

PHILIPPE FAIT

**EFFETS D'UNE DIVISION D'ATTENTION PENDANT  
LE CONTOURNEMENT D'OBSTACLES FIXES OU  
MOBILES CHEZ DES SUJETS AYANT SUBI UN  
TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL**

Thèse présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de doctorat en Médecine Expérimentale  
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

FACULTÉ DE MÉDECINE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2011

## Résumé

L'objectif général de cette thèse était de comparer les effets d'une division de l'attention sur la combinaison de la locomotion en contournant des obstacles fixes et mobiles entre des participants ayant un traumatisme craniocérébral (TCC) et des participants sains. Une approche biomécanique a été utilisée pour analyser les altérations fonctionnelles qui ont été soulevées chez des adultes ayant un TCC de grade modéré ou sévère et des athlètes d'élite présentant un TCC de grade léger (TCCL). Des enfants sains ont aussi été étudiés afin de mieux comprendre les altérations fonctionnelles présentes à la suite d'une division d'attention dans des environnements complexes mais écologiques. Les adultes ayant un TCC ont démontré des temps de réaction de réponse plus longs, ont fait plus d'erreurs dans la réponse à la tâche d'interférence, avaient une vitesse moyenne de marche plus lente, une vitesse maximale de marche plus lente et démontraient aussi plus de dégagement minimal face aux obstacles que les adultes sains du groupe-contrôle. Ils ont également plus de difficulté à effectuer deux tâches ou plus simultanément. Il semble aussi que les déficits des fonctions exécutives, plus particulièrement au niveau de la planification, sont évidents chez des adultes avec un TCC modéré ou sévère mais aussi chez les athlètes ayant un TCCL. La planification et la navigation sont deux aspects importants dans le sport et pour les athlètes qui ont déjà eu un TCCL Cet aspect est primordial pour éviter de se mettre dans des situations à risque potentiel d'autres blessures à la tête. De plus, il a été démontré que même si les athlètes ne présentaient aucun symptôme et que leur résultats aux tests neuropsychologiques étaient revenus au niveau d'avant leur blessure, ils présentaient tout de même des altérations fonctionnelles plus de 30 jours suivant cette blessure. Une partie de cette thèse a été faite auprès d'enfants sains pratiquant le hockey sur glace. La vitesse maximale de patinage a diminué avec l'ajout de la tâche d'interférence visuelle et plus d'erreurs ont été commises lors de l'ajout du maniement du bâton.

## Abstract

The global goal of this thesis was to compare the combined locomotor and cognitive behaviour during divided attention while circumventing fixed and mobile obstacles between participants with a traumatic brain injury (TBI) and healthy participants. Four studies involved different factors such as obstacle movement, visual interference and two different types of locomotion (walking and ice skating). Healthy children were also studied to better understand the functional alterations due to a division of attention in a complex, but ecological, environment. In studies I to III, adults with TBI showed longer response reaction times, made more errors in response to the interference task, had a slower average gait speed, a slower maximal gait speed and also showed larger minimal clearances from the obstacles than healthy adults (the control group). These individuals with TBI had more difficulty performing two or more tasks simultaneously. Deficits in executive function, especially at the planning level, were also evident in not only adults with TBI, but also in athletes with mTBI. Planning and navigation are two important aspects in sports. For athletes who have already sustained an mTBI, these aspects are crucial to avoid putting themselves in situations of potential risk for further head injury. In addition, it has been demonstrated in this thesis that even if athletes show no symptoms and their neuropsychological test scores return back to baseline level, they still have functional abnormalities more than 30 days after the mTBI. Part of this thesis also included healthy children practicing ice hockey studying whether it is possible to use the laboratory protocol and collect data directly in a complex ecological environment, such as an ice hockey rink. The execution of a very specialized movement, like skating on ice while avoiding an obstacle and performing an interference task, requires rapid integration of information and large attentional resources. When increasing the number of tasks, there is a decrease in the physical and cognitive performance among participants. The maximal skating speed decreased when visual interference was added and subjects made more errors when stickhandling was added.

# Avant-Propos

## Remerciements

J'aimerais remercier avant tout le Dr Bradford McFadyen qui m'a supporté tout au long de ce projet de doctorat, autant sur les plans académique et scientifique que sur le plan personnel. Le support financier au cours de mes études de doctorat a été assuré par les fonds du Dr McFadyen et je l'en remercie infiniment. Je remercie également ma codirectrice de recherche, la Dre Bonnie Swaine, qui, malgré l'éloignement, a toujours su répondre promptement à mes interrogations de manière concise et rapide. De plus, ses commentaires toujours judicieux m'ont aussi permis de progresser au fil des années passées à réaliser ce projet de doctorat. Je tiens aussi à remercier M. Guy St-Vincent pour son assistance technique constante lors de la prise de données dans le laboratoire, ainsi que pour les nombreuses heures passées à élaborer des programmes informatiques qui m'ont grandement simplifié la vie. Un merci particulier aussi à plusieurs chercheurs qui m'ont grandement inspiré et conseillé tout au long de mon séjour au CIRRI: la Dre Carol Richards, le Dr Luc Noreau, le Dr Laurent Bouyer et la Dre Claude Vincent. Merci aussi aux membres du personnel du CIRRI pour leur dévouement quotidien, et aux autres étudiants qui ont contribué à rendre mon expérience plus facile. J'aimerais souligner tout particulièrement l'apport d'Andréanne Blanchette, de Kadija Perreault, ainsi que de ma grande amie Emmanuelle Careau. Avec cette dernière, j'ai pu échanger autant sur des sujets scientifiques que personnels. Elle m'a également supporté dans les temps les plus difficiles et elle a toujours su me mener vers des perspectives nouvelles sur presque tous les sujets.

J'aimerais aussi exprimer ma gratitude profonde aux membres de ma famille pour leurs encouragements au cours de ce long projet d'étude.

Finalement, j'aimerais souligner de façon toute particulière le dévouement et le soutien quotidien d'une personne exceptionnelle, Isabelle Létourneau. Sans elle, sans sa patience, son indulgence et ses conseils judicieux, ce projet de doctorat n'aurait sûrement pas vu le jour. Pour m'avoir supporté et pour avoir enduré les nombreuses heures passées devant l'ordinateur et les jours passés au loin, je la remercie du plus profond du cœur.

*À toutes les victimes d'un traumatisme craniocérébral*

## Informations à propos des manuscrits insérés

Cette thèse est composée de quatre manuscrits d'articles rédigés en anglais et insérés dans l'ordre suivant : Chapitre 3 – Étude I; Chapitre 4 – Étude II; Chapitre 5 – Étude III et Chapitre 6 – Étude IV. Conformément à la réglementation de l'Université Laval sur l'insertion d'articles dans les thèses, les informations suivantes comprennent le titre, les coauteurs, la contribution de l'étudiant incluant son statut d'auteur, les revues scientifiques auxquelles les manuscrits ont été soumis ou dans lesquels ils ont été publiés, ainsi que toute modification apportée aux articles insérés depuis qu'ils ont fait l'objet d'une publication.

### Chapitre 3 – Étude I

*Understanding changes in locomotor navigation during the circumvention of fixed and moving obstacles in adults with moderate or severe traumatic brain injury.*

Non publié, pour soumission ultérieure

Auteur principal : <sup>a,b</sup>Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), Candidat au doctorat (Ph.D).  
Coauteurs : <sup>c,d</sup>Bonnie Swaine, Ph.D., Pht; <sup>b,e</sup>Jean-François Cantin, Ph.D.; <sup>e</sup>Lucie Gagnon, B.Sc., Pht et <sup>a,b</sup>Bradford J. McFadyen, Ph.D.

Affiliations :

<sup>a</sup>Faculté de Médecine, Université Laval, Canada.

<sup>b</sup>Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale.

<sup>c</sup>École de réadaptation, Faculté de médecine, Université de Montréal.

<sup>d</sup>Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation.

<sup>e</sup>Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec.

Contribution de l'étudiant : Élaboration et réalisation complète de l'étude sous la supervision du Dr Bradford McFadyen et de la Dre Bonnie Swaine. 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 les coauteurs ont participé.

Modification de l'original : Aucune modification n'a été apportée.

## Chapitre 4 – Étude II

*Athletes showing normal clinical outcomes present alterations to integrated locomotor and cognitive function more than 30 days following a first non-complex mild traumatic brain injury.*

Soumis à la revue « Journal of Head Trauma Rehabilitation » en septembre 2010.

