL (Iverson et al., 2003). Lorsque l'ImPACT est utilisé au sein d'une batterie de tests comprenant également des évaluations du contrôle postural et des symptômes autorapportés, son efficacité diagnostic peut atteindre jusqu'à 91,7 % (Broglia et al., 2007). Cependant, son efficacité diminue progressivement comme démontré par une augmentation considérable du nombre de faux positifs au-delà de la première semaine post-TCCL (Kontos et al., 2014). En ce sens, les évidences actuelles au sujet de

l'utilité de l'ImPACT au-delà de la résolution des symptômes de TCCL sont limitées et peu concluantes (Alsalaheen et al., 2016).

Neurotracker

Afin de compléter les outils d'évaluation actuels, des chercheurs se sont intéressés à l'adaptation d'une tâche bien connue le multiple object tracking (MOT) ou suivi de cibles multiples en traduction libre (Faubert et al., 2012). Les tâches MOT ont été développés par Pylyshyn et Storm (1988) qui avaient observé que la capacité d'un individu à suivre différentes cibles en mouvement au travers de distracteurs dépend d'un mécanisme d'indexation visuelle subconscient. Cette habilité est dépendante de la mise en commun de différentes fonctions neurocognitives telles que le déplacement dynamique de l'attention (Lovett et al., 2019), la division multifocale de l'attention (Cavanagh et al., 2005) et la mémoire spatiale (Zhang et al., 2010). Ce processus d'indexation visuelle subconscient s'effectue sur l'ensemble du champ visuel utile, un élément intéressant puisqu'il a été démontré que le niveau d'aptitude dépend de la répartition des exigences (ex. nombre de cibles s'y retrouvant simultanément) entre les deux hémisphères visuels ainsi que des fonctions d'intégration visuelle interhémisphériques (Holcombe et al., 2013). Ceci indique que l'évaluation par MOT permet de mettre en relation des processus attentionnels complexes avec des capacités de perception visuelles auxquels ce mémoire référera en tant que capacités perceptivo-cognitives. Ces capacités sont mises à contribution tant lors de la vie quotidienne (ex. rechercher une personne dans une foule, retrouver un objet dans une pièce encombrée, etc.) que pendant la pratique sportive (ex. lancer le ballon à un receveur tout en surveillant les autres joueurs, être gardien de but, etc.).

Plus récemment, le Neurotracker (Cognisens Inc., Montréal, Canada), un système de suivi de cibles multiples en trois-dimensions (3D-MOT) a été proposé afin d'améliorer le suivi des athlètes suite à un TCCL (Faubert et al., 2012). Initialement développé pour améliorer les performances sportives, le Neurotracker a pour objectif de reproduire une partie des demandes perceptivo-cognitives de la pratique sportive sous forme d'un test dynamique sans valeur plafond (Faubert et al., 2012). Le Neurotracker représente une innovation intéressante dans le contexte du TCCL de par sa conception qui combine de façon adaptable le MOT, la vue stéréoscopique en 3D, l'étendue du champ visuel et la vitesse de déplacement des cibles (Faubert et al., 2012). Habituellement, seule la vitesse de déplacement est modifiée lors d'une même séance d'évaluation afin de suivre les capacités de l'athlète avec précision. Au terme d'une répétition prédéterminée de la tâche 3D-MOT, un seuil de vitesse est établi. Celui-ci correspond à la vitesse maximale en m/s à laquelle le participant accomplit avec succès le suivi des cibles mobiles (balles) au travers d'un lot de distracteurs d'apparence similaire (Faubert et al., 2012). Il a été démontré que l'amélioration est prévisible selon une fonction logarithmique lors d'expositions répétées dans une population d'athlètes en santé et reflète une amélioration des fonctions neurocognitives qui y sont associées (Faubert et al., 2012).

Il est proposé que les aptitudes au 3D-MOT permettent de distinguer la performance entre des individus réalisant une tâche ou un sport nécessitant une capacité d'indexation visuelle élevée. Par exemple, une étude a comparé les performances lors d'une tâche MOT entre des joueurs de basketball élités, intermédiaires et des non-joueurs. Le groupes d'élite était nettement supérieur alors que les deux autres groupes

étaient similaires (Qiu et al., 2018). Des résultats similaires ont été obtenus au sein d'une cohorte multisport (soccer, hockey et rugby) alors que les athlètes professionnels performaient significativement mieux par rapport aux athlètes amateurs de haut niveau qui eux-mêmes se démarquaient significativement d'un groupe d'étudiants non-athlètes (Faubert, 2013). Ces aptitudes semblent se transposer dans le milieu sportif puisque parmi un échantillon de joueurs de la National Basketball Association ceux démontrant le plus d'aptitudes au Neurotracker avaient moins tendances à commettre des erreurs sur le terrain (ex. passes manquées, revirements) (Mangine et al., 2014.) Il a également été démontré que les étudiants en médecine performant mieux au Neurotracker était les plus précis lors d'une simulation de laparoscopie ce qui démontre potentiellement des capacités attentionnelles supérieures puisqu'une laparoscopie nécessite une acquisition limitée d'informations visuelles (Harenberg et al., 2016) . Il est proposé qu'une augmentation des capacités au MOT permettrait de réduire la charge attentionnelle pendant l'exécution d'une telle activité (Pylyshyn, 2003) et que les capacités perceptivo-cognitives associées à cette tâche s'améliorent lors d'expositions répétées (Faubert et al., 2012). Toutefois, la littérature est encore limitée à ce sujet et les auteurs d'une récente par revue systématique sur le sujet ont constaté de nombreuses études de faible qualité méthodologique (Vater et al., 2021). Selon les évidences actuelles, il semble que le développement de l'attention soit transférable du Neurotracker à d'autres types d'évaluations alors que ce phénomène n'est pas observé pour le suivi de mouvements, la mémoire de travail et les performances sportives (Vater et al., 2021).

Bien que dans ces débuts et basées sur des études comportant certaines limitations, la recherche au sujet de l'utilité du Neurotracker en présence d'un TCCL met en évidence son potentiel au sein d'une évaluation multimodale. Une étude auprès d'athlètes professionnels évalués 48 h après le traumatisme ainsi qu'au moment du retour au jeu a démontré que le 3D-MOT présente une meilleure corrélation avec les symptômes que les tests d'équilibre et pourrait être un marqueur de récupération tout au long du processus de guérison (Chermann et al., 2018). Des résultats comparables soutiennent que de faibles performances au Neurotracker sont associées avec un niveau de symptomatologie élevé suite à un TCCL chez les 13 à 73 ans (Lysenko-Martin et al., 2020). Les auteurs de cette étude déclarent avoir développé une règle de prédiction utilisant uniquement le Neurotracker comme outil d'évaluation qui serait efficace à 95,2% pour distinguer les cas de TCCL symptomatiques des cas présentant des antécédents de TCCL sans symptômes actuels et des cas sans antécédents de TCCL plusieurs mois ou années après la blessure la plus récente. Leurs trois critères sont les suivants : 1) scores 3D-MOT supérieur ou inférieur à 1,2 m/s; 2) l'âge et 3) les antécédents de TCCL (Lysenko-Martin et al., 2020). Ces critères sont encore en attente de validation externe. Des études pédiatriques post-TCCL ont aussi démontré que les fonctions perceptivo-cognitives mesurées à l'aide d'un appareil 3D-MOT pourraient être un marqueur de récupération cérébrale dans cette population (Corbin-Berrigan et al., 2020a). Chez des enfants de moins de 13 ans ayant des antécédents de TCCL, la performance au Neurotracker est positivement associée aux fonctions cognitives et à l'équilibre et négativement à la gravité des symptômes (Lysenko-Martin et al., 2020). Lorsque plusieurs sessions sont réalisées après le diagnostic, un retard d'apprentissage initial a été noté de la première à la deuxième visite (0,06 % vs 33 %) entre un groupe

post-TCCL asymptomatique et un groupe contrôle (Corbin-Berrigan et al., 2018). Une étude du même groupe révèle l'absence d'une telle différence lorsque des enfants ayant complété un protocole structuré de retour aux activités post-TCCL sont comparés à un groupe contrôle (Corbin-Berrigan et al., 2020a). Cependant, bien que le Neurotracker puisse détecter des changements de performance suite à un TCCL aucune étude ne s'est intéressée à l'utilisation d'une valeur de référence en présaison ce qui permettrait d'obtenir un suivi plus précis des fonctions perceptivo-cognitives en cas de TCCL.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE

L'évaluation ainsi que la prise en charge du TCCL représentent un défi pour les professionnels de la santé qui doivent suivre la progression de cette condition chez l'athlète afin d'éviter les complications associées au retour au sport prématuré (Gardner et al., 2019) bien que les manifestations ne soient pas facilement objectivables. Actuellement, bien que plusieurs méthodes d'évaluation aient été proposées, aucune n'est apte à confirmer l'étendue du TCCL lorsqu'utilisée seule (Graham et al., 2014; McCrory et al., 2017; McKee et al., 2015; Najem et al., 2018). Ainsi, dans le contexte actuel, il y a encore un manque d'outils permettant d'objectiver les capacités d'un athlète suite à un TCCL et tout au long du processus de retour au sport (Dessy et al., 2017; McCrory et al., 2017).

Bien que l'évaluation et le suivi des fonctions cognitives représentent une avenue prometteuse, les cliniciens doivent pour l'instant se fier à des mesures indirectes de celles-ci (Makdissi et al., 2010). C'est pourquoi une approche multimodale est suggérée lors du diagnostic (Haider et al., 2018). Toutefois, ces investigations doivent être particulièrement sensibles, spécifiques et offrir des critères faciles d'utilisation. Comme les performances aux tests neurocognitifs sont variables entre les individus, il est préférable d'utiliser des évaluations de présaison afin d'avoir une mesure de référence fiable dans l'éventualité d'un TCCL (Lovell, 2001; Schatz et al., 2014). Toutefois, des recommandations quant à la fréquence idéale de reprise de ces évaluations de présaisons sont manquantes et inconstantes (Elbin et al., 2011). De telles recommandations ne peuvent être offertes sans connaître préalablement la fiabilité test-retest des outils diagnostics utilisés. Il est important pour le clinicien d'être assuré que les résultats obtenus lors de son évaluation sont associés à des

changements réels et qu'il ne s'agit pas d'une simple fluctuation attribuable à l'intervalle de temps entre les évaluations. Sans cette certitude, il devient superflu voir même risqué d'utiliser cet outil diagnostique puisqu'il peut influencer une modification au plan d'intervention basée sur des conclusions fautives. C'est pourquoi des études doivent préalablement être réalisées auprès de populations dont la condition est stable pour déterminer le niveau de fiabilité test-retest avant de pouvoir l'extrapoler au milieu clinique. Dans le contexte de notre étude au sujet du TCCL, cette étape de validation est essentielle puisque des déficits neurocognitifs sont recherchés en comparant les performances de l'athlète à ses résultats lors de la même évaluation en début de saison. Puisque les équipes ont tendances à être modifiée sur une base annuelle et que les études de ce type au sujet de l'ImPACT couvrent au maximum une période d'un ou deux ans, un intervalle test-retest d'un an a été sélectionné pour l'étude de ce mémoire.

Il a été rapporté que des déficits neurocognitifs parfois mineurs seraient toujours présents au-delà de la résolution des symptômes des athlètes ayant subi un TCCL (Catena et al., 2009; Fait et al., 2013; Urban et al., 2017; Van Pelt et al., 2019). Ceci soutient l'hypothèse d'une rémission physiologique retardée par rapport aux perceptions de l'athlète (McCrory et al., 2017). D'où la nécessité de bien outiller les professionnels de la santé dans le but d'éviter les complications potentielles du TCCL et de diminuer le risque de blessures subséquentes.

Face à cette problématique, le Neurotracker se présente comme une nouvelle alternative évaluant une tâche qui serait apparentée aux exigences perceptivo-cognitives du contexte sportif. Ainsi, le Neurotracker est complémentaire aux évaluations bien établies, mais plus éloignées des demandes sportives, tel l'ImPACT

qui s'effectue sur un ordinateur portable et s'intéresse à la mémoire, au temps de réaction et à la vitesse de traitement visuel. Bien que prometteur, il n'y a pas de critères spécifiques pour l'utilisation clinique du Neurotracker et aucune étude n'a évalué la fiabilité test-retest de celui-ci en ce qui concerne le diagnostic ou la gestion du TCCL. Toutefois, des données de fiabilité sont déjà disponibles pour l'ImPACT qui est utilisé par différentes équipes sportives comme mesure de référence en début de saison, d'où l'intérêt d'y comparer le Neurotracker.

Objectif de recherche

L'objectif était de comparer la fiabilité test-retest des tests ImPACT et Neurotracker pendant deux saisons consécutives chez des athlètes universitaires pratiquant des sports à risque de TCCL. Il s'agit d'une population d'intérêt pour l'utilisation des évaluations sélectionnées et les résultats auront un plus grand potentiel de transférabilité avec de futures études s'intéressant au suivi complet pré- et post-TCCL.

Hypothèse

Il était anticipé que le niveau de fiabilité test-retest du Neurotracker soit comparable à celui du test ImPACT lorsqu'une période d'un an sépare les deux évaluations chez des athlètes universitaires.

CHAPITRE 3

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 Dre Corbin-Berrigan et du Dr 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.

**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**

DESCHAMPS Alexandre ^{1,2}, GIGUÈRE-LEMIEUX Élisabeth ¹, FAIT Philippe ¹⁻⁴,
CORBIN-BERRIGAN Laurie-Ann ^{1,2}

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

² Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques, UQTR, Trois-Rivières, Canada.

³ Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition, Montréal, Canada.

⁴ Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale, Québec, Canada.

Abstract

University athletes represent a large proportion of sports-related mild traumatic brain injury (mTBI). Current recommendation is to use diverse assessment tools to monitor their remission by comparing post-mTBI performances with a preseason baseline. In that regard, the Neurotracker which assess perceptual-cognitive abilities during an immersive task similar to sporting requirements has been proposed to optimize mTBI management. While the Neurotracker is sensitive to deficits caused by mTBI, test-retest reliability data are missing to select the ideal time frame for baseline updates. As a comparison, the ImPACT, a widely used and studied neurocognitive assessment program, has been selected since its results are expected to remain stable over a full season.

Objective: The current study aimed to compare the test-retest reliability of the ImPACT and Neurotracker tests for two consecutive seasons in university athletes participating in sports at risk for mTBI.

Methods: At the start of the 2019-2020 and 2020-2021 seasons, 30 athletes with no history of mTBI in the past three months completed a baseline assessment with the Neurotracker and the ImPACT. The test-retest reliability of the results was analysed by considering the intra-class correlation coefficient (ICC), the Becker's standardized mean difference and the Bland-Altman plot of each outcome.

Results: ICCs between the two seasons ranged between 0,171-0,628 and were only significant for the Neurotracker (0,628; 95% C.I. 0,355 – 0,803) and the Visual Motor Speed (VMS) composite score of the ImPACT (0,543; 95% C.I. 0,185 - 0,776). Five outcomes of the ImPACT had lower values of standardized mean difference indicating good reliability while the Neurotracker had a smaller confidence interval than every ImPACT outcome which could demonstrate less variability between individuals. Neurotracker's Bland-Altman plot showed a significative positive bias of 0,179 while none was present for the ImPACT outcomes.

Conclusion: Our research suggests that, although an improvement is to be expected, the Neurotracker has an acceptable level of test-retest reliability after one year in comparison to the ImPACT.