Auteur principal : <sup>a,b</sup>Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), Candidat au doctorat (Ph.D).  
Coauteurs : <sup>c,d</sup>Bonnie Swaine, Ph.D., Pht; <sup>b,e</sup>Jean-François Cantin, Ph.D. et <sup>a,b</sup>Bradford J. McFadyen, Ph.D.

Affiliations :

<sup>a</sup>Faculté de Médecine, Université Laval, Canada.

<sup>b</sup>Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale.

<sup>c</sup>École de réadaptation, Faculté de médecine, Université de Montréal.

<sup>d</sup>Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation.

<sup>e</sup>Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec.

Contribution de l'étudiant : Élaboration et réalisation complète de l'étude sous la supervision du Dr Bradford McFadyen et de la Dre Bonnie Swaine. 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 les coauteurs ont participé.

Modification de l'original : Aucune modification n'a été apportée.

## Chapitre 5 – Étude III

*Alterations to locomotor navigation in a complex environment at 7 and 30 days following a concussion in an elite athlete.*

Publié dans la revue « Brain Injury » 2009, 23(4):362-9

Auteur principal : <sup>a,b</sup>Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), Candidat au doctorat (Ph.D).  
Coauteurs : <sup>a,b</sup>Bradford J. McFadyen, Ph.D.; <sup>c,d</sup>Bonnie Swaine, Ph.D., Pht et <sup>b,e</sup>Jean-François Cantin, Ph.D.

Affiliations :

<sup>a</sup>Faculté de Médecine, Université Laval, Canada.

<sup>b</sup>Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale.

<sup>c</sup>École de réadaptation, Faculté de médecine, Université de Montréal.

<sup>d</sup>Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation.

<sup>e</sup>Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec.

Contribution de l'étudiant : Élaboration et réalisation complète de l'étude sous la supervision du Dr Bradford McFadyen et de la Dre Bonnie Swaine. 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 les coauteurs ont participé.

Modification de l'original: Le manuscrit inséré est conforme à celui publié, seul son format a été adapté pour satisfaire aux exigences de l'Université Laval en matière de présentation de la thèse.

## Chapitre 6 – Étude IV

*Increasing task complexity and ice hockey skills of youth athletes.*

Accepté pour publication dans la revue «Perceptual & Motor Skills» le 19 novembre 2010.

Auteur principal : <sup>a,b</sup>Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), Candidat au doctorat (Ph.D).  
 Coauteurs : <sup>a,b</sup>Bradford J. McFadyen, Ph.D.; <sup>c,d,e</sup>Karl Zabjek, Ph.D.; <sup>f</sup>Nick Reed, M.Sc., OT;  
<sup>g</sup>Tim Taha, Ph.D.; <sup>d,e,f,h,i</sup>Michelle Keightley, Ph.D.

Affiliations :

<sup>a</sup>Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale

<sup>b</sup>Faculté de Médecine, Université Laval

<sup>c</sup>Department of Physical Therapy, University of Toronto

<sup>d</sup>Toronto Rehabilitation Institute

<sup>e</sup>Bloorview Kids Rehab Research Institute

<sup>f</sup>Graduate Department of Rehabilitation Science, University of Toronto.

<sup>g</sup>Faculty of Physical Education and Health, University of Toronto.

<sup>h</sup>Department of Occupational Science and Occupational Therapy, University of Toronto.

<sup>i</sup>Department of Psychology, University of Toronto.

Contribution de l'étudiant: Élaboration et réalisation complète de l'étude sous la supervision de la Dre Michelle Keightley et du Dr Bradford McFadyen. 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 les coauteurs ont participé.

Modification de l'original: Le manuscrit inséré est conforme à celui soumis, seul son format a été adapté pour satisfaire aux exigences de l'Université Laval en matière de présentation de la thèse.



## Liste des abréviations

### Texte français

3D	Tridimensionnel
CIRRIS	Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale
CM	Centre de masse
CPG	Générateur de patron central
IRDPQ	Institut de réadaptation en déficience physique de Québec
TCC	Traumatisme craniocérébral
TCCL	Traumatisme craniocérébral léger

### Texte anglais

3D	Three-dimensional
CIRRIS	Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation and Social Integration
CM	Center of mass
DTC	Dual task costs
QRI	Quebec City Rehabilitation Institute
TBI	Traumatic brain injury
mTBI	Mild traumatic brain injury
ONF	Ontario Neurotrauma Foundation
REPAR	Quebec Rehabilitation Research Network
RRT	Response reaction times

## Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Avant-Propos.....	iii
Remerciements.....	iii
Informations à propos des manuscrits insérés.....	v
Chapitre 3 – Étude I .....	v
Chapitre 4 – Étude II.....	vi
Chapitre 5 – Étude III.....	vi
Chapitre 6 – Étude IV .....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Texte français .....	viii
Texte anglais .....	viii
Table des matières.....	ix
Liste des Tableaux.....	xiii
Liste des Figures .....	xiv
Introduction .....	15
CHAPITRE 1 - ÉTAT DES CONNAISSANCES .....	16
1.1 Définition d'un traumatisme craniocérébral (TCC).....	16
1.2 Les données épidémiologiques pour le TCC .....	18
1.3 L'étiologie et les facteurs de risque d'un TCC .....	19
1.4 Le traumatisme craniocérébral léger dans un contexte sportif.....	20
1.5 Pathophysiologie, récupération et symptômes.....	21
1.6 Retour au sport suivant un TCCL .....	22
1.7 Déficits fonctionnels chroniques suivant un TCC .....	24
1.7.1 Évaluation neuropsychologique du TCCL.....	25
1.8 Les facteurs potentiels influençant le processus de récupération.....	26
1.8.1 Périodes sensibles ou à risque durant la récupération.....	28
1.8.2 Régénération et réorganisation neuronale suivant un TCC.....	28
1.8.3 Récupération au niveau de la fonction .....	29
1.9 Le contrôle locomoteur .....	30
1.9.1 Contournement d'obstacles .....	32
1.9.1.1 Population normale .....	32
1.9.1.2 Population ayant subi un TCC .....	33
1.9.2 Contrôle postural, équilibre et marche chez la population TCC.....	33
1.10 L'attention lors de la marche et dans la stabilité posturale .....	34
1.10.1 Définition de l'attention .....	34
1.10.2 Concept de double tâche pendant la marche.....	35
1.10.3 Déficit attentionnel dû au TCC. ....	37
1.10.4 Incapacités attentionnelles pendant la marche suivant un TCC.....	38
1.11 Objectifs généraux .....	39
1.12 Hypothèses générales .....	39
1.11.2 Hypothèses spécifiques .....	39
1.11.2.1 Étude I.....	39
1.11.2.3 Étude II.....	39

1.11.2.3 Étude III .....	40
1.11.2.4 Étude IV .....	40
CHAPITRE 2 – MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE .....	41
2.1 Participants et déclaration d'éthique .....	41
2.2 Équipement .....	41
2.2.1 Obstacles .....	41
2.2.1.1 Obstacle mobile (étude I, II et III) .....	41
2.2.1.2 Obstacle fixe.....	42
2.2.2 Outils de mesure du mouvement 3D.....	43
2.2.2.1 Prises de données cinématique avec le système Optotrak 3020 .....	43
2.2.2.2 Vicon Mx™.....	44
2.3 Procédures expérimentales.....	44
2.3.1 Préparation de l'équipement .....	44
2.3.2 Préparation des sujets.....	45
2.3.3 Protocole de test du comportement locomoteur.....	46
2.3.3 Tâche d'interférence.....	46
2.4 Procédures d'analyse.....	46
2.4.1 Traitement des données cinématiques.....	46
2.4.2 Variables dépendantes.....	47
2.4.3 Statistiques .....	47
CHAPITRE 3 – ÉTUDE I.....	48
3.1 Résumé en français .....	48
3.2 Introduction .....	48
3.3 Methodology .....	50
3.4 Results.....	54
3.4.1 Clinical neuropsychological testing .....	54
3.4.2 Responses Reaction Times (RRT) .....	55
3.4.3 Errors.....	56
3.4.4 Average gait speed .....	56
3.4.6 Point of deviation .....	58
3.4.7. Variability in Point of deviation.....	58
3.4.8 Minimal clearance.....	60
3.5 Discussion .....	61
3.6 Conclusion.....	64
3.7 Acknowledgements .....	64
CHAPITRE 4 – ÉTUDE II .....	65
4.1 Résumé en français .....	65
4.2 Introduction .....	65
4.3 Methodology .....	67
4.4 Results .....	71
4.5 Discussion .....	80
4.6 Limitations of the study .....	84
4.7 Conclusion.....	84
4.8 Acknowledgments.....	84
CHAPITRE 5 – ÉTUDE III .....	85
5.1 Résumé en français .....	85
5.2 Introduction .....	85

5.3 Case Report .....	87
5.4 Objectives.....	88
5.5 Methodology .....	88
5.6 Results.....	90
5.6.1 Dual Task Costs .....	90
5.6.2 Errors.....	91
5.6.3 Minimal clearance.....	91
5.6.4 Maximal gait speed .....	92
5.7 Discussion .....	93
5.8 Conclusion.....	95
5.9 Acknowledgements.....	96
CHAPITRE 6 – ÉTUDE IV .....	97
6.1 Résumé en français .....	97
6.2 Introduction .....	97
6.3 Method .....	100
6.3.1 Participants.....	100
6.3.2 Task protocol.....	101
6.3.3 Description of Tasks .....	102
6.3.3.1 Skating.....	102
6.3.3.2 Visual Interference.....	102
6.3.3.3 Obstacle avoidance.....	103
6.3.3.4 Stickhandling.....	104
6.3.4 Apparatus.....	104
6.3.5 Outcomes measures.....	104
6.3.6 Analysis.....	104
6.4 Results.....	105
6.4.1 Cognitive Results .....	105
6.4.1.1 Stroop Task Errors.....	105
6.4.1.2 Dual Task Costs (DTC).....	106
6.4.2 Locomotor Results .....	107
6.4.2.1 Maximal skating speed.....	107
6.4.2.2 Minimal clearance of obstacles.....	109
6.5 Discussion .....	110
6.5.1 Cognitive Performance.....	110
6.5.2 Locomotor Performance.....	112
6.6 General Discussion.....	112
6.7 Conclusion.....	114
6.8 Acknowledgements .....	114
CHAPITRE 7 - DISCUSSION .....	115
7.1 La synthèse des études I, II, III et IV .....	115
7.2. Les forces et les faiblesses sur le plan méthodologique.....	118
7.3 Les retombées potentielles de l'étude et les pistes pour de futures recherches .....	119
Conclusion.....	120
Références.....	121
Annexe 1 .....	142
Certificats d'éthique.....	142
Annexe 2 .....	145

Formulaire d'information et de consentement .....	145
Annexe 3 .....	151
Placement des marqueurs et listes des points sondés.....	151
Annexe 4 .....	153
Questionnaires et formulaires .....	153
Annexe 5 .....	161
Protocole technique.....	161
Formulaire de prise de données.....	165

## Liste des Tableaux

### Chapitre 3 – Étude I

Table 1: Characteristics of the participants.....	p.50
Table 2. Neuropsychological tests and p-values.....	p.54

### Chapitre 4 – Étude II

Table 1: Characteristics of the participants.....	p.68
Table 2. Neuropsychological tests and p-values.....	p.72

### Chapitre 6 – Étude IV

Table 1. Participants' characteristics.....	p.101
Table 2. Task Protocol conditions.....	p.102
Table 3. Frequency of Stroop task Errors By Experimental Condition.....	p.106
Table 4. Descriptive statistics for du; task costs collapsed across trials for each experimental condition.....	p.107
Table 5. Descriptive statistics for maximal skating speed collapsed across trials for each experimental condition.....	p.108
Table 6. Descriptive statistics for minimal obstacle clearance collapsed across trials for each experimental condition.....	p.110

## Liste des Figures

### Chapitre 2 - Méthodologie

Figure 1. Système d'obstacle mobile utilisé dans les Études I, II et III.....	42
Figure 2. Obstacle gonflable utilisé pour l'Étude IV.....	43

### Chapitre 3 – Étude I

Figure 1. Set-up of the laboratory.....	p.52
Figure 2. Response Reaction Times.....	p.55
Figure 3. Number of errors.....	p.56
Figure 4. Average gait speed.....	p.57
Figure 5. Maximal gait speed.....	p.58
Figure 6. Point of path deviation.....	p.59
Figure 7. Variability in point of path deviation.....	p.60
Figure 8. Minimal clearance.....	p.61

### Chapitre 4 – Étude II

Figure 1. Set-up of the laboratory.....	p.70
Figure 2. Dual Task Costs.....	p.73
Figure 3. Number of errors.....	p.74
Figure 4. Minimal Clearance.....	p.75
Figure 5. Average gait Speed.....	p.76
Figure 6. Variability of gait speed.....	p.77
Figure 7. Maximal Gait speed.....	p.78
Figure 8. Variability in maximal gait speed.....	p.79
Figure 9. a) Point of path deviation; b) Variability of point of path deviation.....	p.80

### Chapitre 5 – Étude III

Figure 1. Set-up of the laboratory.....	p.89
Figure 2. a) Dual Task Costs; b) Number of Errors.....	p.91
Figure 3. a) Minimal Clearance; b)Maximal Gait Speed.....	p.93

### Chapitre 6 – Étude IV

Figure 1. Experiment set-up.....	p.103
----------------------------------	-------

## Introduction

Le cerveau est un organe complexe qui coordonne toutes les fonctions chez l'humain. Les atteintes au cerveau, comme le traumatisme craniocérébral (TCC), ont été reconnues depuis plus de 450 ans puisque le terme *commotio cerebri* (commotion cérébrale), qui prend ses origines du verbe latin *concutere* (« secouer violemment »), a été introduit par le médecin français Ambroise Paré au 16<sup>e</sup> siècle.<sup>1,2</sup> Malgré tout, peu de choses sont connues quant aux changements au niveau des fonctions motrices, plus précisément au niveau de la posture et de la locomotion chez des personnes ayant subi un TCC. Pourtant, les statistiques nous démontrent que le TCC est un phénomène en croissance dont l'ampleur n'est plus à démontrer. Les quelques études qui se sont penchées sur l'aspect locomoteur à la suite d'un TCC ont rarement mis en parallèle les problèmes attentionnels fréquemment rencontrés chez cette population, avec les déficits locomoteurs.

De plus, le retour à la fonction en général et le retour au jeu pour les athlètes à la suite d'un TCC donne encore lieu à des divergences dans la littérature, faute de données probantes. Le manque d'attention est un déficit principal qui peut être à la base de plusieurs problèmes reliés au TCC. Pour en évaluer l'impact, il est donc important d'étudier les effets d'une division d'attention sur la locomotion en environnement complexe mais écologique chez des personnes ayant subi un TCC.

Les études composant cette thèse ont donc porté sur cet aspect pour divers échantillons de population et diverses sévérités de TCC (Étude 1 : TCC modéré et sévère chez l'adulte; Étude 2 : TCC léger (TCCL) chez les athlètes de haut niveau; Étude 3 : Étude de cas chez un athlète avec TCCL; et Étude 4 : Enfants sains utilisant le patinage comme mode de locomotion). Le prochain chapitre abordera donc l'état des connaissances générales sur le TCC.



# CHAPITRE 1 - ÉTAT DES CONNAISSANCES

## 1.1 Définition d'un traumatisme craniocérébral (TCC)

Le TCC est habituellement divisé en trois niveaux de sévérité (léger, modéré, ou sévère) selon un continuum partant du plus léger au plus sévère. Cependant, il n'y a pas de consensus dans la littérature pour définir précisément et sur des données probantes ce qu'est un TCC. La définition la plus simple du TCC en fait un traumatisme causant une destruction ou une dysfonction du système nerveux intracrânien.<sup>3</sup> Une définition plus précise a été proposée à la suite d'une consultation d'experts québécois en traumatologie:<sup>4</sup>

*« Le traumatisme craniocérébral représente une atteinte cérébrale, excluant toute étiologie dégénérative ou congénitale, causée par une force physique extérieure susceptible de déclencher une diminution ou une altération de l'état de conscience avec la perturbation des fonctions cognitives associées ou non à une dysfonction physique; des modifications du comportement et de l'état émotionnel peuvent également être observées. L'incapacité qui résulte du traumatisme est soit temporaire, soit permanente avec des limitations physiques, neuropsychologiques ou psychosociales partielles ou totales. »*