Keywords: Mild craniocerebral trauma; Neurotracker; Impact; sport; reliability

Introduction

Mild traumatic brain injury (mTBI) is a common injury in sport (Gardner et al., 2019) that has seen its incidence progress considerably since the start of the century (Mannix et al., 2013). Students athletes from high school to university represent the majority of the population at risk of sustaining an mTBI (Gardner et al., 2019; Gessel et al., 2007; Shields et al., 2009) especially if they play a contact sport such as hockey or soccer (Gessel et al., 2007). mTBI is the result of direct or indirect biomechanical forces transmitted to the head which are common when playing sports, such as head-to-head (direct contact) or a fall on the buttocks (indirect) (Harmon et al., 2019). This injury is due to a complex local cerebral pathophysiological process leading to the rapid onset of neurological symptoms (Harmon et al., 2019; McCrory et al., 2017). Usually, patients present with physical and cognitive symptoms, sleep disturbance and psychological alterations (McCrory et al., 2017). It is expected that the majority of athletes recover within a month after the injury (Cancelliere et al., 2014; Haider et al., 2018; Kara et al., 2020), however, 10% to 30% of individuals experience a delayed recovery (Hou et al., 2012; Permenter et al., 2021).

To ensure the appropriate management, an athlete must receive a diagnosis shortly upon injury and then be retain from full sport participation until full recovery. Still, identifying and treating sport-related mTBI is complex since health care professionals (HCP) must take quick and reliable decisions in order to limit a player's withdrawal time while protecting them without any clear pathognomonic signs. In fact, to date, there is no single test or imaging method capable of detecting this pathology (Graham et al., 2014; McCrory et al., 2017; McKee et al., 2015). This leaves some HCP to trust

mostly their clinical suspicion of mTBI when a direct or indirect hit to the head is associated with symptoms, a situation less than ideal to ensure optimal management (Hyden et al., 2016). To overcome this challenge, multimodal assessments should be repeated over time and include physical and neurocognitive functions, signs and symptoms, cranial nerves, neck and balance (McCrory et al., 2017). The objective of these assessment tools is first to identify the affected functions following the injury and then to follow the athletes' progress throughout recovery.

Symptoms questionnaires are at the basis of the diagnostic assessment because of their low cost and simplicity. But, a weakness inherent in all questionnaires is the use of self-reported measures since up to a third of athletes involuntarily fail to mention symptoms (Broglia et al., 2009) and others voluntarily distort their answers, hence the importance of not using them alone (Dessy et al., 2017; Doolan et al., 2012). Cognitive functions can be evaluated objectively and tend to return to normal later than symptoms (McCrea et al., 2013; McInnes et al., 2017) thus providing an opportunity to be more sensible to the later recovery stages of mTBI. The use of diverse neurocognitive tests investigating memory, attention, executive functioning, language and perception is recommended (Haider et al., 2018; Harmon et al., 2019; Lynch, 2018; McMilla et al., 2013) as it reflects cerebral capacities (Giza et al., 2014; Ruff et al., 2009). In the absence of direct measurement of brain function sensible to mTBI, these indirect measurements represents the best avenue for HCP (Makdissi et al., 2010).

Because a higher risk of re-injury is associated with misdiagnosis and early return to sport (Giza et al., 2013), the selected assessment tools must be particularly sensitive

and reliable to identify injured athletes with certainty. The recovery status of the athlete is determined by a return to the pre-injury capacities or by the attainment of normative results associated with a state of normality. While a variety of assessments tools exists, first line HCP are only reporting a moderate level of self-efficacy in the assessment and management of athletes sustaining a sport-related mTBI (Savage et al., 2018). The challenge keeps rising since specific populations and age groups (Faubert, 2013; Plourde et al., 2017; Qiu et al., 2018; Sandel et al., 2018) are known to perform at different levels during neurocognitive tests even when healthy. Thus, for athletes the comparison to normative data to identify the extend of the injury and follow the recovery is associated with a higher risk of false-negative (Schatz et Robertshaw, 2014). Recommendation is then to use a preseason baseline assessment to subsequently compare the result in case of a mTBI (Harmon et al., 2019; Higgins et al., 2017; Schatz et al., 2014). Yet, when used in that manner most of the proposed assessments for mTBI do not meet the reliability standards set for clinical utility over a one-year or two-year period for athletes during their collegiate career (Broglia et al., 2018). However, the combination of such tests provides a high level of sensitivity and allows the clinician to have a multifaceted evaluation, thus limiting the consequence of one misdirected result (Broglia et al., 2018).

Frequently used as a baseline, the Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT application inc., Coralville USA) is the most widely used and studied computer-based neurocognitive assessment of mTBI in both sport and clinical settings in North America (Dessy et al., 2017). Consisting of six different tests and one symptoms questionnaire, the ImPACT offers a broad evaluation of the

cognitive state in form of a clinical report consisting of five composite scores : 1) verbal memory; 2) visual memory; 3) visual motor speed (VMS); 4) reaction time and 5) cognitive efficiency index (Shuttleworth-Edwards et al., 2013). The ImPACT has high internal reliability and can efficiently identify neurocognitive changes resulting from mTBI in athletes (Dessy et al., 2017; Graham et al., 2014; Sinnott et al., 2019). In addition, the results are reported to remain stable over time despite repeated exposure (Schatz et al., 2013). A recent meta-analysis concluded that for the acute assessment of mTBI, the sensitivity is 81,9-91,4% and the specificity is 69,1-89,4% for a population of athletes (Dessy et al., 2017). However, its detection capacity is limited beyond eight days post-mTBI (Alsalaheen et al., 2016). This represents quite a limitation for HCP tasked to follow the recovery of athletes over a longer period to ensure a proper return to sport.

In order to find a better assessment for the later stages of recovery from mTBI, the Neurotracker (CogniSens Industries, Montréal Canada) was proposed (Faubert et al., 2012). Originally designed to assess and train sport performance in a virtual reality setting, the Neurotracker (Faubert et al., 2012) is one of the most popular perceptual-cognitive training tool in sport (Vater et al., 2021). This device represents an interesting innovation in the context of mTBI because of its design which uses three-dimension multiple object tracking (3D-MOT) to evaluate an individual's ability to follow different moving targets through identical distractors, a sport-specific skill, while providing a measure of performance on the attentional standpoint (Cavanagh et al., 2005; Faubert et al., 2012). Following mTBI, the perceptual-cognitive cerebral capacities allowing the execution of tasks integrating several stimuli seem to be the

last to recover (Mathias et al., 2004). A study among professional athletes, which evaluated participants at 48 hours after mTBI and at the time of the return play, showed that 3D-MOT correlated with mTBI symptoms and may be an indicator of the state of recovery through the entire process (Chermann et al., 2018). Comparable results support the association between 3D-MOT performance and mTBI symptoms and suggest it could be an effective assessment tool after the initial injury (Lysenko-Martin et al., 2020). Studies among the pediatric population demonstrated the same trend as symptomatic youths exhibited delayed performance progression after repeated 3D-MOT exposure following mTBI (Corbin-Berrigan et al., 2018; Corbin-Berrigan et al., 2020a). Although promising, there are no specific criteria for the clinical use of the Neurotracker to guide management after a mTBI and no studies have evaluated the test-retest reliability of 3D-MOT with regards to mTBI.

Since sport teams tend to change on an annual basis and most studies of reliability cover a maximum period of one or two years (Broglia et al., 2018), we aimed to compare the test-retest reliability of the Neurotracker to the one of the ImPACT for two consecutive years in university athletes playing sports at risk for mTBI to guide a complementary baseline utilization.

Methods

Participants

A convenience sample of university athletes practicing a sport at risk for mTBI were recruited in fall 2019 to be enrolled in a one-year research project (sporting seasons 2019-2020 and 2020-2021). These came from the soccer, hockey and cheerleading

teams from Université du Québec à Trois-Rivières. These are the three sports from this school associated with the higher risk of mTBI, thus making the participants a population of interest for the implementation of a baseline mTBI assessment. It is also believed that the results from this sample will have greater potential for transferability to future studies on the subject. At the start of the first season, the participants included had to be 18 years of age and over, play competitively a sport representing a high risk of mTBI at the university level and be fluent in French or English. Athletes with an uncorrected vision disorder, a major neurological or orthopedic disorder limiting the assessment process, those who sustained a mTBI less than three months prior to enrollment and those using a new psychoactive medication during the last six months were excluded. Ethical approval (CER-14-205-07.17) was granted by the Université du Québec à Trois-Rivières' research ethics committee and consent were obtained from all participants.

Procedure

At the beginning of the first sporting season (2019-2020), a series of demographic information including sports background, mTBI history and health status were compiled before initiating data collection. Afterwards, participants completed the Neurotracker and ImPACT, in random order, inside a low-light closed room under the supervision of a member of the research team. It took participants one hour to complete the assessment. At the beginning of the second sporting season (2020-2021), our team reconnected with the athletes from the 2019-2020 sporting season that still evolved within the same university teams. Following an update of their state of health and their sports practices, participants completed the second evaluations by Neurotracker and

ImPACT with a member of the research team to maintain a similar protocol. The athletes did not take part in any Neurotracker or ImPACT evaluations between the two seasons aside from this study.

Measures

3D-MOT (Neurotracker)

Using a projector (Optoma, EH320UST), the Neurotracker's three-dimensional interface was presented to the participants wearing active 3D glasses and seated 1,5 meters from a 60-inch screen. Referring to Figure 2, a Neurotracker trial consists of the following five steps: a) eight balls of similar shape and color are randomly arranged in the Neurotracker interface: participants are encouraged to fixate a dot in the center of the projection throughout the assessment; b) four balls which are identified as the targets to be tracked during the trial become highlighted for a few seconds; c) targets return to their original appearance as a period of random movement lasting a total of eight seconds begins; d) the participant must identify the targets through the distractors; e) feedback on trial performance is visually provided to the participant. The CORE assessment mode, being the most widely utilized in the Neurotracker literature, was selected (Corbin-Berrigan et al., 2018, 2020a, 2020b; Harris et al., 2020; Lysenko-Martin et al., 2020; Mangine et al., 2014; Moen et al., 2018; Park et al., 2021; Parsons et al., 2016; Tullo et al., 2018). A series of 20 trials corresponds to one session and each laboratory encounter a total of three sessions. Each session provides a measure of performance on the task, known as speed threshold, a measure of visual perceptual skills in meters per seconds. The speed at which targets move within the 3D environment depends on participants' performance

and varies according to Levitt's staircase theory (Levitt, 1971). A positive response causes the balls (targets and distractors) to move faster, while an incorrect response reduces the speed of the next trial (Faubert et al., 2012; Parsons et al., 2016). A two-minute break was provided to participants between sessions, until three speed thresholds were obtained.

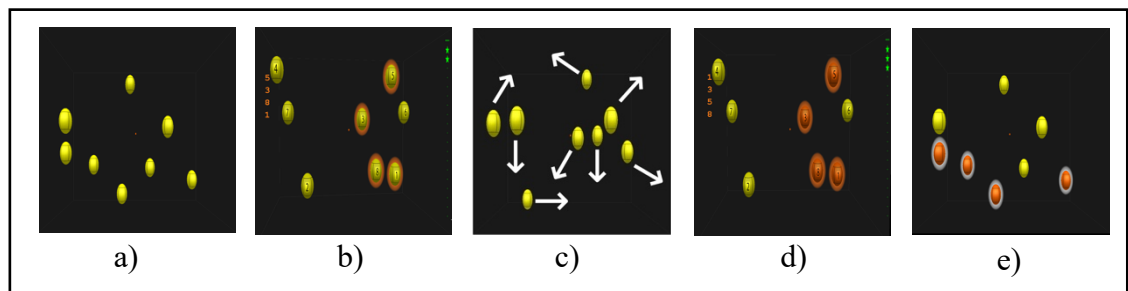


FIGURE 2. Neurotracker's trial's five steps

Immediate Post Concussion Assessment and Cognitive Test (ImPACT)

The ImPACT Online Version test battery was completed on a laptop (ASUS, Vivobook N580G) using the keyboard and touchpad, in an isolated room (Dessy et al., 2017). The assessment begins with the Post-Concussion Symptom Scale (PCSS), a questionnaire reporting intensity of 22 common symptoms following mTBI, on a Likert scale from 0 to 6 (6 = severe). Then, participant completed six neuropsychological assessment modules: word memory, design memory, X's and O's, symbol match, color match and three letters. The ImPACT system uses these modules to calculate composite scores of verbal and visual memory, visual processing speed, reaction time and cognitive efficiency along with the symptom score (Shuttleworth-Edwards et al., 2013).

Analysis

We analyzed test-retest reliability between two sporting seasons for the Neurotracker's speed threshold and the composite scores of the ImPACT with three main criteria: intra-class correlation coefficient (ICC), Becker's standardized mean difference (dB) and a Bland-Altman plot. ICC is an analysis of variance which reflects both the degree of correlation and agreement between repeated measurements (Park et al., 2017). A good ICC is reported to be over 0,75 while 0,50 to 0,75 is moderate and under 0,5 is weak (Portney et al., 2009). We selected a minimal degree of significance of 0,05 to ensure the presence of a significant correlation between the two measures. dB was used to measure the effect that sporting season 1 scores have on the repeated measure the following year (sporting season 2). This method shows a limited bias and is recommended for one-group within-subjects designs such as the present study (Johnson et al., 2013). The result represents the mean change between measurements as a multiple of the effect size. An outcome has higher reliability when it's dB is close to 0 and has a small confidence interval. Finally, a Bland-Altman plot for each outcome was created to illustrate the level of agreement between season 1 & 2 results (Park et al., 2017). The analysis produces a scatterplot of every participants in which the X-axis represents the average results of both seasons $[(T0 + T1)/2]$, and the Y-axis represents the difference $(T0 - T1)$ between the two seasons (Doğan, 2018). The agreement level can be observed from the distribution of the individual data points on either side of the zero. The Bland-Altman allows us to calculate the bias between each season and its associated slope. The bias is considered systematic between the measurements if its slope has a $p > 0,05$. We additionally subjected our results to paired-t tests and calculated Pearson's correlation coefficients (r).

Results

Participants

University athletes (n=77) were enrolled in the study protocol at the start of season 1. Of those, 30 took part in the season 2 evaluation (Table 2). Most of the attrition is due either from athletes resigned from their team, not on campus for sport participation due to the COVID-19 pandemic or not responding to our contact efforts during the season 2 recruitment period. Thus, the sample size for both sporting seasons consisted of 30 participants (22 males; 8 females) with a mean age of 22,1 years (SD = 1,5) and practicing either ice hockey (n=15), soccer (n=11) or cheerleading (n=4). A total of 16 athletes reported prior mTBI history, however, none of the returning participants sustained an mTBI between the two assessments. A total of six participants had incomplete ImPACT data (technical issue with the software or participants' schedule) which led to the analysis of 30 pairs of Neurotracker results and 24 pairs for the ImPACT.