Depuis longtemps, les cliniciens ont déterminé ces classifications en se basant sur l'Échelle de Coma de Glasgow, une mesure très utilisée pour évaluer l'état d'éveil de l'individu ayant subi un TCC.<sup>5,6</sup> L'échelle de Glasgow est un indicateur de l'état de conscience qui est habituellement utilisé dans un contexte d'urgence. L'échelle comprend un score débutant à 3 (coma profond ou la mort) et ayant un maximum de 15 (personne parfaitement consciente), étant évalué sur trois indicateurs principaux : l'ouverture des yeux, la réponse verbale et la réponse motrice. Un score de 13 à 15 indique un TCCL, de 9 à 12 un TCC modéré et de 8 à 3 un TCC sévère.<sup>5</sup> Faire une distinction entre les divers niveaux de sévérité du TCC est souvent plus difficile aux niveaux moins sévères, en raison des différents critères de diagnostics et méthodologies pour étudier les TCC plus légers.<sup>7</sup> L'identification précise du TCC est importante puisque 75% à 88% de toutes ces blessures sont considérées comme légères.<sup>3,8-13</sup> Le comité formé sur le TCC léger faisant partie du Groupe interdisciplinaire des blessures crâniennes au Congrès américain sur la

réhabilitation médicale (1993)<sup>14</sup> a offert la définition suivante du trauma craniocérébral léger:

*« a physiological disruption of brain function that is manifested by at least one of the following: loss of consciousness and memory, alteration in mental state, or focal neurological deficits, but where the extent of the injury does not exceed posttraumatic amnesia greater than 24 hours, an initial Glasgow Coma Score of 13-15, or loss of consciousness of 30 minutes. »*

Même si cette définition inclut les individus n'ayant pas subi une perte de conscience, elle n'inclut pas les individus ayant reçu un coup à la tête, mais qui fonctionnent normalement et qui ne démontrent aucune évidence d'une atteinte physiologique au cerveau.<sup>15,10,16</sup> D'autres auteurs<sup>10</sup> sont en désaccord avec l'usage de l'Échelle de Coma de Glasgow pour déterminer les TCCL parce que, selon eux, cette échelle n'est pas suffisamment valide et sensible pour distinguer les traumas plus légers. En ce sens, une définition plus précise est requise pour différencier les divers degrés de TCCL. De nombreuses définitions formelles du TCCL ont été révisées et raffinées au cours des années.<sup>17</sup> Des auteurs<sup>18</sup> ont passé en revue le développement historique de ces définitions et ont offert la définition suivante:

*« Le TCCL est une blessure interne à la tête qui représente un changement habituellement passager des processus normaux de la conscience en raison d'un trauma au cerveau. Les changements peuvent inclure la perte de conscience, l'amnésie, l'affaiblissement de l'activité réflexe, et une altération du sens de l'orientation. Bien que, dans la majorité de cas, la plupart des symptômes se dissipent en quelques jours, quelques symptômes physiques comme les céphalées et les symptômes cognitifs tels que le dysfonctionnement de la mémoire, peuvent persister pendant un temps indéterminé. »*

Gadoury et al. (2005) proposent d'utiliser une définition plus complexe qui est tirée du Task force de l'Organisation mondiale de la santé (Task Force, chap. 12, p.115).

*« Le traumatisme craniocérébral léger est une atteinte cérébrale aiguë résultant d'un transfert d'énergie d'une source externe vers le crâne et les structures sous-jacentes. Opérationnellement, il se traduit par:*

**1) L'objectivation d'au moins un des éléments suivants :**

- Une période d'altération de l'état de conscience (confusion ou désorientation);
- une perte de conscience de moins de 30 minutes;
- une amnésie post-traumatique de moins de 24 heures; ou
- tout autre signe neurologique transitoire comme un signe neurologique localisé, une convulsion ou une lésion intracrânienne ne nécessitant pas une intervention chirurgicale;

**2) Un résultat variant de 13 à 15 sur l'Échelle de Coma de Glasgow 30 minutes ou plus après l'accident, lors de l'évaluation à l'urgence.**

*Ces manifestations d'un TCCL ne doivent pas être dues à une intoxication à l'alcool, aux drogues illicites ou à la médication, ni être causées par d'autres blessures ou le traitement des autres blessures (lésions systémiques, faciales, intubation), ni résulter d'autres problèmes (traumatisme psychologique, barrière linguistique ou autre pathologie coexistante chez l'individu), ni être causée par un traumatisme craniocérébral de nature pénétrante »*

## **1.2 Les données épidémiologiques pour le TCC**

Le taux d'incidence du TCC pour toutes les sévérités confondues est de 200 par 100 000 de population par année.<sup>3,19-28,8,29</sup> En 2007, seulement aux États-Unis, deux millions de nouveaux TCC ont été recensés dont 500 000 ont nécessité une hospitalisation.<sup>15</sup> Au Canada, un taux annuel de 220 pour 100 000 a été rapporté en 1994.<sup>19</sup> Le taux d'incidence au Québec est de 200 par 100 000 par année comprenant toutes les tranches d'âge.<sup>3</sup> Le nombre de personnes subissant un TCC est donc estimé à environ 13 000 par année au Québec seulement,<sup>3</sup> dont 4 000 seraient âgées de moins de 16 ans.<sup>30</sup> Les taux de prévalence varient quant à eux de 100 à 439 par 100 000 de population.<sup>19</sup> Au Canada, un taux de prévalence de 62,3 pour 100 000 a été mesuré chez les personnes de 15 ans et plus vivant à

domicile.<sup>19</sup> Au niveau du TCCL, il est estimé que le taux d'incidence varierait entre 100 et 600 cas pour 100 000 de population.<sup>31-33</sup> Il y a annuellement au Canada, 40 000 congés d'hôpitaux pour des patients ayant reçu un diagnostic de TCC.<sup>3,34</sup> Selon les études effectuées au Québec, on dénombrerait entre 4 000 et 5 000 hospitalisations de plus de trois jours par année à la suite d'un TCC.<sup>3,35</sup> Dans le cas de patients hospitalisés, le taux de survie varierait entre 75% et 88%.<sup>20,36,37,9</sup>

La grande majorité des TCC (de 75% à 88%) sont qualifiés de léger.<sup>3,8-13</sup> Par contre, les TCC légers (TCCL) ne sont pas comptabilisés de façon systématique et peu de données sont disponibles sur ce groupe puisque beaucoup de personnes atteintes ne consultent pas un médecin. Même s'il est estimé que 15% des individus ayant subi un TCCL ont encore des symptômes un an après le traumatisme<sup>38</sup>, cette population n'a pas encore été étudiée à fond.

### **1.3 L'étiologie et les facteurs de risque d'un TCC**

Les accidents de la route représentent 40% à 50% des causes de TCC. Sont compris dans cette statistique les accidents à bicyclette et les accident sur des piétons.<sup>3,28,29,15,36,11</sup> Les chutes constituent la seconde cause de TCC avec 20% à 30% du total des TCC.<sup>28,29,15,30,11</sup> Ces chutes surviennent surtout chez les personnes âgées en perte d'autonomie et chez les enfants. Selon des études américaines, la violence physique est la troisième cause de TCC avec 12% à 20% des cas.<sup>28,29,15,11</sup> Les accidents sportifs et d'activités de loisirs sont la dernière cause en importance avec 2,5% à 10% des cas.<sup>28,29,15,11</sup> Il est à noter que l'alcool ou l'abus de substances qui altèrent les facultés cognitives sont présents dans près de la moitié des cas recensés.<sup>8,15,34,36</sup>

Les groupes d'âge les plus touchés sont les jeunes adultes de 15 à 30 ans,<sup>19,21,22,28,8,36,12,39-41</sup> ainsi que les personne âgées de plus de 75 ans.<sup>28,8,15</sup> Le TCC touche deux fois plus d'hommes que de femmes.<sup>19,28,8,29,36,41</sup> Ce phénomène s'explique par l'exposition plus grande des hommes aux risques d'accidents de voiture, à la violence, à l'abus d'alcool et à la participation à des sports de contact.<sup>19,28,8,29,36,41</sup> Le TCC touche aussi davantage les personnes à revenu moins élevé, les célibataires, ceux qui ont déjà subi un TCC auparavant, les personnes qui ont des troubles de comportement, des troubles psychiatriques, une

histoire familiale de troubles psychiatriques et les personnes abusant des substances pouvant altérer les fonctions cognitives.<sup>29,41-43</sup> Les personnes ayant déjà subi un TCC pourraient être plus à risque pour différents problèmes, comme les complications médicales, les problèmes psychiatriques et comportementaux<sup>44</sup>, ainsi que l'exposition à la criminalité.<sup>45,46</sup>

#### **1.4 Le traumatisme craniocérébral léger dans un contexte sportif**

Le phénomène du TCCL chez les athlètes causé par la pratique de leur sport a commencé à être étudié au milieu des années 1980, et plus particulièrement par Barth et ses collaborateurs (1983)<sup>47</sup> de l'université de la Virginie. Ceux-ci furent des pionniers dans l'étude épidémiologique des aspects cliniques des TCCL en utilisant des modèles d'accélération et de décélération susceptibles de se produire en situation sportive et en les appliquant par la suite aux accidents de la route.<sup>47-49</sup> Dans le domaine sportif, le terme *commotion cérébrale* est largement plus utilisé que le terme *TCCL*. Une recherche impliquant plus de 2 300 athlètes collégiens jouant au football et répertoriant environ 200 TCCL<sup>50</sup> fut la première étude connue s'intéressant à un protocole de retour au jeu suivant un TCCL et s'appuyant sur des critères provenant de données probantes.<sup>47</sup>

Des programmes de surveillance des commotions cérébrales dans la *National Football League* et la *Ligue nationale de hockey*<sup>51</sup> ont été créés et conduits par des neuropsychologues, des médecins et des thérapeutes du sport travaillant en étroite collaboration. Des programmes semblables ont également été mis en place dans d'autres sports, tels que le soccer au niveau international, le rugby et même la course automobile.<sup>51</sup> Il a déjà été rapporté<sup>52</sup> que dans un échantillon de 223 étudiants-athlètes qui ont participé à une série de sports, 63% avaient déjà subi un TCCL en pratiquant leur sport. Le TCCL peut provoquer des symptômes immédiats comme de la désorientation, de l'amnésie, des nausées, de la confusion, une perturbation visuelle, des vertiges, des céphalées, une perte de conscience ou l'altération de la conscience.

En outre, plusieurs de ces symptômes peuvent se résorber en moins de 15 minutes mais peuvent quand même indiquer la présence d'un TCCL. Un des symptômes clé est

l'identification d'un changement neurocognitif. Souvent, les athlètes réfèrent à ce phénomène en tant que « bourdonnement » ou « sonnerie de cloche ». En outre, c'est une erreur commune de croire qu'il faut absolument se frapper la tête pour souffrir d'un TCCL. Ce traumatisme peut en effet se produire lors d'un mouvement de type « coup de fouet » (accélération-décélération rapide de la tête) ou lors d'un mouvement de rotation rapide de la tête. Comme le cerveau se déplace dans le crâne lorsqu'il est secoué, il peut se produire un cisaillement des axones.

Il y a de nombreuses grilles d'évaluation du TCCL sportif, plus d'une vingtaine étant documentées mais aucune n'étant basée sur des données probantes.<sup>53,54</sup> Ces grilles sont plutôt basées sur les réponses des athlètes. Bien que le mal de tête et la perte de conscience aient traditionnellement été regardés comme indicateurs de sévérité du TCCL, il est probable que le symptôme de l'amnésie rétrograde ou antérograde à l'événement soit un facteur prédictif de sévérité et de rétablissement bien meilleur.<sup>55</sup>

### **1.5 Pathophysiologie, récupération et symptômes**

La pathophysiologie du TCCL commence à être explorée chez l'animal. Présentement, on sait que ce trauma au cerveau perturbe le métabolisme cérébral, avec des changements autant intracellulaires qu'extracellulaires, et que le métabolisme du glucose et de l'oxygène, ainsi que la circulation sanguine dans le cerveau sont compromis.<sup>56-58</sup> Le cerveau s'engage donc dans une lutte pour rétablir l'équilibre qui a été ébranlé. En outre, les changements de concentration en ions de potassium, de calcium et de magnésium perturbent de manière significative les fonctions cérébrales et provoquent des dommages au niveau cellulaire.<sup>56-58</sup> Le cerveau s'engage donc dans une lutte pour stabiliser à nouveau l'équilibre qui a été déréglé. En outre, les changements de concentration en ions de potassium, de calcium et de magnésium perturbent de manière significative les fonctions cérébrales et provoquent des dommages au niveau cellulaire.<sup>56-58</sup> A titre d'exemple, le rétablissement de l'équilibre peut prendre plusieurs jours ou même beaucoup plus longtemps, selon la sévérité et la nature du TCCL. Au cours de cette période, le cerveau est beaucoup plus vulnérable à une blessure catastrophique si un second impact, même léger, se produit.<sup>56-58</sup>

Dans le cas de l'apparition et du maintien des symptômes post-commotionnels, la période de rétablissement est prolongée, et l'individu peut éprouver des symptômes persistants, tels que (a) des difficultés dans l'attention, dans la concentration ou dans les fonctions exécutives (ex. : planification, initiation, etc.); (b) des symptômes émotifs, de l'irritabilité, de la dépression; et (c) des symptômes physiques comme des maux de tête, de la fatigue ou des difficultés de sommeil.<sup>59,60</sup> De plus, les individus qui présentent de tels symptômes persistants peuvent se retrouver avec des difficultés au travail, à l'école ou dans leurs loisirs (incluant le sport) puisque les tâches demandées dans ces environnements requièrent la plupart du temps de plus grandes périodes de réaction. Ils peuvent également éprouver des problèmes de communication verbale (lors de discussions en groupes, par exemple), une diminution de concentration, un traitement multitâches affecté, ainsi que des problèmes de fatigue.<sup>61</sup> Même si une grande partie de la recherche sur la sévérité et le rétablissement du TCCL a été faite sur des adultes, il a été démontré que les cerveaux des jeunes semblent suivre, jusqu'à l'adolescence, un profil différent de celui des adultes quant à la sévérité et au temps de guérison.<sup>62,63</sup> Des études sur l'animal suggèrent que les cerveaux plus jeunes tendent à être plus vulnérables et nécessitent donc une période de rétablissement plus longue.<sup>56</sup> Dans un même ordre d'idées, des athlètes de niveau secondaire ayant subi un TCCL ont éprouvé de plus grands problèmes de fonctionnement de leur mémoire que d'autres athlètes de niveau universitaire.<sup>64</sup>

## **1.6 Retour au sport suivant un TCCL**

La décision concernant le retour à l'activité physique ou au sport d'élite suivant un TCC est une des plus importantes pour les athlètes. Ils doivent éviter d'être placés dans des situations au cours desquelles ils pourraient subir des commotions cérébrales. Un second impact pourrait éventuellement se produire. Dans la littérature, la notion de syndrome deuxième-impact suivant un TCCL (*second impact syndrome*) est soulignée. Ce phénomène mortel est assez rare mais a été observé chez de jeunes athlètes.<sup>17</sup> La notion du syndrome deuxième-impact implique qu'un individu souffrant d'un TCCL subit un autre coup avant qu'il ne soit complètement rétabli, ce qui provoque une réponse immédiate et dévastatrice du cerveau. Le tronc cérébral se retrouve en échec, ce qui provoque l'affaiblissement neurologique grave ou même la mort en quelques minutes.

Évidemment ce type de décision est difficile à prendre, car traditionnellement, les résultats des examens radiologiques et les tests d'imagerie par résonance magnétique conventionnels peuvent apparaître normaux à la suite d'un TCCL. Les examens neurologiques et neuropsychologiques ne constituent qu'un seul aspect de l'évaluation et ne devraient pas servir de base aux décisions de retour au jeu.<sup>62</sup> Ces tests devraient être vus comme un outil pour aider le clinicien à prendre une décision en lien avec les données médicales et les résultats d'autres investigations.<sup>62</sup> De plus, le questionnement des symptômes auprès de l'athlète s'est aussi avéré problématique. En effet, il a été démontré<sup>65</sup> qu'à la suite d'une auto-analyse des symptômes par des athlètes de niveaux secondaire et universitaire, le diagnostic de TCCL était sous-estimé en plus de mener à un retour prématuré au jeu.