TABLE 2. PARTICIPANTS' CHARACTERISTICS

	Women	Men	Mean Age* (SD)	Sport experience* (SD)	History of mTBI (n)	Average number of previous mTBI† (SD)
Hockey	0	15	21,8 (1,0)	15,8 (1,7)	10	1,2 (0,6)
Soccer	5	6	21,6 (1,5)	17,0 (1,5)	4	4,0 (4,2)
Cheerleading	3	1	23,0 (2,9)	5,0 (3,1)	2	1,5 (0,7)
Total	8	22	22,1 (1,5)	14,8 (4,3)	16	2,0 (2,3)

mTBI: Mild Traumatic Brain Injury

*: Years

†: Average number of previous mTBI among those who reported a prior history of mTBI

Test-retest reliability

ICCs between the two seasons ranged between 0,171 and 0,628 for the Neurotracker and ImPACT. Significant ICC ($p < 0,05$) were solely reported for the Neurotracker (0,628; 95% C.I. 0,355 – 0,803) and the Visual Motor Speed (VMS) score of the ImPACT (0,543; 95% C.I. 0,185 - 0,776) (Table 3).

Becker's d (dB) varied between -1,861 and 1,154 with five outcomes out of eight under the 1.0 mark. As illustrated by the forest plot (Figure 3), VMS (0,230; 95% C.I. -0,15 – 0,61), Reaction Time (-0,352, 95% C.I. -0,87 – 0,17), Cognitive Efficiency Index (0,333; 95% C.I. -0,22 – 0,89), Total Symptom Score (0,107; 95% C.I. -0,37 – 0,58) and Number of Symptoms (0,233; 95% C.I. -0,28 – 0,75) of the ImPACT all had a CI crossing zero demonstrating good reliability between the average results of the two seasons. Neurotracker (0,436; 95% C.I. 0,14 – 0,73) had a smaller CI than every ImPACT outcome which could demonstrates less variability between individuals, but it's CI did not cross zero demonstrating a weaker reliability between the two evaluations. The scores of Verbal Memory (1,15; 95% C.I. 0,46 – 1,84) and Visual Memory (-1,86; 95% C.I. -2,64 – -1,08) demonstrated poor reliability with high dB values and wide Cis not crossing zero.

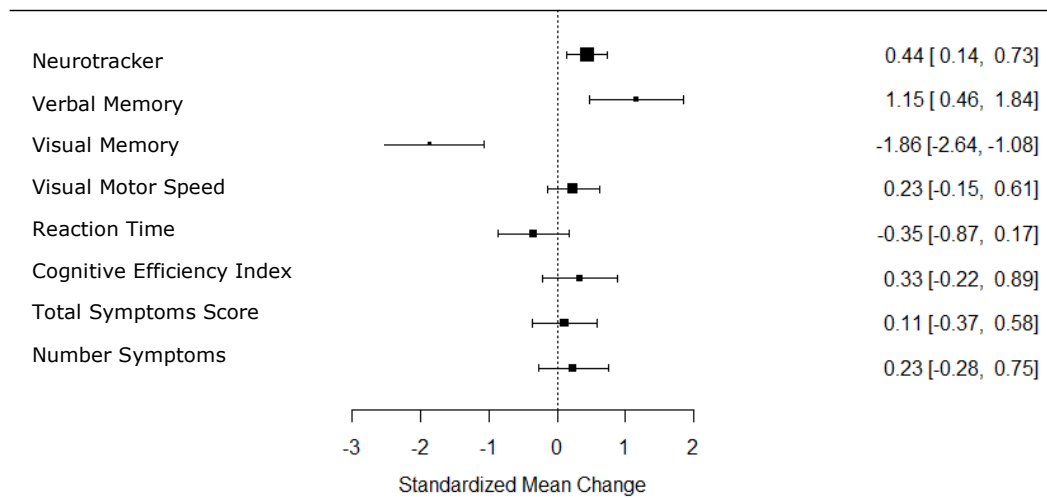


FIGURE 3. Becker's effect size forest plot

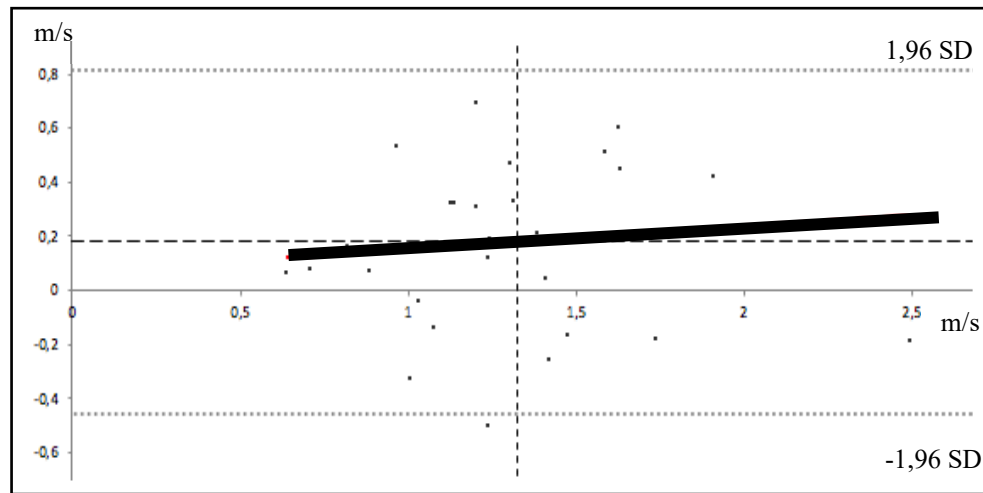
Neurotracker's Bland-Altman plot (Figure 4) demonstrates an acceptable distribution of the participants' performances. A positive bias of 0,179 is represented by the bold black dotted line while the bold black line is the bias' slope (0,083; -0,244 - 0,41). Since the slope's *p* value of 0,607 is greater than previously established significance level, we can conclude that the bias is systematic because it is not statistically different from the horizontal. A similar analysis was performed for every ImPACT outcome and we reported the error of measurement along with the minimal detectable change (MDC) in Table 3.

Pearson's correlations between baseline assessments ranged from 0,03 to 0,697. These results were in accordance with the ICCs as only Neurotracker (0,697) and Visual Motor Speed of the ImPACT (0,548) presented a moderate but significant correlation

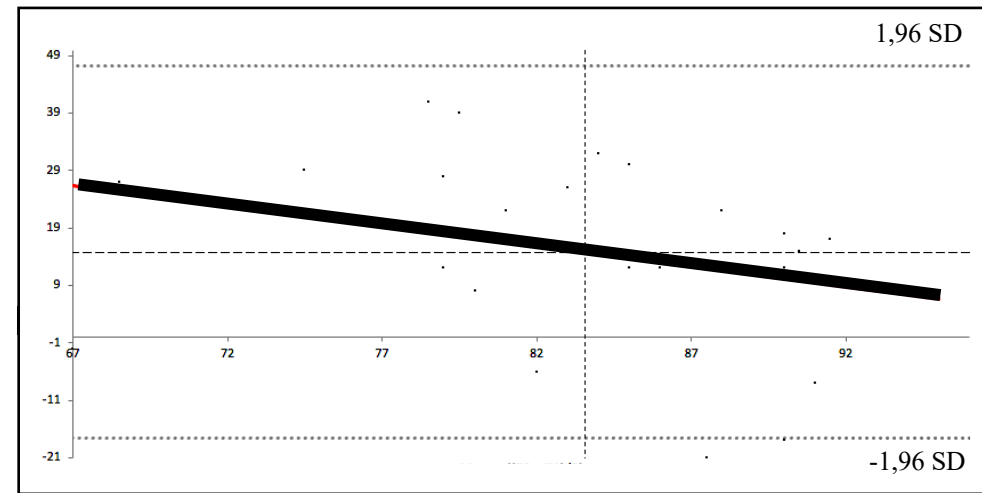
TABLE 3. RELIABILITY STATISTICS OF THE NEUROTRACKER AND IMPACT

	Season 1	Season 2	ICC [95% CI] (p)	Becker's d [95% CI]	Bias	Bias' slope [95% CI] (p)	Error	MDC	r (p)	t (p)
Neurotracker (m/s)	M (SD) = 1,233 (0,401) SEM = 0,073	M (SD) = 1,413 (0,43) SEM = 0,079	0,628 [.355 ; ,803] ($<0,001^*$)	0,436 [.14 ; ,73]	0,179	0,083 [-.244; ,410] (.607)	0,636	0,665	0,697 ($<0,001^*$)	-3,026 (0,005*)
Verbal memory	M (SD) = 76,167 (12,398) SEM = 2,53	M (SD) = 90,958 (9,134) SEM = 1,865	-0,41 [-.690 ; -,019] (.980)	1,154 [.46 ; 1,84]	14,79	-0,699 [-1,682; ,284] (.155)	32,4	35,73	-0,159 (.457)	-4,384 (0,001*)
Visual memory	M (SD) = 91,375 (5,844) SEM = 1,193	M (SD) = 80,125 (13,44) SEM = 2,743	-0,232 [-.571 ; ,178] (.869)	-1,861 [-2,64 ; -1,08]	-11,25	1,394 [.733; 2,055] ($<0,001^*$)	29,04	16,31	-0,030 (.889)	3,72 (0,001*)
Visual motor speed	M (SD) = 39,583 (4,853) SEM = 1,012	M (SD) = 40,657 (4,645) SEM = 0,968	0,543 [.185 ; ,776] (.003*)	0,230 [.15 ; ,61]	1,14	-0,042 [-.514; ,430] (.854)	8,68	8,88	0,548 (.007*)	-1,14 (0,266)
Reaction time	M (SD) = 0,626 (0,085) SEM = 0,173	M (SD) = 0,595 (0,109) SEM = 0,222	0,171 [-.236 ; ,529] (.204)	-0,352 [-.87 ; ,17]	-0,03	0,409 [-.305; 1,124] (.248)	0,24	0,214	0,186 (.385)	1,209 (0,239)
Cognitive efficiency index	M (SD) = 0,325 (0,085) SEM = 0,018	M (SD) = 0,344 (0,158) SEM = 0,034	0,055 [-.360 ; ,456] (.399)	0,333 [.22 ; ,89]	0,03	0,831 [.081; 1,581] (.031*)	0,34	0,257	0,045 (.841)	-0,51 (0,616)
Total Symptoms Score	M (SD) = 7,833 (6,04) SEM = 1,233	M (SD) = 8,50 (6,852) SEM = 1,399	0,307 [-.096 ; ,625] (.065)	0,107 [.37 ; ,58]	0,66	0,398 [-.314; 1,109] (.259)	15,07	14,03	0,293 (.165)	-0,425 (0,675)
Number symptoms	M (SD) = 4,625 (3,118) SEM = 0,636	M (SD) = 5,375 (3,965) SEM = 0,809	0,193 [-.214 ; ,545] (.174)	0,233 [.28 ; ,75]	0,75	0,194 [-.456; ,844] (.541)	8,92	7,78	0,191 (.371)	-0,807 (0,428)

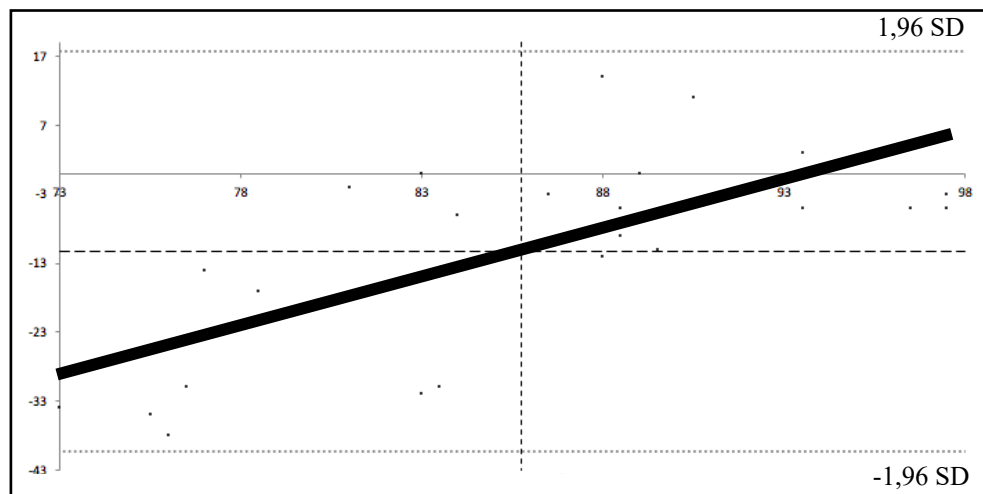
ICC: Intraclass Correlation Coefficient; M: Mean; MDC: Minimal Detectable Change; r: Pearson's correlation; SD: Standard Deviation; SEM: Standard Error of the Mean; *t*: *t* test; *: $p < 0,05$



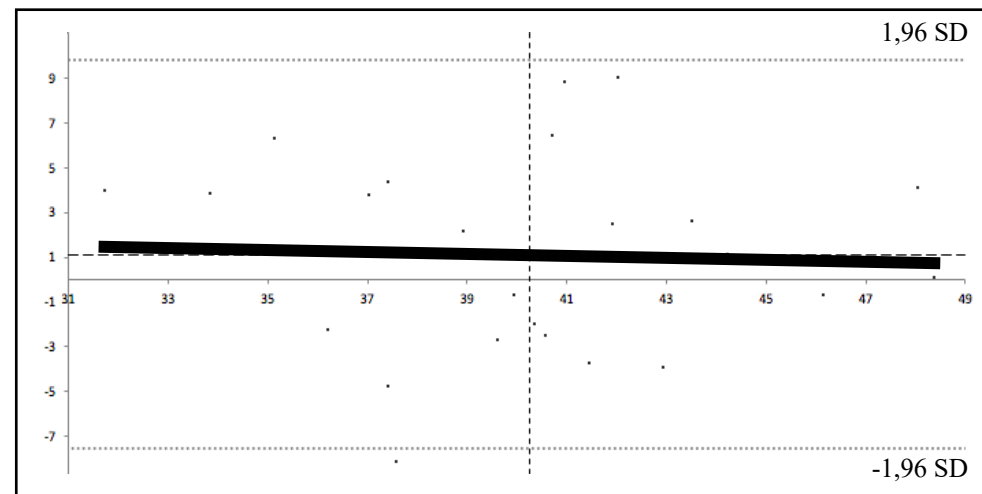
Neurotracker



Verbal memory

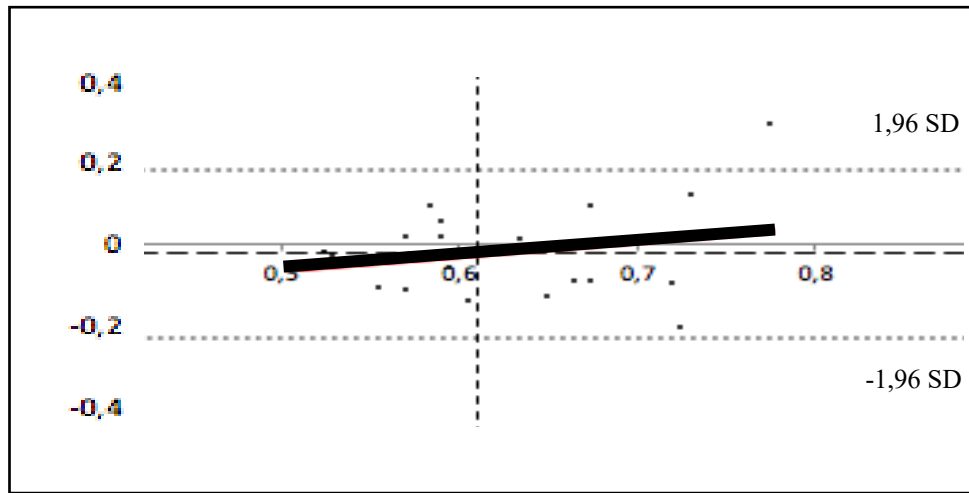


Visual memory

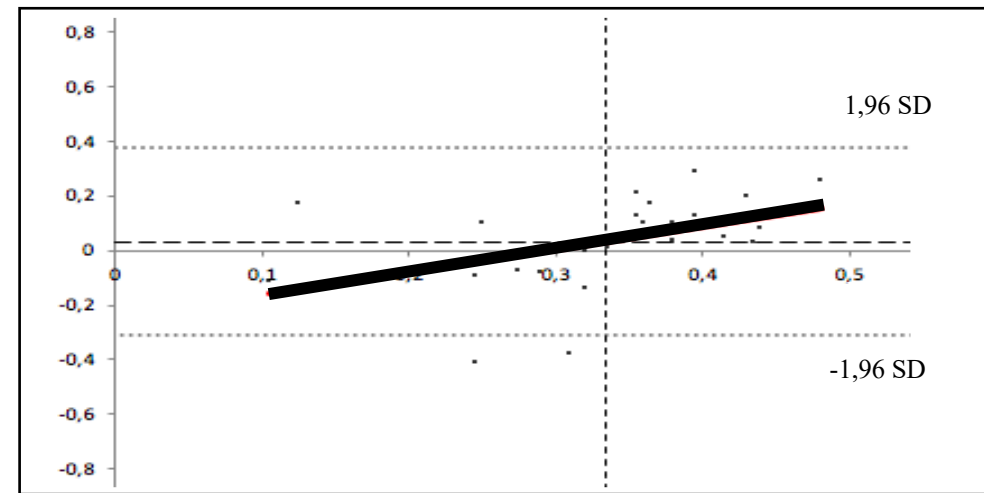


Visual motor speed

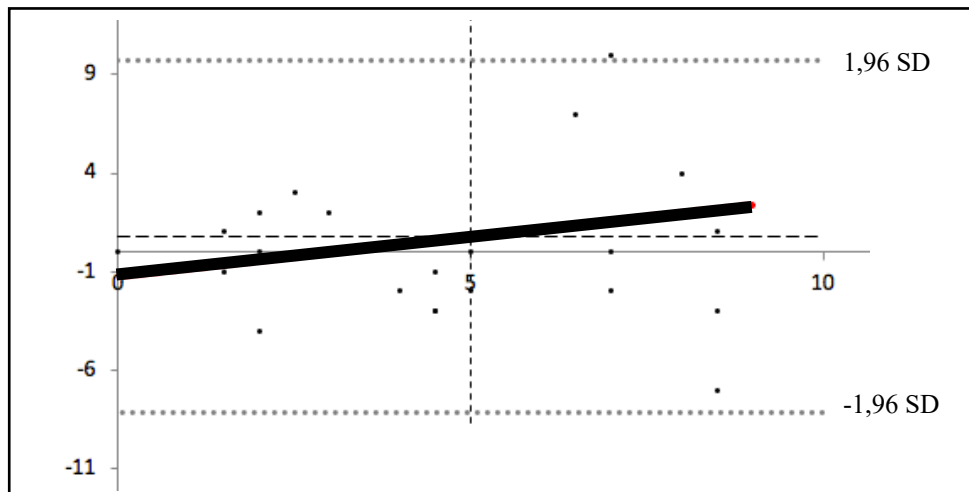
FIGURE 4. Bland-Altman plots for the Neurotracker and Verbal memory, visual memory and visual motor speed composite score of the ImPACT (I)



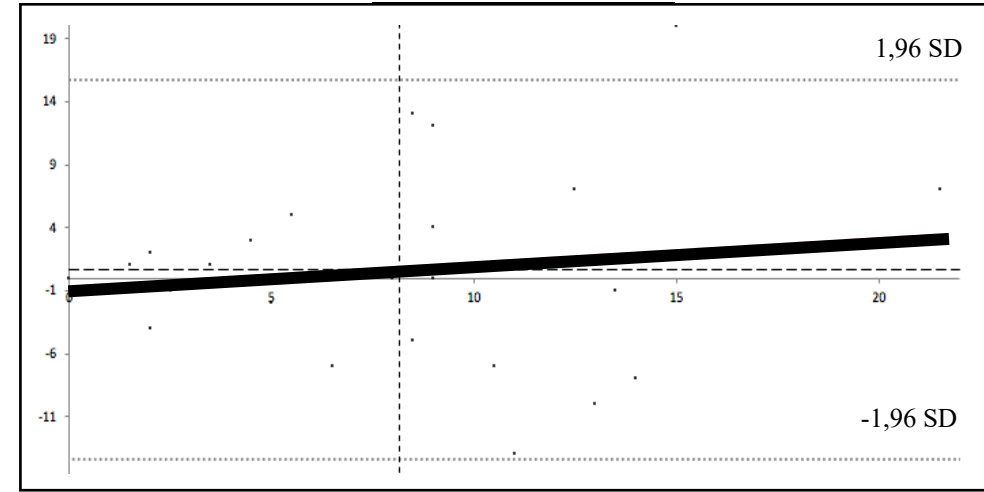
Reaction time



Cognitive efficiency index



Total Symptom Score



Number of symptoms

FIGURE 4. Bland-Altman plots for Reaction time composite score, cognitive efficiency index, total symptom score and number of symptoms of the ImPACT (II)

while Visual Memory (-,030) and Cognitive Efficiency Index (0,045) of the ImPACT showed the lowest scores.

Significant difference of the mean scores calculated by *t* test was found for three outcomes: Verbal Memory (0,001), Visual memory (0,001) and Neurotracker (0,005). On average, athletes performed better on the second year, although not significantly, for every outcome with the exception of Visual Memory and Symptoms on the ImPACT.

Discussion

We examined the one-year test-retest reliability of the Neurotracker's speed threshold and the ImPACT's composite scores among university athletes. Based on multiple statistical analysis, our results suggest that both the VMS of the ImPACT and the Neurotracker's speed threshold have an acceptable level of test-retest reliability while the other outcomes demonstrate limited reliability over a one-year period.

To our knowledge this study is the first to report test-retest reliability for the Neurotracker when used as a baseline measure of performance. A significant correlation from season 1 and 2 was observed for this measure with a moderate strength when considering its associated ICC (0,628). Effect size, portrayed by *dB*, was higher than most of ImPACT composite scores and did not reach zero which indicates a lower level of reliability. Still, the Neurotracker's *dB* had the smallest confidence interval, suggesting less variability among participants for this outcome.

The significant increase of the mean speed threshold scores between the two seasons (+ 0,179 m/s), evidenced by the bias's slope and the *t* test, could have impacted the raise of effect size. This implies that a better level of reliability could be achieved if clinical criteria's take into consideration this generalized progress of Neurotracker's scores.

The ImPACT composites scores presented mixed results of test-retest reliability with the VMS outcome being the most reliable. Correlation of scores between seasons ranged from low to moderate strength in regard to ICC (0,171 - 0,543) with only VMS (0,543) attaining moderated strength (0,50 - 0,75) and reaching significance. Those values are notably low in comparison to previous reports. Also studying a group of university athletes, Broglio et al. (2018) reported ICCs of the composites scores of the ImPACT for 3154 athletes after one year (0,47-0,72) and 505 athletes after the second year (0,34-0,66). Their results were higher than those reported in our study but were still not good as the study by Elbin et al. (2011) among high school athletes that obtained values of ICCs (0,62 - 0,82) with the same one-year time frame. Other studies using test-retest intervals ranging from seven days to two-years also had higher ICCs (0,21 - 0,88) with most scores demonstrating moderate or strong correlation between assessments (Iverson et al., 2003; Nelson et al., 2016; Schatz, 2010; Schatz et al., 2013; Tsushima et al., 2016). Inspection of these reports highlights a tendency of reduced reliability over time for the ImPACT. Lower ICCs when evaluating test-rest reliability of the ImPACT, as in the case of our study, were previously reported by Broglio and al. (2007) who only found weak ICCs (0,23 - 0,39) after an interval of 45 days (Broglio et al., 2007). Their protocol included three different cognitive assessments

completed within the same session as the ImPACT, which is different from most of the previously cited articles that focused solely on the ImPACT. The only exception being Nelson et al. (2016) who used two neurocognitive tests, but their results came from a protocol of repeated exposure within seven, 14, 30, 44 and 198 days from baseline which could favor stability between sessions. Since we evaluated the Neurotracker and the ImPACT one after the other, it could be hypothesized that athletes suffered from fatigue and a lower level of attention which could explain less reliable results when multiples tests are utilized. Another hypothesis for the lower ICCs obtained in the present study could be negatively impacted by our small sample. It has been proposed that when the variability among the participant's results is small it usually results in a reduction of the ICCs values (Portney et al., 2009). We could not directly compare our results to those of the previously mentioned study, but they all came from larger samples. The effect size results were favorable for all ImPACT composite scores with the exception of Verbal Memory and Visual Memory, two outcomes that changed significantly between both seasons, thus demonstrating a considerable level of variability. Low effect sizes indicate that there is a substantial overlap between the scores of seasons 1 and 2 suggesting that despite weak reliability scores the Reaction time, Cognitive Efficiency Index and Symptoms remain relatively stable over this interval.

Practice effect is an important limitation to retesting reliability and thus must be accounted for. If we are excluding Verbal and Visual Memory of the ImPACT because of their subpar reliability, our athletes only significantly improved their speed threshold (+0,179 m/s) on the Neurotracker. Although a recent systematic review by

Vater and al. (2021) suggested that various populations (athletes, students, healthy young and old adults, military, children with mTBI, children with neurodevelopmental disorders) improve their speed threshold with various level of practice, in the context of the present study it would be hard to associate the results of the second season with a true improvement in perceptual-cognitive functions. This early improvement was acknowledged by the founders of Neurotracker who published in-house data suggesting that initial fluctuations are to be expected but tend to stabilize after the first three assessments (Faubert et al., 2012). Our results take into consideration the first two assessments thus such a phenomenon could be present and be considered a value of expected change. Thus, an adjustment to deduct it from the follow-up performance could be considered to improve reliability. Still, more research is needed to reach this conclusion. Nevertheless, the cause for such an improvement with limited exposition can be hypothesized to be the result of three processes: 1) a true improvement of the cognitive function isolated by the test; 2) improved familiarity with the test functioning; 3) increase in test-specific knowledge, such as optimal strategy (Scharfen et al., 2018). To isolate true cognitive changes, it appears that repeated baseline testing in the first year of implementation could mitigate the other factors of performance and allow the results to be more reliable over time (Scharfen et al., 2018). The absence of a significative improvement for the ImPACT as oppose to Neurotracker's scores could be linked to two factors. First, the ImPACT uses different versions of each test within its program for every assessment while the Neurotracker task is always similar despite the speed variation of each trial. Second, the lack of experience athletes had with the 3D-screen of the Neurotracker in comparison to the laptop use for the ImPACT may

have led to a more significant improvement in test-specific knowledge between evaluations.

Interestingly, the most reliable outcomes, Neurotracker's speed threshold and VMS of the ImPACT, both evaluate neurocognitive processes relying on visual functions. Similar to our results, across similar studies VMS is reported to be the most reliable outcome of the ImPACT (Dessy et al., 2017; Broglio et al., 2018). It is proposed that cognitive processes tested by VMS and Neurotracker are constantly solicited to perform activities requiring high visual indexing capacity like team sports (Faubert, 2013; Qiu et al., 2018). Since the goal when evaluating athletes post-mTBI is to assess their ability to return to play safely, the measurement of those outcomes seems to fit the need of both transferability and reliability. The actual recommendation to confirm mTBI associated impairments with the ImPACT is the presence of a significant reduction in a minimum of two of the five composite scores (Dessy et al., 2017). However, our results of low reliability for the two memory outcomes suggest that this rule might need to be reconfirmed within the university population when baseline is done annually. The implementation of a similar recommendation, that a reduction of performance indicates lingering impairments, for the Neurotracker seems to be worth exploring since our results suggest an expected improvement between assessments.

Finally, our results should be considered in regard to their limitations. Participants retention was low with more than half lost to follow-up which resulted in a limited sample size of 30 athletes that could explain the generalized high MDC values. This situation also caused an imbalanced group of athletes in term of gender and sport. The context of the COVID-19 pandemic greatly affected sport participation of the included

athletes who lost a major part of their training in the first season post-recruitment. Still, this represented a unique occasion to examine the effect of such a forced pause on concussion baseline testing, with the effects of sport participation taken out of the portray. Future research should investigate if organized sport's participation should be considered when selecting the optimal test-retest interval.

As sports teams try to optimize mTBI management with new technology, reliability data must be taken into account. We can conclude that the Neurotracker demonstrates an acceptable level of test-retest reliability after one year in comparison to the ImPACT. Although a significant improvement is present within the first sessions, the Neurotracker demonstrated equal or better reliability than every composite scores of the ImPACT. Among the composite scores of the ImPACT, VMS was the most reliable while Visual Memory and Verbal Memory should be analyzed with caution.

Acknowledgments

We thank Jean Leblond for his support with the statistical analysis and Étienne Fallu for his implication in the recruitment of athletes.

This work was supported in part by grants from the Groupe de recherche sur les affections neuromusculosquelettiques (GRAN), the internal research funds of the Université du Québec à Trois-Rivières and the Foundation for the Royal College of Chiropractic Sports Sciences (Canada).

Author Disclosure Statement

The authors declare the absence of competing financial interests.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La réalisation de ce projet de recherche a permis d'examiner la fiabilité test-retest après une période d'un an du seuil de vitesse du Neurotracker et des scores composites de l'ImPACT auprès de 30 athlètes universitaires. En se fiant aux nombreuses analyses statistiques effectuées, nos résultats suggèrent que le Visual Motor Speed (VMS) de l'ImPACT et le seuil de vitesse du Neurotracker ont un niveau acceptable de fiabilité test-retest tandis que les autres résultats démontrent une fiabilité faible à modérée sur une période d'un an. Ces résultats ne confirment que partiellement notre hypothèse, laquelle était que le niveau de fiabilité test-retest du Neurotracker soit comparable à celui du test ImPACT sur période d'un an chez des athlètes universitaires. Dans les faits, le Neurotracker a démontré une fiabilité test-retest similaire à celle du score composite VMS et s'est avéré plus fiable que les autres résultats de l'ImPACT. Toutefois, ce niveau de fiabilité n'est pas excellent ce qui semble être le cas fréquemment avec les évaluations neurocognitives spécifiques au TCCL (Broglia et al., 2018).