Les symptômes ne sont qu'une des parties du processus d'évaluation développé par le domaine sportif pour évaluer un retour au jeu à la suite d'un TCCL. En effet, dans plusieurs cas, une évaluation neuropsychologique de base durant environ 30 minutes est faite en début de saison pour tous les athlètes.<sup>66</sup> Les outils neuropsychologiques touchent la vitesse d'exécution, la coordination visuomotrice, la mémoire de travail, l'attention, et la fluidité verbale. Les données recueillies sont gardées comme données de base, afin qu'elles soient comparées de manière intra-individuelle, lorsque l'athlète se blesse ou subit un TCCL. Lors de l'évaluation d'un athlète ayant subi un TCCL, on s'attend à ce qu'il reproduise les valeurs obtenues aux tests avant le TCCL. La prise en charge d'un TCCL est habituellement constituée de l'élimination des dommages neurologiques ou corporels par un examen médical approfondi, de l'éducation de l'athlète et de sa famille au sujet des effets et des risques du TCCL, du repos physique et cognitif, de conseils relativement aux possibilités de retour à l'activité physique et au contact, et d'une évaluation neurocognitive post-TCCL dont on s'attend à ce que les résultats soient semblables ou supérieurs à ceux obtenus avant le TCCL.<sup>62</sup> Finalement, un effort physique intense peut être prescrit lorsque l'athlète ne présente plus aucun symptôme et qu'il a démontré un rétablissement cognitif complet. Cet effort physique ne devrait pas exacerber de symptômes, sans quoi un retour à l'étape du repos est recommandé. Il semblerait aussi qu'un repos physique et cognitif ainsi



que le sommeil soient les facteurs les plus importants dans la diminution du temps de rétablissement.<sup>62</sup>

### **1.7 Déficits fonctionnels chroniques suivant un TCC**

Dépendamment de la sévérité de la blessure, les personnes qui ont subi un TCC (toutes sévérités confondues) peuvent expérimenter plusieurs types de difficultés dont des problèmes de mémoire, un manque d'attention, une faiblesse musculaire, une spasticité, des troubles de l'équilibre, une lenteur psychomotrice, une perte de dextérité, des difficultés à la marche, et de la fatigabilité. Les symptômes les plus fréquents après un TCC (toutes sévérités confondues) sont les céphalées et les problèmes d'équilibre, ainsi que la fatigue ou la faiblesse.<sup>67</sup>

Ces problèmes ne surviennent habituellement pas immédiatement après le TCCL, mais ils peuvent se manifester plusieurs jours ou plusieurs mois après.<sup>38,68</sup>. Les TCCL peuvent occasionner des déficits fonctionnels chroniques dans différents domaines. Par exemple, un ralentissement du traitement de l'information,<sup>69</sup> une difficulté à se concentrer dans des environnements bruyants, des problèmes d'organisation, des problèmes de sommeil,<sup>70-72</sup> des maux de tête,<sup>73,74</sup> des problèmes de dépression, de l'anxiété et de la frustration peuvent se manifester.<sup>75,76</sup> De telles difficultés peuvent interférer avec les activités de la vie quotidienne et empêcher les individus de retourner au travail pour des semaines ou même des mois suivant le trauma. Une étude a même démontré que les personnes ayant subi un TCCL et ayant été hospitalisées ont perdu en moyenne un mois de travail suivant le trauma.<sup>77</sup> Concernant le TCCL, il a été reporté qu'en général, il ne cause pas de déficits à long terme et que la convalescence est en deçà de trois mois du trauma.<sup>16</sup> Toutefois, un petit pourcentage d'individus qui souffrent d'un TCCL a encore des déficits handicapants après un an. Il a été rapporté<sup>38</sup> que 15% des individus ayant subi un TCCL se placent sous cette catégorie. On peut ajouter que ces chiffres sont sous-estimés car un grand nombre d'individus ayant subi un TCCL ne se présentent pas à l'hôpital et ne sont pas pris en compte dans ces estimations.

Les symptômes des TCCL peuvent prendre la forme de problèmes physiologiques, psychologiques ou cognitifs.<sup>76</sup> Par exemple, en terme de fonctions physiques, les individus rapportent typiquement plusieurs difficultés telles qu'une augmentation de la fatigue, de l'hyperacousie, de la photosensibilité, une moindre résistance à la douleur, des problèmes de sommeil<sup>72</sup>, et des problèmes d'équilibre et de coordination.<sup>78,79</sup> D'autres problèmes d'ordre physique peuvent survenir comme des céphalées et des étourdissements<sup>80</sup> qui peuvent durer des semaines ou même plusieurs années.<sup>78</sup> Au-delà des problèmes physiques, l'état émotionnel peut aussi être affecté : la dépression, l'anxiété et la frustration en étant les manifestations les plus communes.<sup>79</sup> Le manque d'activités sociales et d'activités récréatives, de même que l'absence au travail et la prise de conscience de ses propres déficits cognitifs peuvent être la cause de la dépression et de l'anxiété.<sup>81</sup>

Les aspects les plus frustrants suivant un TCCL sont probablement la diminution des habiletés à effectuer des tâches multiples, la difficulté à entreprendre une tâche spécifique, la diminution des habiletés à traiter l'information, ainsi que l'affaiblissement de la mémoire et de l'attention.<sup>79-81</sup> Le traitement des difficultés cognitives suivant un TCCL implique une évaluation neuropsychologique qui permet d'identifier les problèmes spécifiques avant que ne soit entreprise la réadaptation cognitive de ces problèmes.<sup>80,81</sup> Le traitement des symptômes physiques implique habituellement de la médication, de la physiothérapie, ainsi que d'autres manipulations thérapeutiques (exercices, etc.), alors que les traitements de la détresse psychologique suivant un TCC peuvent impliquer de la médication, de la psychothérapie, ou une combinaison des deux.

### **1.7.1 Évaluation neuropsychologique du TCCL**

L'évaluation neuropsychologique sert à caractériser les déficits neurocomportementaux de nature cognitive qui sont observés à la suite d'un TCCL. Une des particularités dans l'évaluation neuropsychologique n'est pas d'essayer de savoir si le cerveau d'une personne atteinte d'un TCCL offre des performances égales à la population en général, mais plutôt de savoir si sa performance est égale ou inférieure à la fonction pré-morbide.<sup>82</sup> Cependant, la condition pré-morbide est difficile à obtenir car peu d'individus subissent une évaluation neuropsychologique avant leur blessure. De ce fait, le niveau d'éducation, le type de

formation académique, le type d'emploi et les autres indicateurs des fonctions cognitives sont utilisés pour estimer la condition pré-morbide.<sup>80,82,83</sup> Plusieurs tests neuropsychologiques sont couramment utilisés dans l'évaluation du TCC. Les habiletés du langage, la mémoire, l'attention, la concentration, l'habileté visuo-spatiale, les habiletés motrices et la formation de concepts sont tous évalués au moyen d'une évaluation neuropsychologique suivant un TCC.

Seulement quelques tests neuropsychologiques ont été rapportés dans la littérature comme sensibles aux effets des TCCL. Le test de Stroop à partir des mots de couleur,<sup>84-86</sup> qui sert à mesurer l'attention sélective, le Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT)<sup>87,88</sup> qui sert à évaluer la pensée multitâches, ainsi que le Weschler Adult Intelligence Scale-Revised (WAIS-R), qui évalue la fonction intellectuelle générale<sup>88</sup> ont été rapportés comme étant sensibles aux déficits associés au TCCL. Afin de pouvoir faire ressortir des déficits plus subtils, il est important que des indicateurs qualitatifs ou subjectifs de la fonction soient utilisés. Ces mesures qualitatives pourraient être des questionnaires d'auto-évaluation de symptômes, ainsi que des observations du comportement locomoteur faites par un clinicien ayant de l'expérience dans le diagnostic de TCCL. Par ailleurs, les pointages bruts des tests neuropsychologiques ne fournissent pas d'information sur la façon dont ces pointages ont été obtenus. Par exemple, certains tests donnent simplement un pointage pour une bonne réponse, sans prendre en considération le temps pris pour effectuer le test ou encore l'effort fourni durant la tâche.<sup>82</sup> La fatigue, le niveau de déficit, les symptômes physiologiques, l'état psychologique, les facteurs pré-morbides et les variables qualitatives pourraient affecter les performances du test neuropsychologique et ultimement la récupération d'un TCC.

## **1.8 Les facteurs potentiels influençant le processus de récupération**

Pour les personnes ayant subi un TCC, les divers facteurs qui influencent le processus de récupération jouent un rôle primordial dans l'évaluation et la réadaptation, alors que pour les athlètes ayant subi un TCCL, il est important de savoir s'ils présentent encore des altérations, même sans manifestation de symptômes, ou encore si les résultats des tests neuropsychologiques présentent des valeurs semblables à celles obtenues avant le TCCL.

En général, la plupart des chercheurs et des cliniciens sont d'accord pour dire que le TCC peut être associé à des problèmes neuropsychologiques substantiels, mais ils sont souvent en désaccord au sujet de la durée de ces déficits. Cette situation est probablement causée par le manque de consensus sur la définition même du TCC (et particulièrement du TCCL)<sup>16</sup> et sur les limites des devis de recherche portant sur les TCCL<sup>89</sup> (l'absence de groupes-contrôles appropriés, par exemple).<sup>90</sup> La sévérité d'un TCC est le facteur le plus important qui influence la récupération. Les facteurs pré-TCC tels que l'âge, le sexe, le niveau d'éducation ou le niveau de santé peuvent interagir avec les facteurs post-TCC tels que la sévérité de la blessure, le temps écoulé entre la blessure et la prise en charge, et le type de traitement. Tous ces facteurs peuvent contribuer à influencer les performances aux tests neuropsychologiques et à la récupération fonctionnelle d'un TCC. Étant donné que les cerveaux des jeunes gens présentent plus de plasticité, ou de potentiel neural malléable, la récupération suivant un TCC est souvent considérée comme plus complète chez les jeunes que chez les gens plus âgés.<sup>91,92</sup>

Le sexe des individus ayant subi un TCC est aussi important quand vient le temps d'en prédire les effets. Si les hommes sont deux fois plus à risque de subir un TCC,<sup>10</sup> en moyenne, ils sont également sujets à subir de plus sévères traumatismes que les femmes, ce qui expliquerait la différence qui existe dans le taux de récupération. Une autre explication à ce phénomène pourrait être que certaines hormones, telles que l'œstrogène et la progestérone, jouent un rôle neuroprotecteur sur les cerveaux féminins.<sup>93</sup> Il est à noter que les études qui sont venues à ces conclusions ont utilisé des modèles animaux. Malheureusement, très peu de recherches ont jusqu'à présent investigué le rôle des hormones sur les TCC dans des populations cliniques.