À notre connaissance, cette étude est la première à rapporter la fiabilité test-retest du Neurotracker lorsqu'il est utilisé comme mesure de référence des performances pré-TCCL. Une corrélation significative ($p < 0,05$) entre les saisons 1 et 2 a été observée pour le seuil de vitesse du Neurotracker avec une force modérée lorsque l'on considère l'ICC de 0,628. En comparaison, les ICCs des scores composites de l'ImPACT ont variés entre 0,171 et 0,543 avec le VMS (0,543) comme seul score atteignant une force modérée (0,50 - 0,75) ainsi que le seuil de significativité ($p < 0,05$) alors que les autres étaient faibles ($< 0,50$) (Portney et al., 2009). Bien que le Neurotracker et le VMS se distinguent favorablement des autres scores, nos valeurs sont relativement faibles en

sachant qu'un seuil d'acceptabilité au-delà de 0,75 est recommandé pour l'utilisation clinique bien que ce standard soit rarement atteint pour les tests neurocognitifs spécifiques au TCCL (Broglia et al., 2018). Nos résultats d'ICC pour le Neurotracker étant les premiers publiés, un comparatif n'est pas possible alors que la littérature pour l'ImPACT contient de nombreux résultats à ce sujet. Nos résultats sont d'ailleurs faibles en comparaison aux études publiées précédemment. Une méta-analyse sur le sujet par Farnsworth et al. (2017) a établi que les ICCs de l'ImPACT devraient se situer généralement entre 0,52 et 0,77. Leurs résultats proviennent toutefois d'études dont l'intervalle test-retest varie grandement entre une journée et deux années (Farnsworth et al., 2017). Il importe ainsi de comparer nos résultats avec les études démontrant le plus de similitudes méthodologiques. Étudiant également un groupe d'athlètes universitaires, Broglia et al. (2018) ont rapporté des ICC aux scores composites de l'ImPACT supérieurs à notre étude pour 3154 athlètes après un an (0,47-0,72) et 505 athlètes suite à la deuxième année (0,34-0,66). En utilisant le même intervalle d'un an que notre étude, Elbin et al. (2011) ont suivi 369 athlètes du secondaire et ont signalé des valeurs d'ICC relativement élevées allant de 0,62 à 0,82 (Elbin et al., 2011). Un plus grand échantillon, comme dans les deux études citées précédemment, a potentiellement favorisé l'obtention d'une meilleure puissance statistique des résultats d'ICC par rapport à notre échantillon plus modeste. Cette puissance statistique proviendrait en partie d'une distribution des résultats se rapprochant plus de la courbe normale ce qui n'est pas possible lorsqu'un petit échantillon de résultats moins variés est étudié. Il a été proposé que cette diminution de la variabilité entre les résultats des participants cause une réduction artificielle des valeurs ICC sur une base statistique (Portney et al., 2009). Fait intéressant, en théorie,

le jeune âge des athlètes de l'étude d'Elbin et al. (2011) devrait avoir causé plus de variabilité des performances que dans notre population universitaire. En effet, chez les athlètes du secondaire, qui sont dans une période plus active de développement cognitif et de maturation que chez ceux de niveau universitaire, il est suggéré que le délai d'administration des évaluations neurocognitives de référence soit plus court que chez les jeunes adultes (McCrory et al., 2004). Il se peut toutefois que l'intervalle d'un an en soit un de prédilection pour les athlètes du secondaire (13-17 ans) puisqu'une réduction importante des ICCs est observée lorsque l'intervalle test-retest est augmenté à deux ans chez ceux-ci (0,21 - 0,719) (Tsushima et al., 2016). Au niveau universitaire, l'écart entre une et deux années d'intervalle est moindre comme démontré par l'étude de Broglio et al. (2018) qui ont obtenus des ICCs entre 0,47 et 0,72 avec un intervalle d'un an alors qu'une légère réduction fut présente en ajoutant une année avec des résultats allant de 0,34 à 0,66 (Broglio et al., 2018). Des valeurs similaires ont été obtenues après un intervalle test-retest de deux ans auprès d'une autre cohorte d'athlètes universitaires (0,43 - 0,74) dont le nombre de 95 était plus modeste (Schatz, 2010). En comparant ces résultats à ceux obtenus lors d'expérimentations à plus court terme, bien que celles-ci soient peu applicables au contexte d'utilisation en présaison, il semble que des intervalles test-retest plus courts de sept jours (0,67 - 0,86) (Iverson et al., 2003) et d'un mois (0,60 - 0,88) (Schatz et al., 2013) permettent d'obtenir une corrélation légèrement supérieure entre les évaluations. Cette tendance n'a cependant pas été démontrée par Nelson et al. (2016) qui ont utilisé un protocole d'exposition répétée à sept, 14, 30, 44 et 198 jours de la mesure initiale de référence. Leurs résultats de fiabilité pour le test ImPACT furent stables entre chaque mesure en variant toujours à l'intérieur de 0,50 et 0,75 d'ICC

(Nelson et al., 2016). Il est possible que ce soit l'exposition répétée à l'ImPACT qui favorise une fiabilité accrue des résultats surtout que les quatre premières évaluations ont été réalisées en moins de deux mois. Ceci peut favoriser un effet de pratique qui sera discuté plus tard dans cette discussion. Une autre explication pour la différence observée entre nos résultats et ceux des études présentées précédemment pourrait provenir de l'étude de Broglio et al. (2007) qui sont les seuls à rapporter des valeurs inférieures d'ICC (0,23 - 0,39) après un intervalle court de 45 jours (Broglio et al., 2007). Leur protocole comprenait trois évaluations cognitives différentes incluant l'ImPACT réalisées au cours de la même session contrairement à la plupart des articles précédemment cités qui se concentraient uniquement sur l'ImPACT. Les seules exceptions étant Nelson et al. (2016) et Broglio et al. (2018) qui ont utilisé plusieurs tests neurocognitifs, mais leurs protocoles utilisaient soit des d'expositions répétées (Nelson et al., 2016) soit un échantillon beaucoup plus grand que celui de notre étude (Broglio et al., 2018) ce qui peut avoir favorisé la stabilité entre les sessions. Puisque nous avons évalué le Neurotracker et l'ImPACT l'un après l'autre, nous pouvons émettre l'hypothèse que nos athlètes étaient plus sujets à la fatigue et à une réduction du niveau d'attention, ce qui pourrait expliquer des résultats moins fiables lorsque plusieurs tests sont utilisés. L'effet d'autres particularités de notre étude tel que le contexte de la pandémie de COVID-19 seront discutées dans la section de limitations.

La taille d'effet des résultats de la saison 1 par rapport à ceux de la saison 2, représentée par le *d* de Becker (dB), était favorable pour les scores composites de l'ImPACT (0,107 - 0,356) à l'exception de la mémoire verbale (1,154) et de la mémoire visuelle (-1,861). Le Neurotracker (0,436) quant à lui a eu une valeur plus

élevée que les meilleurs scores composites de l'ImPACT. Les scores composites de mémoire sont deux résultats qui ont changé de manière significative entre les deux saisons et qui affichent les plus grands intervalles de confiance (I.C.), démontrant ainsi un niveau considérable de variabilité. L'analyse de la taille d'effet doit considérer l'I.C. pour être complète puisqu'il est attendu que le zéro y soit inclus pour qu'une mesure soit considérée fiable. Ce fut le cas pour les scores composites du temps de réaction, VMS, index cognitif, nombre de symptômes et scores total de symptômes de l'ImPACT. Bien que ce critère n'ait pas été atteint pour le Neurotracker, son I.C. fut le plus restreint parmi nos mesures, ce qui suggère une moindre variabilité entre les individus malgré une stabilité plus faible des résultats. L'augmentation significative des scores moyens de seuil de vitesse entre les deux saisons, mise en évidence par la pente du biais du Bland-Altman et le test t entre les deux saisons, pourrait justifier cette augmentation de valeur de la taille d'effet du Neurotracker. Cette augmentation généralisée des performances au Neurotracker entre les deux saisons combinées au faible intervalle de confiance du dB pourrait indiquer qu'un bon niveau de fiabilité est atteignable si l'amélioration des participants est prise en compte lors de l'analyse.

Une amélioration généralisée des résultats entre les deux évaluations peut indiquer qu'un effet de pratique fut présent chez les participants. L'effet de pratique est une limitation importante à la fiabilité test-retest d'un outil d'évaluation et doit être pris en considération. Si l'on exclut la mémoire verbale et visuelle de l'ImPACT en raison de leur fiabilité inférieure dans le contexte de notre étude, nos athlètes n'ont amélioré que significativement leur seuil de vitesse (+0,179 m/s) au Neurotracker. Ce phénomène pourrait représenter une valeur de changement attendu entre les deux premières

mesures. Ainsi, un ajustement pour déduire cette valeur de la performance de suivi pourrait être envisagé afin d'améliorer la fiabilité et de contrôler pour l'apprentissage. Néanmoins, il manque encore d'évidences pour soutenir cette pratique en clinique puisque plusieurs facteurs confondants peuvent avoir eu un effet sur la seconde performance. Ainsi, bien de tels résultats soient cohérents avec une revue systématique récente de Vater et al. (2021) qui suggère que diverses populations (athlètes, étudiants, jeunes et vieux adultes en bonne santé, militaires, enfants atteints de TCCL, enfants atteints de troubles neurodéveloppementaux) améliorent leur seuil de vitesse suite à différents niveaux d'exposition au Neurotracker (Vater et al., 2021). Il importe de se questionner sur l'origine d'une amélioration à la suite d'une seule exposition au Neurotracker. La cause d'une telle amélioration avec une exposition limitée peut être le résultat de trois processus dont la contribution est variable: 1) une véritable amélioration de la fonction cognitive isolée par le test qui découlerait potentiellement d'une stimulation de la neuroplasticité; 2) une meilleure familiarité avec le fonctionnement du test qui réduit, par exemple, l'anxiété associée au manque de familiarité avec le matériel ou les erreurs involontaires et 3) une augmentation des connaissances spécifiques aux tests qui permettent l'utilisation d'une stratégie optimale pour maximiser la performance et profiter des pauses offertes pendant chaque test (Scharfen *et al.*, 2018). Dans le contexte de notre étude, il est probable que le second et troisième facteur aient joué un rôle dans l'augmentation du seuil de vitesse. Pour isoler de vrais changements cognitifs, il semble que des tests de présaisons répétés pourraient atténuer les autres facteurs influençant l'apprentissage (Scharfen *et al.*, 2018). La stabilité des résultats de l'étude de Nelson et al. (2016) présentée plus tôt en est un bon exemple Cette pratique a déjà été recommandée pour l'ImPACT

puisque'il était rapporté que jusqu'à 35% des athlètes ne participent pas de façon optimale lors d'une mesure unique en présaison causant l'invalidité de leurs résultats (Cole et al., 2013). Pour contrer cette problématique, il semble que le simple fait d'effectuer deux fois l'ImPACT permette d'éliminer la majorité des scores invalides et d'augmenter la corrélation avec les évaluations futures d'environ 0,17 d'ICC (Alsalaheen et al., 2016).. Les participations sous-optimales à l'ImPACT semblent être une problématique principalement chez les adolescents (Abeare et al., 2018; Tsushima et al., 2021), tout de même, nous avons tenté de réduire leur occurrence. Nous avons effectué nos évaluations en sous-groupes ne dépassant pas quatre athlètes et ceux utilisant l'ImPACT étaient isolés tel que conseillé (Abeare et al., 2018). Dans le présent projet de recherche, l'absence d'effet pratique significatif pour l'ImPACT par rapport aux scores du Neurotracker pourrait être liée à trois facteurs. Premièrement, l'ImPACT utilise différentes versions de chacun des tests dans son programme lors de chaque évaluation subséquente, tandis que les essais du Neurotracker sont toujours similaires outre la variation de vitesse de déplacement des cibles. Deuxièmement, le manque d'expérience des athlètes avec l'écran 3D du Neurotracker par rapport à l'utilisation d'un ordinateur portable pour l'ImPACT peut avoir conduit à une amélioration plus significative des connaissances spécifiques à ce test entre les évaluations. Troisièmement, bien que nous avons utilisé le Neurotracker en tant que test, il fut initialement développé comme moyen d'entraînement des facultés cognitives (Faubert et al. 2012). En ce sens, l'association entre les performances au Neurotracker et les fonctions cérébrales a déjà été évaluée par électro-encéphalogramme par Parsons et al. (2016). À la conclusion de 10 séances de Neurotracker, une amélioration du seuil de vitesse fut accompagnée d'une diminution

du ratio Theta/Beta sur électroencéphalogramme quantitatif qui est associée à une augmentation de l'attention, et une augmentation des ondes Gamma qui suggère à une stimulation de la neuroplasticité (Parsons et al., 2016). Bien que de telles évidences soient encore peu nombreuses, une récente revue-systématique a conclu que certaines compétences attentionnelles telles que la mémoire de travail, l'attention soutenue, la vitesse de traitement visuelle ou l'inhibition sélective pourraient s'améliorer suite à l'exposition au Neurotracker (Vater et al., 2021). Ce sont de telles évidences qui nous permettent d'émettre l'hypothèse qu'une certaine proportion de l'effet de pratique que nous avons observé provient d'une véritable amélioration des fonctions perceptivo-cognitives isolées par le Neurotracker. Cet effet de pratique a été reconnu et est attendu par les fondateurs du Neurotracker qui ont publié des données internes suggérant que les fluctuations initiales des performances ont tendance à se stabiliser après les trois premières évaluations (Faubert et al., 2012). D'ailleurs, un retard de progression à cette courbe d'apprentissage initiale a été utilisé dans le domaine des TCCL pour identifier l'état de guérison de jeunes athlètes (Corbin-Berrigan et al., 2018, 2020a). Tout de même, le parallèle entre nos données et celles des études citées précédemment ont leurs limites puisque nos évaluations ont été effectués avec un an de délai d'exposition et qu'aucun des participants ne s'est entraîné avec le Neurotracker entre les deux saisons. Une hypothèse intéressante est que la progression des participants soit due au développement progressif de leurs capacités cognitives. Bien qu'un développement considérable provienne pendant l'enfance et l'adolescence, il a été démontré que le cortex préfrontal et l'hippocampe se développent tout au long de la vingtaine (Calabro et al., 2020). Il faudra continuer d'investiguer les différentes

fluctuations de performances entre une utilisation comme mesure de référence et un entraînement régulier pour bien identifier leurs significations cliniques.

Fait intéressant, les résultats les plus fiables, le seuil de vitesse du Neurotracker et le VMS de l'ImPACT, évaluent tous deux des processus neurocognitifs reposant sur les fonctions visuelles. En effet, dans les deux cas les tests demandent de maintenir une vue d'ensemble de l'écran et d'effectuer des saccades rapides pour suivre les stimuli périphériques (Vater et al., 2021). À ceci s'ajoutent des demandes perceptivo-cognitives uniques au Neurotracker telles la poursuite visuelle et la gestion de l'encombrement visuel (plusieurs cibles dans le même hémisphère du champ visuel) (Vater et al., 2021). À l'instar de nos résultats, dans des études similaires, le VMS est considéré comme le résultat le plus fiable de l'ImPACT (Dessy et al., 2017; Farnsworth et al., 2017). Il est proposé que les processus cognitifs testés par VMS et le Neurotracker soient constamment sollicités pour effectuer des activités nécessitant une capacité d'indexation visuelle élevée comme les sports collectifs (Faubert et Sidebottom, 2012; Qiu et al., 2018). Étant donné que l'objectif du suivi des athlètes post-TCCL est d'évaluer leur capacité à reprendre le jeu en toute sécurité, l'évaluation de ces résultats semble répondre au besoin à la fois de transférabilité et de fiabilité. La rémission incomplète de ces aptitudes perceptivo-cognitives semble d'ailleurs causer une réduction des performances et des réflexes de protection lors du retour au jeu (Catena et al., 2009; Urban et al., 2017; Van Pelt et al., 2019).