Les caractéristiques pré-morbides du patient ayant subi un TCC peuvent aussi affecter la rapidité à laquelle une récupération fonctionnelle se produit. Les études qui ont exclu les participants présentant des histoires d'abus de substances illicites, des problèmes psychologiques ou ceux ayant déjà subi un TCC démontrent un meilleur taux de récupération des participants que celles qui ont inclus ces individus.<sup>94</sup> L'inclusion de participants ayant une histoire d'abus de substances illicites, de problèmes psychologiques

à long terme et ayant déjà subi un TCC auparavant est associée avec la présence de plus de déficits suivant un TCCL.<sup>16</sup> Ceci peut être occasionné par le fait qu'un usage prolongé de substances illicites peut provoquer des déficits cognitifs et que plusieurs TCC successifs ont un effet cumulatif qui résulte en des dommages aux cellules du cerveau.<sup>95</sup> Chaque TCC successif peut aussi engendrer un déficit augmenté et une récupération prolongée.

### **1.8.1 Périodes sensibles ou à risque durant la récupération**

La période d'intervention après le TCC est aussi importante que le type d'intervention lui-même. Une période sensible post-TCC existe chez les modèles animaux, période durant laquelle certaines manipulations vont influencer la récupération fonctionnelle, alors que les mêmes manipulations effectuées après la période sensible n'ont aucun impact sur le processus de récupération.<sup>96</sup> Une période sensible pour l'exercice après un TCC est toujours à déterminer. Même si une période de sensibilité variant de 12 heures à 6 jours<sup>96</sup> est bien établie chez le rat ayant subi une lésion du cortex antéromédial, il n'a pas été possible d'établir un tel lien chez l'humain. Déterminer cette période critique chez l'humain est essentiel pour un traitement efficace des TCC. Si le délai pour l'administration de l'intervention après le TCC constitue une considération importante, l'interaction avec l'environnement de la réadaptation l'est tout autant.<sup>97,98</sup> Par exemple, comment l'exercice physique interagit-il avec la réadaptation cognitive pour influencer la récupération fonctionnelle suivant un TCC? Certaines interventions ont-elles des effets synergiques améliorant la récupération fonctionnelle? Il serait important de chercher réponses à ces interrogations dans de futures recherches.

### **1.8.2 Régénération et réorganisation neuronale suivant un TCC**

À la suite d'un TCC, le cerveau démontre une capacité de récupérer fonctionnellement, et ce même en présence de changement structuraux.<sup>99,100</sup> Les mécanismes exacts sous-tendant cette récupération sont inconnus, mais des hypothèses avancent que la plasticité neuronale des connexions pourrait compter pour une partie de l'adaptation à la lésion.<sup>101,102</sup> Il n'est pas clair si des périodes de récupération allongées sont due à la connectivité déficiente des structures neuronales ou alternativement à la génération de nouvelles connexions.

Les changements cellulaires associés aux lésions du système nerveux central sont initialement caractérisés par une mort diffuse, causée du moins en partie, par l'excitotoxicité associée à la libération de glutamate.<sup>103</sup> Ceci est suivi d'une réponse inflammatoire intense causée par les microglies actives, les macrophages, les cellules T et les neutrophiles.<sup>104-106</sup> Les dommages neuronaux secondaires impliquent une mort cellulaire différée, largement due à des mécanismes génétiques mis en évidence par apoptose.<sup>107-109</sup> Finalement, les astrocytes formeront une cicatrice gliale qui agira comme barrière à la repousse axonale, tout en permettant de contenir la lésion.<sup>110-112</sup>

### **1.8.3 Récupération au niveau de la fonction**

La récupération fonctionnelle implique une amélioration ou une récupération des fonctions motrices et cognitives à la suite d'un TCC. Plusieurs phénomènes physiologiques peuvent expliquer la réorganisation fonctionnelle chez un individu qui a subi un TCC. On parle habituellement de diaschisis, de plasticité, de compensation, de levée d'inhibition ainsi que de la dualité représentationnelle.<sup>113</sup> La diaschisis est une forme de choc neuronal qui se produit dans les régions en santé du cerveau avoisinant les structures endommagées par le TCC et causant une perte fonctionnelle temporaire. Ce choc peut-être causé par de l'œdème et des changements métaboliques en réponse à l'insulte au cerveau. Une résolution de cet état de choc amènera donc une récupération de la fonction.

La plasticité neuronale découle d'un mécanisme limité mais qui permet aux régions avoisinant le cerveau et n'ayant pas été atteintes par le trauma d'exercer des fonctions additionnelles afin de compenser en partie pour les déficits causés par le TCC. Ce mécanisme consiste donc en une amélioration des fonctions résiduelles plutôt qu'en une récupération fonctionnelle réelle.<sup>113</sup> Il pourrait y avoir aussi un bourgeonnement collatéral et une synaptogenèse formant de nouvelles connections. En effet, les axones non atteintes par le TCC utilisent les espaces synaptiques libres pour former de nouvelles branches collatérales afin de former de nouvelles synapses.<sup>114,115</sup>

Les meilleurs prédicateurs de la capacité fonctionnelle à moyen terme suivant un TCC sont l'âge et la durée de l'amnésie post-traumatique.<sup>116,117</sup> En moyenne, 6 semaines de

réadaptation sont nécessaires pour pouvoir marcher de façon autonome, mais 82% des individus y parviennent après 2 mois, et 94% après 3 mois. Il est à noter qu'il n'y a aucune différence notable sur la récupération quant au profil neuropathologique des individus.<sup>117</sup> Même si 50% des individus ayant subi un TCC sévère sont en mesure de marcher 25 mètres 6 semaines après la lésion, 60-65% sont incapable de courir ou sauter à deux pieds sans chuter.<sup>118</sup> Même chez des sujets ayant subi un TCC et qui ont bien récupéré, des déficits résiduels ont été démontrés lorsque les individus sont placés dans une situation de division d'attention en environnements complexes.<sup>119</sup>

Les individus ayant subi un TCC sévère connaissent une amélioration assez rapide de leur fonction cognitive, mais garderont toutefois des séquelles plus prononcées que des individus ayant subi un TCC de moindre niveau.<sup>120</sup> Chez les adultes, les TCC modérés et sévères sont associés à des déficits cognitifs durant 6 mois ou plus post-trauma. Il n'y a pas suffisamment d'évidence à ce jour pour déterminer si le TCCL présente des déficits cognitifs 6 mois ou plus post-trauma.<sup>121</sup> Il a aussi été démontré que la récupération à des niveaux pré-trauma variait de 65% des cas pour les soins personnels, à environ 40% pour les compétences cognitives au travail, dans les loisirs et lors d'activités physiques. La gravité des lésions au cerveau est liée à l'état fonctionnel et au fonctionnement neuropsychologique, mais pas à la qualité de vie ou à la mesure affective. La durée des troubles de la mémoire semble contribuer davantage aux résultats obtenus que les lésions anatomiques observées.<sup>122</sup>

## **1.9 Le contrôle locomoteur**

Une fonction très importante dans les activités de la vie quotidienne est la locomotion et le contrôle locomoteur est un aspect affecté à la suite d'un TCC. De manière à établir une base de comparaison, des paramètres ont été déterminés pour évaluer la locomotion chez la population saine. Les paramètres spatiotemporels de la marche non entravée chez la population saine sont déjà bien établis. La vitesse de marche chez l'adulte se situe, en moyenne, entre 1,20 m/s<sup>123</sup> et 1,41 m/s<sup>124</sup> avec une longueur et une durée de pas respectivement d'environ 75 cm et 536 ms,<sup>124</sup> alors que la largeur du pas représente, en

moyenne, 13% de la longueur de la jambe.<sup>125</sup> Chez les athlètes sains, la vitesse de marche se situe à 1,22 m/s en moyenne.<sup>123</sup>