La recommandation clinique stipule qu'en présence d'une réduction significative d'au moins deux des cinq scores composites de l'ImPACT pour confirmer les déficiences associées au TCCL (Dessy et al., 2017). Cependant, nos résultats de faible fiabilité

pour les deux résultats de mémoire suggèrent que le critère minimal de cette règle est à risque d'être atteint en absence de TCCL. Cette méthode d'analyse devrait être reconfirmée au sein de la population athlétique universitaire lorsque la mesure de référence est reprise annuellement. Pour le Neurotracker, il n'existe pas de règle clinique à ce jour ce qui représente une limitation importante à son utilisation avec des patients. Nos résultats semblent indiquer qu'une progression est attendue entre les expositions ce qui nous permet d'émettre l'hypothèse qu'une réduction significative des performances entre les évaluations soit puisse représenter un critère s'utilisant de façon similaire à celui suggéré pour l'ImPACT. La confirmation de cette hypothèse dépassait cependant les objectifs de ce mémoire.

Limitations

Enfin, nos résultats doivent être considérés au regard de leurs limites. La rétention des participants était faible avec plus de la moitié perdue au suivi lors de la seconde saison. Le recrutement étant toujours une étape charnière de la mise en place d'un projet de recherche, nous avons développé un partenariat intéressant avec l'équipe de soins intégrés des Patriotes de l'UQTR pour rejoindre directement les athlètes sur leurs milieux d'entraînement. Toutefois, les mesures de santé publique en vigueur à l'automne 2020, en lien avec la pandémie de COVID-19, ont eu pour conséquences de diminuer l'accès des athlètes au campus universitaire et d'augmenter les incertitudes de ceux-ci par rapport à la tenue de leur saison sportive. Ainsi, lors de notre deuxième année d'évaluation, plusieurs athlètes n'étaient plus à proximité de

l'université ou ont préféré s'abstenir de participer aux activités de recherche autorisées alors que chacun tentait de s'adapter aux incertitudes sanitaires.

De ce fait, ceci nous laisse avec une taille d'échantillon limitée qui pourrait expliquer l'écart entre nos résultats de fiabilité et ceux d'études antérieures, tel que discuté précédemment, ainsi que les valeurs élevées généralisées du changement minimal détecté (MDC). L'effet sur le MDC doit être discuté puisque cette donnée est importante afin d'analyser la transférabilité sur le terrain des résultats d'études au sujet d'outils de mesure clinique. Le MDC indique la plus petite quantité de changement qui peut être détectée par un outil de mesure qui correspond à un changement notable de la capacité mesurée par cet outil. Ainsi, l'objectif est d'avoir un MDC aussi faible que possible. En se fiant au tableau 3 de l'article de ce mémoire, nous constatons que ces valeurs sont supérieures à l'écart-type des données auxquelles elles sont associées. Des MDC ainsi élevées mettent en doute la capacité de discrimination des résultats du Neurotracker et de l'ImPACT. Toutefois, un nombre de participants réduit entraîne une augmentation du MDC puisque les valeurs extrêmes ont un poids supérieur dans ce calcul.

Les difficultés de suivi ont également provoqué un groupe déséquilibré d'athlètes au niveau du sexe et du sport pratiqué. Ces différences sont importantes parce que l'incidence de TCCL est supérieure chez les femmes athlètes possiblement parce qu'elles ont plus tendance à mentionner leur suspicion de TCCL aux professionnels de la santé et pour des raisons physiologiques telle une force inférieure des muscles cervicaux (Baldwin et al., 2018). Il a également été observé que les femmes ont tendance à rapporter un nombre supérieur de symptômes du TCCL lorsqu'elles

complètent un questionnaire à ce sujet tant lorsqu'elles sont en santé (Asken et al., 2017) que post-TCCL (Cancelliere et al., 2014). Le nombre de participants ne permettait pas de réaliser une analyse dépendante du sport bien qu'il soit reconnu que les athlètes de différentes disciplines performant à des niveaux variables aux tests neurocognitifs (Sandel et al., 2018) ce qui peut avoir biaisé nos résultats en raison du haut taux de participation des joueurs de hockey par rapport aux autres sports.

Le contexte de la pandémie de COVID-19 a grandement affecté la participation sportive des athlètes inclus qui ont perdu une grande partie de leur entraînement lors de la première saison post-recrutement. Pourtant, cette situation représentait une occasion unique d'examiner l'effet d'une pause forcée sur les tests de référence Neurotracker et ImPACT alors que les effets de la participation sportive étaient retirés du portrait. En effet, puisque la pratique sportive de haut niveau est associée à une meilleure performance aux tests ImPACT (Mangine et al., 2014; Schatz et al., 2014) et Neurotracker (Faubert, 2013; Qiu et al., 2018), il est proposé que certaines capacités cognitives spécifiques peuvent se développer grâce au sport (Faubert et al., 2012). Le niveau supérieur aux tâches perceptivo-cognitives des athlètes d'élite proviendrait du développement de leur capacité à percevoir et à interpréter rapidement des indices clés afin d'accomplir leurs actions sportives sans dépendre uniquement de leur habileté à réagir lorsqu'une situation ou un mouvement se concrétise (Buckolz et al., 1988). L'hypothèse est que les meilleurs athlètes ont su développer des mécanismes et des stratégies cognitives qui facilitent l'anticipation, permettant des temps de réponse réduits et une précision de réponse accrue (Mann et al., 2007). Toutefois, ces habiletés sont hautement spécifiques à chaque sport et nécessitent un entraînement et une

exposition régulière aux stimulus à interpréter. C'est pourquoi une méta-analyse sur le sujet à identifier que parmi différents athlètes de niveau élevé ceux pratiquant des sports stratégiques (ex. le soccer, hockey) peuvent effectuer un séquençage plus élaboré d'événements, ce qui peut réduire les pressions associées aux distracteurs et leur permet de performer à un niveau supérieur aux évaluations perceptivo-cognitives (Mann et al., 2007). Malheureusement, nos athlètes n'ont pas eu accès aux situations de compétition ou de match qui sont plus propices au développement des aptitudes perceptivo-cognitives évaluées au cours de la saison 2020-2021 ce qui pourrait avoir modifié les résultats de notre étude. Leur niveau d'entraînement se rapprochait plus de celui d'un athlète exclu de la compétition. Le meilleur comparatif pour cette situation, en l'absence de pandémie, se produit suite à une blessure. Dans une telle situation, l'athlète se doit généralement de prendre une période de repos partielle qui sera suivie d'un retour progressif à l'entraînement de groupe avant de prendre part aux compétitions. Lors des premiers stades de ce retour progressif, qui peuvent être longs selon la blessure, les occasions de solliciter et stimuler les fonctions perceptivo-cognitives spécifiques aux situations de jeu sont réduites et peuvent entraîner une fluctuation du niveau de compétence lors d'évaluations tels le Neurotracker et l'ImPACT. Une telle diminution des résultats neurocognitifs a d'ailleurs été identifiée chez les athlètes retournant au jeu après une rupture du ligament croisé antérieur (Piskin et al., 2021). Ainsi, les recherches futures devraient déterminer si la participation au sport organisé doit être prise en compte lors de la sélection de l'intervalle test-retest optimal.

Perspectives

Le projet de recherche présenté dans ce mémoire est le premier à s'intéresser à la fiabilité tes-retest du Neurotracker en tant qu'outil d'évaluation du TCCL en l'utilisant selon les mêmes recommandations que l'ImPACT qui est une référence dans ce domaine. Les résultats présentés tout comme la méthodologie statistique pourront servir de comparaisons futures alors que ce domaine d'étude continue de se développer. Bien que les résultats de fiabilité soient favorables pour le Neurotracker en comparaison à l'ImPACT, ceux-ci demeurent de niveau modéré alors il sera intéressant d'investiguer l'effet que peuvent avoir un échantillon plus grand et une saison sportive typique. De plus, l'effet d'apprentissage observé au Neurotracker nous indique que la comparaison de nos données issues d'une évaluation unique en début de saison avec celles obtenues suite à l'utilisation d'un protocole d'évaluations répétées en début de saison (ex. trois évaluations rapprochées) est une avenue intéressante à étudier.

L'utilisation conjointe de l'ImPACT et du Neurotracker semble être une alternative intéressante pour combler les besoins d'évaluation neurocognitive suite au TCCL. En effet, ces deux tests couvrent des aspects de la cognition distincts, ce qui augmente les possibilités d'identifier des déficits précis afin d'orienter la prise en charge de l'athlète. Notre étude a démontré que la mise en place d'un programme d'évaluation multisport les utilisant en présaison est réalisable de façon efficace.

Tel que mentionné dans nos limitations, la participation sportive de nos athlètes fut diminuée entre les deux mesures au point d'être similaire à celle d'un joueur écarté de la compétition pour une blessure. À notre connaissance, l'effet d'une telle diminution

de l'entraînement pendant une saison sur les performances des tests en présaison n'a pas été rapporté. S'il s'avère que nos résultats de fiabilité ont été réduits par cette composante, le présent projet pourrait servir d'indication comme quoi les évaluations de présaison devraient être reprises suite à un arrêt prolongé.

Les données utilisées pour ce mémoire font partie d'un projet de plus grande envergure qui n'a pu être réalisé en raison des restrictions liées à la COVID-19 lors de la saison 2020-2021. Dans le cadre de ce projet, nous avons évalué 48 athlètes universitaires en présaison avec une batterie de tests incluant l'ImPACT, le Neurotracker, une mesure du temps de réaction, le Vestibular/Oculo-Motor Screening (VOMS) et un questionnaire d'efficacité personnelle. Bien que la majorité de ces données n'aient pas été utilisées à ce jour, elles représentent une source d'informations pertinentes qui pourront être utilisées lors des prochaines années. En effet, le projet actuel a permis de mettre en place une collaboration entre notre équipe de recherche du département des sciences de l'activité physique de l'UQTR et l'équipe de soins intégrés des équipes universitaires afin d'organiser les évaluations spécifiques au TCCL en présaison.

Conclusion

Alors que les équipes sportives tentent d'optimiser la gestion des TCCL avec de nouvelles technologies, les données de fiabilité test-retest de celles-ci doivent être prises en compte. Le projet présenté nous permet de conclure que le Neurotracker démontre un niveau de fiabilité test-retest acceptable après un an par rapport à l'ImPACT. Bien qu'une amélioration soit attendue entre les deux évaluations, le Neurotracker a démontré une fiabilité égale ou supérieure aux scores composites de l'ImPACT. Parmi les scores composites de l'ImPACT, le visual motor speed (VMS)

était le plus fiable tandis que la mémoire visuelle et la mémoire verbale ont démontré le plus de variabilité. Étant deux outils d'évaluation neurocognitifs aux objectifs distincts, il semble que leur utilisation conjointe soit une avenue intéressante. À notre connaissance, ces données sont les premières à être publiées à ce sujet pour le Neurotracker et pourront servir de comparatif lors des prochaines années afin d'améliorer les connaissances au sujet de la gestion et du suivi des TCCL.

Bibliographie

- Abeare, C. A., Messa, I., Zuccato, B. G., Merker, B. et Erdodi, L. (2018). Prevalence of invalid performance on baseline testing for sport-related concussion by age and validity indicator. *JAMA Neurology*, 75(6), 697-703. doi: 10.1001/jamaneurol.2018.0031
- 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. doi: 10.1007/s40279-016-0532-y
- Altman, D. G. et Bland, J. M. (1994). Diagnostic tests. 1: Sensitivity and specificity. *Bmj*, 308(6943), 1552. doi: 10.1136/bmj.308.6943.1552
- Anderson, M., Petit, K. M., Wallace, J., Covassin, T. et Beidler, E. (2021). Predictors of concussion nondisclosure in collegiate student-athletes. *Journal of Athletic Training*. doi: 10.4085/1062-6050-0102.20
- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders*. (5th^e éd.). Arlington, VA: American Psychiatric Association. (5th^e éd.)
- Asken, B. M., Snyder, A. R., Clugston, J. R., Gaynor, L. S., Sullan, M. J. et Bauer, R. M. (2017). Concussion-like symptom reporting in non-concussed collegiate athletes. *Archives Clinical Neuropsychology*, 32(8), 963-971. doi: 10.1093/arclin/acx018
- Avan, A., Digaleh, H., Di Napoli, M., Stranges, S., Behrouz, R., Shojaeianbabaei, G., Amiri, A., Tabrizi, R., Mokhber, N., Spence, J. D., & Azarpazhooh, M. R. (2019). Socioeconomic status and stroke incidence, prevalence, mortality, and worldwide burden: an ecological analysis from the Global Burden of Disease Study 2017. *BMC medicine*, 17(1), 191. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1397-3>
- Baldwin, G. T., Breiding, M. J. et Dawn Comstock, R. (2018). Epidemiology of sports concussion in the United States. *Handbook of Clinical Neurology*, 158, 63-74. doi: 10.1016/B978-0-444-63954-7.00007-0
- Bang, F., Ehsani, B., McFaull, S., Chang, V. C., Queenan, J., Birtwhistle, R. et Do, M. T. (2020). Surveillance of concussion-related injuries using electronic medical records from the Canadian Primary Care Sentinel Surveillance Network (CPCSSN): a proof-of-concept. *Canadian Journal of Public Health*, 111(2), 193-201. doi: 10.17269/s41997-019-00267-4
- Baumgartner TA, Mahar MT, Jackson AS, Rowe DA. *Reliability and objectivity: measurement for evaluation in kinesiology*. 9th ed. Burlington, MA: Jones & Bartlett; 2015:90–113.
- Bayly, P. V., Black, E. E., Pedersen, R. C., Leister, E. P. et Genin, G. M. (2006). In vivo imaging of rapid deformation and strain in an animal model of traumatic brain injury. *Journal of Biomechanics*, 39(6), 1086-1095. doi: 10.1016/j.jbiomech.2005.02.014
- Beaton, D. E., Bombardier, C., Katz, J. N. et Wright, J. G. (2001). A taxonomy for responsiveness. *Journal of Clinical Epidemiology*, 54(12), 1204-1217. doi: 10.1016/s0895-4356(01)00407-3

- Bernstein, J. P. K., Calamia, M., Pratt, J. et Mullenix, S. (2019). Assessing the effects of concussion using the C3Logix Test Battery: an exploratory study. *Applied Neuropsychology Adult*, 26(3), 275-282. doi: 10.1080/23279095.2017.1416471
- Bigler, E. D. (2008). Neuropsychology and clinical neuroscience of persistent post-concussive syndrome. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 14(1), 1-22. doi: 10.1017/s135561770808017x
- Black, A. M., Sergio, L. E. et Macpherson, A. K. (2017). The epidemiology of concussions: number and nature of concussions and time to recovery among female and male canadian varsity athletes 2008 to 2011. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 27(1), 52-56. doi: 10.1097/jsm.0000000000000308
- Bressler, S. L., Tang, W., Sylvester, C. M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2008). Top-down control of human visual cortex by frontal and parietal cortex in anticipatory visual spatial attention. *Journal of Neuroscience*, 28(40), 10056–10061. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1776-08.2008
- Broglio, S. P., Katz, B. P., Zhao, S., McCrea, M. et McAllister, T. (2018). Test-retest reliability and interpretation of common concussion assessment tools: findings from the NCAA-DoD CARE consortium. *Sports Medicine*, 48(5), 1255-1268. doi: 10.1007/s40279-017-0813-0
- Broglio, S. P., Macciocchi, S. N. et Ferrara, M. S. (2007). Sensitivity of the concussion assessment battery. *Neurosurgery*, 60(6), 1050-1057; discussion 1057-1058. doi: 10.1227/01.Neu.0000255479.90999.C0
- Broglio, S. P., Zhu, W., Sapiar, K. et Park, Y. (2009). Generalizability theory analysis of balance error scoring system reliability in healthy young adults. *Journal of Athletic Training*, 44(5), 497-502. doi: 10.4085/1062-6050-44.5.497
- Calabro, F. J., Murty, V. P., Jalbrzikowski, M., Tervo-Clemmens, B., & Luna, B. (2020). Development of hippocampal-prefrontal cortex interactions through adolescence. *Cerebral cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 30(3), 1548–1558. doi: 10.1093/cercor/bhz186
- Cancelliere, C., Hincapie, C. A., Keightley, M., Godbolt, A. K., Cote, P., Kristman, V. L., Cassidy, J. D. (2014). Systematic review of prognosis and return to play after sport concussion: results of the International Collaboration on Mild Traumatic Brain Injury Prognosis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(3 Suppl), S210-229. doi: 10.1016/j.apmr.2013.06.035
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1484–1525. DOI: 10.1016/j.visres.2011.04.012
- Carroll, L. J., Cassidy, J. D., Holm, L., Kraus, J. et Coronado, V. G. (2004). Methodological issues and research recommendations for mild traumatic brain injury: the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine* (43 Suppl), 113-125. doi: 10.1080/16501960410023877
- Cassidy, J. D., Cancelliere, C., Carroll, L. J., Cote, P., Hincapie, C. A., Holm, L. W., Borg, J. (2014). Systematic review of self-reported prognosis in adults after mild traumatic brain injury: results of the International Collaboration on Mild Traumatic Brain Injury

- Prognosis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(3 Suppl), S132-151. doi: 10.1016/j.apmr.2013.08.299
- 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. doi: 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. doi: 10.1016/j.tics.2005.05.009
- 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. doi: 10.1136/bmjsem-2018-000384
- Chong, C. D. et Schwedt, T. J. (2018). Research imaging of brain structure and function after concussion. *Headache*, 58(6), 827-835. doi: 10.1111/head.13269
- Cole, W. R., Arrieux, J. P., Schwab, K., Ivins, B. J., Qashu, F. M. et Lewis, S. C. (2013). Test-retest reliability of four computerized neurocognitive assessment tools in an active duty military population. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28(7), 732-742. doi: 10.1093/arclin/act040
- 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(7), 559-563. doi: 10.1097/wnr.0000000000000988
- Corbin-Berrigan, L.-A., Kowalski, K., Faubert, J., Christie, B. et Gagnon, I. (2020a). Could Neurotracker be used as a clinical marker of recovery following pediatric mild traumatic brain injury? An exploratory study. *Brain Injury*, 34(3), 385-389. doi: 10.1080/02699052.2020.1723699
- Corbin-Berrigan, L. A., Faubert, J. et Gagnon, I. (2020b). 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. doi: 10.1002/tsm2.132
- Coronado, V. G., Haileyesus, T., Cheng, T. A., Bell, J. M., Haarbauer-Krupa, J., Lionbarger, M. R., Gilchrist, J. (2015). Trends in sports- and recreation-related traumatic brain injuries treated in US emergency departments: The National Electronic Injury Surveillance System-All Injury Program (NEISS-AIP) 2001-2012. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 30(3), 185-197. doi: 10.1097/HTR.0000000000000156
- 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*, 9(12), e1922. doi: 10.7759/cureus.1922
- Doğan, N. (2018). Bland-Altman analysis: A paradigm to understand correlation and agreement. *Turkish Journal of Emerging Medicine*, 18(4), 139-141. doi: 10.1016/j.tjem.2018.09.001

- Doolan, A. W., Day, D. D., Maerlender, A. C., Goforth, M. et Gunnar Brolinson, P. (2012). A review of return to play issues and sports-related concussion. *Annals of Biomedical Engineering*, 40(1), 106-113. doi: 10.1007/s10439-011-0413-3
- Doucette, M. M., Du Plessis, S., Webber, A. M., Whalen, C. et Garcia-Barrera, M. A. (2021). In it to win it: Competitiveness, concussion knowledge and nondisclosure in athletes. *Physical Sportsmedicine*, 49(2), 194-202. doi: 10.1080/00913847.2020.1807886
- Echemendia, R. J., Meeuwisse, W., McCrory, P., Davis, G. A., Putukian, M., Leddy, J., . . . Herring, S. (2017). The Sport Concussion Assessment Tool 5th Edition (SCAT5): Background and rationale. *British Journal of Sports Medicine*, 51(11), 848-850. doi: 10.1136/bjsports-2017-097506
- 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), 112-118. doi: 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 & Sciences in Sports & Exercise*, 43(3), 382-387. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181f1cc51
- Elbin, R. J., Schatz, P. et Covassin, T. (2011). One-year test-retest reliability of the online version of ImPACT in high school athletes. *American Journal of Sports Medicine*, 39(11), 2319-2324. doi: 10.1177/0363546511417173
- Fait, P., Swaine, B., Cantin, J. F., Leblond, J. et McFadyen, B. J. (2013). Altered integrated locomotor and cognitive function in elite athletes 30 days postconcussion: a preliminary study. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 28(4), 293-301. doi: 10.1097/HTR.0b013e3182407ace
- Farnsworth, J. L., 2nd, Dargo, L., Ragan, B. G. et Kang, M. (2017). Reliability of Computerized Neurocognitive Tests for Concussion Assessment: A Meta-Analysis. *Journal of Athletic Training*, 52(9), 826-833. doi: 10.4085/1062-6050-52.6.03
- Faubert, J. (2013). Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Science Report*, 3, 1154. doi: 10.1038/srep01154
- Faubert, J. et Sidebottom, L. (2012). Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*(6), 85-102. DOI:10.1123/jcsp.6.1.85
- Feddermann-Demont, N., Echemendia, R. J., Schneider, K. J., Solomon, G. S., Hayden, K. A., Turner, M., Tarnutzer, A. A. (2017). What domains of clinical function should be assessed after sport-related concussion? A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 51(11), 903-918. doi: 10.1136/bjsports-2016-097403
- Fuller, G. W., Tucker, R., Starling, L., Falvey, E., Douglas, M. et Raftery, M. (2020). The performance of the World Rugby Head Injury Assessment Screening Tool: a diagnostic accuracy study. *Sports Medicine Open*, 6(1), 2. doi: 10.1186/s40798-019-0231-y
- Gardner, A. J., Quarrie, K. L. et Iverson, G. L. (2019). The epidemiology of sport-related concussion: what the rehabilitation clinician needs to know. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 49(11), 768-778. doi: 10.2519/jospt.2019.9105

- Gessel, L. M. et al., e. (2007). Concussions among United States high school and collegiate athletes. *Journal of Athletic Training*, 42(4), 495-503. PMID: 18174937
- Giza, C. C. et Hovda, D. A. (2001). The neurometabolic cascade of concussion. *Journal of Athletic Training*, 36(3), 228. PMID: 12937489
- Giza, C. C. et Hovda, D. A. (2014). The new neurometabolic cascade of concussion. *Neurosurgery*, 75 Suppl 4, S24-33. doi: 10.1227/neu.0000000000000505
- Giza, C. C., Kutcher, J. S., Ashwal, S., Barth, J., Getchius, T. S., Gioia, G. A., Zafonte, R. (2013). Summary of evidence-based guideline update: evaluation and management of concussion in sports: report of the Guideline Development Subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology*, 80(24), 2250-2257. doi: 10.1212/WNL.0b013e31828d57dd
- Gordon, K. E. et Kuhle, S. (2020). Canadians Reporting sport-related concussions: increasing and now stabilizing. *Clinical Journal of Sport Medicine*. doi: 10.1097/jsm.0000000000000888
- Graham, R., Rivara, F. P., Ford, M. A. et Spicer, C. M. (2014). Sports-related concussions in youth: improving the science, changing the culture. Dans Y. Committee on Sports-Related Concussions in, Y. Board on Children, Families, M. Institute of C. National Research (dir.), Washington (DC): National Academies Press (US). DOI: 10.17226/18377
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Harding, H. P., Jr., Matthews, A., Cantu, R. C. (2007). Recurrent concussion and risk of depression in retired professional football players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(6), 903-909. doi: 10.1249/mss.0b013e3180383da5
- Haider, M. N., Leddy, J. J., Pavlesen, S., Kluczynski, M., Baker, J. G., Miecznikowski, J. C. et Willer, B. S. (2018). A systematic review of criteria used to define recovery from sport-related concussion in youth athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 52(18), 1179-1190. doi: 10.1136/bjsports-2016-096551
- Harenberg, S., McCaffrey, R., Butz, M., Post, D., Howlett, J., Dorsch, K. D. et Lyster, K. (2016). Can multiple object tracking predict laparoscopic surgical skills? *Journal of Surgical Education*, 73(3), 386-390. doi: 10.1016/j.jsurg.2015.11.013
- Harmon, K. G., Clugston, J. R., Dec, K., Hainline, B., Herring, S., Kane, S. F., Roberts, W. O. (2019). American Medical Society for Sports Medicine position statement on concussion in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 53(4), 213-225. doi: 10.1136/bjsports-2018-100338
- Harris, D. J., Wilson, M. R., Smith, S. J. R., Meder, N. et Vine, S. J. (2020). Testing the effects of 3d multiple object tracking training on near, mid and far transfer. *Frontiers in Psychology*, 11(196). doi: 10.3389/fpsyg.2020.00196
- Hawryluk, G. W. et Manley, G. T. (2015). Classification of traumatic brain injury: past, present, and future. *Handbook of Clinical Neurology*, 127, 15-21. doi: 10.1016/B978-0-444-52892-6.00002-7

- Higgins, K. L., Denney, R. L. et Maerlender, A. (2017). Sandbagging on the Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing (ImPACT) in a high school athlete population. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 32(3), 259-266. doi: 10.1093/arclin/acw108
- Holcombe, A. O. et Chen, W. Y. (2013). Splitting attention reduces temporal resolution from 7 Hz for tracking one object to <3 Hz when tracking three. *Journal of Vision*, 13(1), 12. doi: 10.1167/13.1.12
- Hou, R., Moss-Morris, R., Peveler, R., Mogg, K., Bradley, B. P. et Belli, A. (2012). When a minor head injury results in enduring symptoms: a prospective investigation of risk factors for postconcussional syndrome after mild traumatic brain injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 83(2), 217-223. doi: 10.1136/jnnp-2011-300767
- Houston, M. N., Van Pelt, K. L., D'Lauro, C., Brodeur, R. M., Campbell, D. E., McGinty, G. T., Cameron, K. L. (2021). Test-retest reliability of concussion baseline assessments in United States service academy cadets: A report from the National Collegiate Athletic Association (NCAA)-Department of Defense (DoD) CARE Consortium. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 27(1), 23-34. doi: 10.1017/s1355617720000594
- Hyden, J. et Petty, B. (2016). Sideline management of concussion. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 27(2), 395-409. doi: 10.1016/j.pmr.2015.12.004
- ImPACT Applications. (2021). ImPACT Raw Data & Composite Scores [diaporama], par Burkart, S., Plano, TX. https://concussioncaretraining.com/wpcontent/uploads/Slide_RawData_Burkhart.pdf
- Institut national d'excellence en santé et en services sociaux (INESSS). (2018) Traumatisme craniocérébral léger. Rapport rédigé par Catherine Truchon, Fanny Guérin, Marie-Andrée Ulysse et Geneviève Martin. Québec, Qc : 115 p. https://www.inesss.qc.ca/fileadmin/doc/INESSS/Rapports/Traumatologie/INESSS_Traumatisme_craniocerebral_leger.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2016). Index of material and social deprivation compiled by the Bureau d'information et d'études en santé des populations (BIESP). <https://www.inspq.qc.ca/en/deprivation/material-and-social-deprivation-index>
- Iverson, G. L., Karr, J. E., Maxwell, B., Zafonte, R., Berkner, P. D. et Cook, N. E. (2021). Examining criteria for defining persistent post-concussion symptoms in children and adolescents. *Frontiers in Neurology*, 12, 614648. doi: 10.3389/fneur.2021.614648
- Iverson, G. L., Lovell, M. R. et Collins, M. W. (2003). Interpreting change on ImPACT following sport concussion. *Clinical Neuropsychology*, 17(4), 460-467. doi: 10.1076/clin.17.4.460.27934
- Johnson BT, Huedo-Medina T.B. (2013). *Meta-analytic statistical inferences for continuous measure outcomes as a function of effect size metric and other assumptions*. Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK140578/>

- Kara, S., Crosswell, H., Forch, K., Cavadino, A., McGeown, J. et Fulcher, M. (2020). Less than half of patients recover within 2 weeks of injury after a sports-related mild traumatic brain injury: A 2-year prospective study. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 30(2), 96-101. doi: 10.1097/jsm.0000000000000811
- Kontos, A. P., Braithwaite, R., Dakan, S. et Elbin, R. J. (2014). Computerized neurocognitive testing within 1 week of sport-related concussion: meta-analytic review and analysis of moderating factors. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 20(3), 324-332. doi: 10.1017/s1355617713001471
- Lau, B. C., Collins, M. W. et Lovell, M. R. (2011). Sensitivity and specificity of subacute computerized neurocognitive testing and symptom evaluation in predicting outcomes after sports-related concussion. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(6), 1209-1216. doi: 10.1177/0363546510392016
- Leddy, J. J., Sandhu, H., Sodhi, V., Baker, J. G. et Willer, B. (2012). Rehabilitation of concussion and post-concussion syndrome. *Sports Health*, 4(2), 147-154. doi: 10.1177/1941738111433673
- Lee, S. Y., Amatya, B., Judson, R., Truesdale, M., Reinhardt, J. D., Uddin, T., Khan, F. (2019). Clinical practice guidelines for rehabilitation in traumatic brain injury: a critical appraisal. *Brain Injury*, 33(10), 1263-1271. doi: 10.1080/02699052.2019.1641747
- Lemoyne, J., Poulin, C., Richer, N., & Bussi eres, A. (2017). Analyzing injuries among university-level athletes: prevalence, patterns and risk factors. *Journal of the Canadian Chiropractic Association*, 61 (2), 88-95. PMID: 28928492
- Levitt, H. (1971). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), Suppl 2:467+. doi: 10.1121/1.1912375
- Lovell, M. R., Collins, M.W., Fu, F.M., Burke, C.J., Maroon, J.C., Podell, K., Powell, J. (2001). Neuropsychological testing in sports: past, present, and future. *British Journal of Sports Medicine*, 35(5), 373. <https://link.gale.com/apps/doc/A79559919/AONE?u=anon~f466e322&sid=googleScholar&xid=c8fb9c48>
- Lovett, A., Bridewell, W. et Bello, P. (2019). Selection enables enhancement: An integrated model of object tracking. *Journal of Vision*, 19(14), 23. doi: 10.1167/19.14.23
- Lynch, W. (2018). Options for evaluating and tracking pediatric concussion. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 33(5), 354-361. doi: 10.1097/HTR.0000000000000436
- Lysenko-Martin, M. R., Hutton, C. P., Sparks, T., Snowden, T., Christie, B. R. (2020). Multiple object tracking scores predict post-concussion status years after mild traumatic brain injury. *Journal of Neurotrauma*. doi: 10.1089/neu.2019.6842
- Makdissi, M., Darby, D., Maruff, P., Ugoni, A., Brukner, P. et McCrory, P. R. (2010). Natural history of concussion in sport: markers of severity and implications for management. *American Journal of Sports Medicine*, 38(3), 464-471. doi: 10.1177/0363546509349491
- Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Wells, A. J., Gonzalez, A. M., Rogowski, J. P., Townsend, J. R., Stout, J. R. (2014). Visual tracking speed is related to basketball-specific measures

- of performance in NBA players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(9), 2406-2414. doi: 10.1519/jsc.0000000000000550
- Mann, D. T., Williams, A. M., Ward, P. et Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 29(4), 457-478. doi: 10.1123/jsep.29.4.457
- Mannix, R., O'Brien, M. J. et Meehan III, W. P. (2013). The epidemiology of outpatient visits for minor head injury: 2005 to 2009. *Neurosurgery*, 73(1), 129-134. DOI: 10.1227/01.neu.0000429846.14579.41
- 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 Neuropsychology Society*, 10(2), 286-297. doi: 10.1017/s1355617704102117
- McCrea, M., Guskiewicz, K., Randolph, C., Barr, W. B., Hammeke, T. A., Marshall, S. W., 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 Neuropsychology Society*, 19(1), 22-33. doi: 10.1017/s1355617712000872
- McCrea, M., Hammeke, T., Olsen, G., Leo, P. et Guskiewicz, K. (2004). Unreported concussion in high school football players: implications for prevention. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 14(1), 13-17. doi: 10.1097/00042752-200401000-00003
- McCrory, P., Collie, A., Anderson, V. et Davis, G. (2004). Can we manage sport related concussion in children the same as in adults? *British Journal of Sports Medicine*, 38(5), 516-519. doi: 10.1136/bjsm.2004.014811
- McCrory, P., Meeuwisse, W., Dvorak, J., Aubry, M., Bailes, J., Broglio, S., Vos, P. E. (2017). Consensus statement on concussion in sport-the 5(th) international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016. *British Journal of Sports Medicine*, 51(11), 838-847. doi: 10.1136/bjsports-2017-097699
- McGeown, J. P., Kara, S., Fulcher, M., Crosswell, H., Borotkanics, R., Hume, P. A., Theadom, A. (2019). Predicting sport-related mTBI symptom resolution trajectory using initial clinical assessment findings: A retrospective cohort study. *Sports Medicine*. doi: 10.1007/s40279-019-01240-4
- 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. doi: 10.1371/journal.pone.0174847
- McKee, A. C., Stein, T. D., Kiernan, P. T. et Alvarez, V. E. (2015). The neuropathology of chronic traumatic encephalopathy. *Brain Pathology*, 25(3), 350-364. doi: 10.1111/bpa.12248
- McLendon, L. A., Kralik, S. F., Grayson, P. A. et Golomb, M. R. (2016). The controversial second impact syndrome: A review of the literature. *Pediatric Neurology*, 62, 9-17. doi: 10.1016/j.pediatrneurol.2016.03.009
- McMilla, A., Baer, G., Beattie, A., Carson, A., Edwards, M., Evans. (2013). Brain injury rehabilitation in adults: a national clinical guideline. *Edinburgh: SIGN guidelines*.

- Menon, D. K., Schwab, K., Wright, D. W. et Maas, A. I. (2010). Position statement: definition of traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 91(11), 1637-1640. doi: 10.1016/j.apmr.2010.05.017
- Miller, J. R., Adamson, G. J., Pink, M. M. et Sweet, J. C. (2007). Comparison of preseason, midseason, and postseason neurocognitive scores in uninjured collegiate football players. *American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1284-1288. doi: 10.1177/0363546507300261
- Milleville-Pennel, I., Pothier, J., Hoc, J. M. et Mathe, J. F. (2010). Consequences of cognitive impairments following traumatic brain injury: Pilot study on visual exploration while driving. *Brain Injury*, 24(4), 678-691. doi: 10.3109/02699051003692159
- Moen, F., Hrozanova, M., Stiles, T. et Travlos, A.K.. (2018). The effects of perceptual-cognitive training with Neurotracker on executive brain functions among elite athletes. *Cogent Psychology*, 5. doi: 10.1080/23311908.2018.1544105
- Najem, D., Rennie, K., Ribocco-Lutkiewicz, M., Ly, D., Haukenfrers, J., Liu, Q., Bani-Yaghoub, M. (2018). Traumatic brain injury: classification, models, and markers. *Biochemistry and Cell Biology*, 96(4), 391-406. doi: 10.1139/bcb-2016-0160
- Nelson, L. D., LaRoche, A. A., Pfaller, A. Y., Lerner, E. B., Hammeke, T. A., Randolph, C., McCrea, M. A. (2016). Prospective, head-to-head study of three Computerized Neurocognitive Assessment Tools (CNTs): Reliability and validity for the assessment of sport-related concussion. *Journal of the International Neuropsychology Society*, 22(1), 24-37. doi: 10.1017/s1355617715001101
- Nguyen, R., Fiest, K. M., McChesney, J., Kwon, C. S., Jette, N., Frolkis, A. D., Gallagher, C. (2016). The international incidence of traumatic brain injury: A systematic review and meta-analysis. *Canadian Journal of Neurological Sciences*, 43(6), 774-785. doi: 10.1017/cjn.2016.290
- Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Chandra Sekhar, G., & Thomas, R. (2008). Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. *Indian journal of ophthalmology*, 56(1), 45–50. DOI: 10.4103/0301-4738.37595
- Park, J. E., Han, K., Sung, Y. S., Chung, M. S., Koo, H. J., Yoon, H. M., Park, S. H. (2017). Selection and reporting of statistical methods to assess reliability of a diagnostic test: conformity to recommended methods in a peer-reviewed journal. *Korean Journal of Radiology*, 18(6), 888-897. doi: 10.3348/kjr.2017.18.6.888
- Park, S. Y., Klotzbier, T. J. et Schott, N. (2021). The effects of the combination of high-intensity interval training with 3D-Multiple Object Tracking task on perceptual-cognitive performance: A randomized controlled intervention trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9). doi: 10.3390/ijerph18094862
- Parsons, B., Magill, T., Boucher, A., Zhang, M., Zogbo, K., Berube, S., Faubert, J. (2016). Enhancing cognitive function using perceptual-cognitive training. *Clinical EEG and Neuroscience*, 47(1), 37-47. doi: 10.1177/1550059414563746

- Permenter, C. M., Fernández-de Thomas, R. J. et Sherman, A. L. (2021). Postconcussive syndrome (*StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing Copyright © 2021, StatPearls Publishing LLC.
- Piskin D, Benjaminse A, Dimitrakis P, Gokeler (2021). A. neurocognitive and neurophysiological functions related to ACL injury: A framework for neurocognitive approaches in rehabilitation and return-to-sports tests. *Sports Health*. doi: 10.1177/19417381211029265.
- Plourde, M., Corbeil, M. E. et Faubert, J. (2017). Effect of age and stereopsis on a multiple-object tracking task. *PLoS One*, 12(12), e0188373. doi: 10.1371/journal.pone.0188373
- Portney LG, Watkins MP. Foundations of clinical research: applications to practice 3rd edition. Upper Saddle River: Pearson: Prentice Hall; 2009.
- Public Health Agency of Canada (2020), Injury in review, 2020 edition: Spotlight on traumatic brain injuries across the life course. *Health Promotion and Chronic Disease Prevention Canada*, 40 (9), 294.
- Pylyshyn, Z. W. (2003). *Seeing and visualizing: It's not what you think*. Bradford book. Cambridge, MA.
- Pylyshyn, Z. W. et Storm, R. W. (1988). Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision*, 3(3), 179-197. doi: 10.1163/156856888x00122
- Qiu, F., Pi, Y., Liu, K., Li, X., Zhang, J. et Wu, Y. (2018). Influence of sports expertise level on attention in multiple object tracking. *PeerJ*, 6, e5732. doi: 10.7717/peerj.5732
- Resch, J.E., Brown, C.N., Schmidt, J., Macciocchi, S.N., Blueitt, D., Cullum, C.M., Ferrara, M.S. The sensitivity and specificity of clinical measures of sport concussion: three tests are better than one. *BMJ Open Sport Exercise Medicine*. 2016 Jan 19;2(1):e000012. doi: 10.1136/bmjsem-2015-000012
- Ruff, R. M., Iverson, G. L., Barth, J. T., Bush, S. S., Broshek, D. K., Policy, N. A. N. et Planning, C. (2009). Recommendations for diagnosing a mild traumatic brain injury: a National Academy of Neuropsychology education paper. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 24(1), 3-10. doi: 10.1093/arclin/acp006
- Sandel, N. K., Worts, P. R., Burkhart, S. et Henry, L. (2018). Comparison of baseline ImPACT performance in amateur motocross riders to football and basketball athletes. *Brain Injury*, 32(4), 493-497. doi: 10.1080/02699052.2018.1429020
- Savage, J. L. et Covassin, T. (2018). The self-efficacy of certified athletic trainers in assessing and managing sport-related concussions. *Journal of Athletic Training*, 53(10), 983-989. doi: 10.4085/1062-6050-394-17
- Savitsky, B., Givon, A., Rozenfeld, M., Radomislensky, I. et Peleg, K. (2016). Traumatic brain injury: It is all about definition. *Brain Injury*, 30(10), 1194-1200. doi: 10.1080/02699052.2016.1187290

- Scharfen, J., Jansen, K. et Holling, H. (2018). Retest effects in working memory capacity tests: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(6), 2175-2199. doi: 10.3758/s13423-018-1461-6
- Schatz, P. (2010). Long-term test-retest reliability of baseline cognitive assessments using ImPACT. *American Journal of Sports Medicine*, 38(1), 47-53. doi: 10.1177/0363546509343805
- Schatz, P. et Ferris, C. S. (2013). One-month test-retest reliability of the ImPACT test battery. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28(5), 499-504. doi: 10.1093/arclin/act034
- Schatz, P. et Robertshaw, S. (2014). Comparing post-concussive neurocognitive test data to normative data presents risks for under-classifying "above average" athletes. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 29(7), 625-632. doi: 10.1093/arclin/acu041
- Schreij, D., Owens, C., & Theeuwes, J. (2008). Abrupt onsets capture attention independent of top-down control settings. *Attention, Perception & Psychophysics*, 70(2), 208–218. doi: 10.3758/PP.70.2.208
- Shields, B. J., Fernandez, S. A. et Smith, G. A. (2009). Epidemiology of cheerleading stunt-related injuries in the United States. *Journal of Athletic Training*, 44(6), 586-594. doi: 10.4085/1062-6050-44.6.586
- Shuttleworth-Edwards, A. B., Whitefield-Alexander, V. J. et Radloff, S. E. (2013). The ImPACT neurocognitive screening test a survey of South African research including current and projected applications. Dans S. Laher et K. Cockcroft (dir.), *Psychological Assessment in South Africa* (p. 443-460): Wits University Press.
- Sinnott, A. M., Elbin, R. J., Collins, M. W., Reeves, V. L., Holland, C. L. et Kontos, A. P. (2019). Persistent vestibular-ocular impairment following concussion in adolescents. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22(12), 1292-1297. doi: 10.1016/j.jsams.2019.08.004
- Strauss, M. E. et Smith, G. T. (2009). Construct validity: advances in theory and methodology. *Annual Review of Clinical Psychology*, 5, 1-25. doi: 10.1146/annurev.clinpsy.032408.153639
- Teasdale, G., Maas, A., Lecky, F., Manley, G., Stocchetti, N. et Murray, G. (2014). The Glasgow Coma Scale at 40 years: standing the test of time. *Lancet Neurology*, 13(8), 844-854. doi: 10.1016/s1474-4422(14)70120-6
- Tenovuo, O., Diaz-Arrastia, R., Goldstein, L. E., Sharp, D. J., van der Naalt, J. et Zasler, N. D. (2021). Assessing the severity of traumatic brain injury-time for a change? *Journal of Clinical Medicine*, 10(1). doi: 10.3390/jcm10010148
- Tsushima, W. T., Siu, A. M., Pearce, A. M., Zhang, G. et Oshiro, R. S. (2016). Two-year test-retest reliability of ImPACT in high school athletes. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 31(1), 105-111. doi: 10.1093/arclin/acv066
- Tsushima, W. T., Yamamoto, M. H., Ahn, H. J., Siu, A. M., Choi, S. Y. et Murata, N. M. (2021). Invalid baseline testing with ImPACT: does sandbagging occur with high school athletes? *Applied Neuropsychology: Child*, 10(3), 209-218. doi: 10.1080/21622965.2019.1642202

- 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. doi: 10.1111/desc.12670
- Urban, K. J., Riggs, L., Wells, G. D., Keightley, M., Chen, J. K., Ptito, A., Sinopoli, K. J. (2017). Cortical thickness changes and their relationship to dual-task performance following mild traumatic brain injury in youth. *Journal of Neurotrauma*, 34(4), 816-823. doi: 10.1089/neu.2016.4502
- Van Pelt, K. L., Lapointe, A. P., Galdys, M. C., Dougherty, L. A., Buckley, T. A. et Broglio, S. P. (2019). Evaluating Performance of national hockey league players after a concussion versus lower body injury. *Journal of Athletic Training*, 54(5), 534-540. doi: 10.4085/1062-6050-218-18
- Vander Vorst, M., Ono, K., Chan, P. et Stuhmiller, J. (2007). Correlates to traumatic brain injury in nonhuman primates. *Journal of Trauma*, 62(1), 199-206. doi: 10.1097/01.ta.0000238665.09611.4b
- Vater, C., Gray, R. et Holcombe, A. O. (2021). A critical systematic review of the Neurotracker perceptual-cognitive training tool. *Psychonomic Bulletin & Review*. doi: 10.3758/s13423-021-01892-2
- Viano, D. C., Casson, I. R., Pellman, E. J., Zhang, L., King, A. I. et Yang, K. H. (2005). Concussion in professional football: brain responses by finite element analysis: part 9. *Neurosurgery*, 57(5), 891-916; discussion 891-916. doi: 10.1227/01.neu.0000186950.54075.3b
- Voss, J. D., Connolly, J., Schwab, K. A. et Scher, A. I. (2015). Update on the epidemiology of concussion/mild traumatic brain injury. *Current Pain and Headache Reports*, 19(7), 32. doi: 10.1007/s11916-015-0506-z
- World Health Organisation (2012). *The ICD-10 classification of mental and behavioural disorders: clinical descriptions and diagnostic guidelines*. Geneva.
- Wiebe, D. J., Comstock, R. D. et Nance, M. L. (2011). Concussion research: a public health priority. *Injury Prevention*, 17(1), 69-70. doi: 10.1136/ip.2010.031211
- Zemek, R., Barrowman, N., Freedman, S. B., Gravel, J., Gagnon, I., McGahern, C., Osmond, M. H. (2016). Clinical risk score for persistent postconcussion symptoms among children with acute concussion in the ED. *Jama*, 315(10), 1014-1025. doi: 10.1001/jama.2016.1203
- Zhang, H., Xuan, Y., Fu, X., & Pylyshyn, Z. W. (2010). Do objects in working memory compete with objects in perception? *Visual Cognition*, 18(4), 617-640. doi: https://doi.org/10.1080/13506280903211142
- 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. *American Journal of Sports Medicine*, 43(11), 2654-2662. doi: 10.1177/0363546515599634

Certificat d'éthique

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 UQTR
Dre. Isabelle Gagnon
MUHC - Montréal Children's Hospital
Laurie-Ann Corbin-Berrigan
Département des sciences de l'activité physique UQTR
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 2020 au 07 octobre 2021**

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

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

Me Richard LeBlanc
Vice-président du comité

Fanny Longpré
Secrétaire du comité