Le contrôle de la locomotion est géré par trois mécanismes : le générateur de patron central (CPG), le contrôle périphérique et le contrôle supraspinal. Le concept de CPG<sup>126-129</sup> suggère que les patrons locomoteurs de base ainsi que la rythmicité de la marche sont produits par un réseau neural du système nerveux spinal. Toutefois, l'ajustement des patrons de marche se produirait à l'aide de l'information reçue du système périphérique et transmise au système nerveux central, ainsi que par le trajet inverse de l'information (du système nerveux central à la périphérie). Quant à l'information issue des systèmes somatosensoriel et vestibulaire, elle joue un rôle dans le contrôle périphérique de la locomotion, mais ces systèmes sont davantage reliés au contrôle réactif de la marche<sup>130,131</sup>. À l'opposé, le contrôle visuel de la marche est proactif, puisqu'il permet non seulement de tenir compte de l'état présent mais également de percevoir à l'avance les perturbations survenant dans l'environnement à une certaine distance. L'importance du système visuel dans le contrôle de la locomotion, comme l'a démontré Gibson,<sup>132,133</sup> est telle que celui-ci peut supplanter l'information fournie par les systèmes somatosensoriel et vestibulaire.<sup>134-138</sup> Certains auteurs font également état de la nécessité de l'implication supraspinale chez les humains pour ajuster les patrons locomoteurs en fonction de certaines contraintes environnementales.<sup>139</sup>

Les études qui ont rapporté les effets d'un TCC (peu importe sa sévérité) sur la marche et la stabilité dynamique<sup>140-142</sup> démontrent que les individus ayant subi un TCC ont une démarche plus craintive caractérisée par la diminution de leur vitesse de marche et le raccourcissement de la longueur de leurs pas en comparaison avec des individus sains.<sup>141,143</sup> Ces différences se reflètent dans plusieurs paramètres de marche (cadence, durée d'un cycle de marche et temps de double appui) qui étaient tous supérieurs.<sup>143</sup> Il a aussi été démontré que ces patients avaient un plus grand déficit dans l'exécution de tâches impliquant une double tâche cognitive et que ce déficit s'amplifiait avec l'augmentation de la complexité de l'environnement.<sup>144</sup> Finalement, les personnes ayant subi un TCC produisaient un déplacement plus large et plus rapide de leur centre de masse (CM) dans le plan



médiolatéral.<sup>140,142</sup> Il a été établi que les athlètes atteints d'un TCCL présentaient, pour leur part, une oscillation médiolatérale plus grande que les athlètes sains, et ce, jusqu'à 28 jours suivant le TCCL.<sup>145</sup> Ceci suggère que le TCCL peut présenter des effets, observables et mesurables à long terme, sur la stabilité du contrôle de la marche chez des athlètes.

## **1.9.1 Contournement d'obstacles**

### **1.9.1.1 Population normale**

Quand un individu est contraint à éviter un obstacle, la modification d'un ou de plusieurs des paramètres de marche est nécessaire pour mettre en œuvre une des stratégies suivantes: enjamber l'obstacle, ou changer de direction (c'est-à-dire, réorienter son CM pour l'éviter).<sup>146</sup> Ces stratégies d'évitement sont réalisées à l'intérieur d'une foulée complète. Lors de l'enjambement d'un obstacle statique, la modification du placement du pied suivant la phase d'oscillation peut être réalisée lors du pas précédant l'obstacle, alors que le changement de direction de la marche doit être planifié deux pas avant l'enjambement de l'obstacle.<sup>139,146</sup> L'étude de la réorientation du CM pour changer la direction de marche (« steering ») a démontré qu'il y a systématiquement une anticipation de la tête lors d'un changement de direction le long d'une trajectoire circulaire<sup>147</sup> ou lors d'un changement de direction.<sup>143,148,149</sup> Lorsque ce dernier se produit, un mouvement saccadé des yeux, initié juste avant la réorientation de la tête, a aussi été relevé. Ce mouvement des yeux permet de cibler le but à atteindre jusqu'à ce que la tête soit réalignée avec la nouvelle direction de marche.<sup>150</sup> Le contournement d'un obstacle implique néanmoins des stratégies de contrôle différentes de celles observées pour un changement de direction. Certains auteurs ont rapporté que le contrôle médiolatéral du CM, lors du contournement d'un obstacle statique, est effectué au moyen d'une stratégie impliquant le bas du corps.<sup>151</sup> Quelques chercheurs ont utilisés des tâches de contournement d'obstacles stationnaires<sup>151,152</sup> et mobiles<sup>152</sup> pour étudier le contrôle adaptatif de la marche. Il est déjà connu que le contrôle du CM s'effectue au moyen d'une réorganisation du placement des pieds lors du contournement d'obstacles.<sup>151,152</sup> Plusieurs études s'intéressant au contournement d'obstacles<sup>152-155</sup> ont déjà utilisé des variables tel que la marge de dégagement dynamique (ou l'espace personnel), le point de déviation de la trajectoire et la vitesse de marche calculée avec le CM.

### 1.9.1.2 Population ayant subi un TCC

Peu de connaissances sont disponibles concernant le contournement d'obstacles chez la population TCC, même s'il s'agit d'une activité importante dans la vie de tous les jours. Ce qui est connu au sujet de l'enjambement d'obstacles, c'est que les individus ayant subi un TCCL ont une démarche plus craintive ainsi qu'une plus grande instabilité lors du franchissement d'obstacles. Cette instabilité est encore plus prononcée lors d'une deuxième tâche cognitive.<sup>156</sup> Le TCCL affecte les paramètres de marche en provoquant une diminution de la vitesse et de la longueur du pas. À cet effet, la vitesse de marche diminue aussi proportionnellement à l'augmentation de la hauteur de l'obstacle.<sup>142</sup> D'autre part, chez les individus ayant subi un TCCL, on observe une oscillation plus grande dans le plan médiolatéral durant le franchissement d'obstacles, comparativement aux sujets sains.<sup>142</sup> Cette oscillation augmente aussi proportionnellement avec la hauteur de l'obstacle à franchir. Par ailleurs, lors du franchissement d'obstacle, la vitesse maximale du CM durant le transfert de poids est beaucoup plus élevée chez les individus ayant subi un TCCL.<sup>142</sup>

### 1.9.2 Contrôle postural, équilibre et marche chez la population TCC

Plusieurs études ont rapporté les effets d'un trauma craniocérébral modéré ou sévère sur la marche et la stabilité dynamique.<sup>140-142</sup> Les individus ayant subi un TCC démontrent une marche plus craintive que les sujets sains, avec diminution de vitesse et raccourcissement de la longueur des pas.<sup>140-142</sup> Les patients ayant subi un TCC produisent aussi un déplacement plus large et plus rapide de leur centre de masse dans le plan médiolatéral.<sup>140,142</sup> La plupart des études en biomécanique ont jusqu'à maintenant été limitées à l'oscillation en position debout statique, ou encore en position debout perturbée.<sup>157-165</sup> En ce sens, Guskiewicz et ses collaborateurs<sup>166</sup> ont rapporté qu'il n'y a pas de corrélation entre les symptômes d'un TCCL (la présence de céphalées, par exemple), la performance à des tests de fonction cognitive (résultats au test de Stroop), et la stabilité posturale. Leurs données suggèrent que la récupération de la fonction motrice, comme le démontre le contrôle postural à la suite d'un TCCL, pourrait être indépendante de la récupération cognitive.

## 1.10 L'attention lors de la marche et dans la stabilité posturale

Le maintien de l'équilibre et de la coordination des membres inférieurs durant la locomotion requiert une interaction complexe entre l'information sensorielle afférente et la réponse motrice. Le système moteur coordonne l'activation musculaire et la génération de force requise. Quand le cerveau s'y engage, l'effet est un mouvement synchronisé. Cette interaction dynamique est extrêmement utile dans les activités sportives. Quand une personne doit effectuer un mouvement synchronisé avec de l'attention divisée, cet effet n'est pas bien compris à l'heure actuelle. Des études antérieures ont démontré que la demande attentionnelle augmente avec l'augmentation des demandes physiques.<sup>167</sup> Il a aussi été rapporté que la division d'attention diminuait les performances à la marche lors d'évitement d'obstacle.<sup>119,168-170</sup>

### 1.10.1 Définition de l'attention

L'attention est un ensemble de capacités cérébrales qui permet d'acquérir, de traiter et d'organiser les informations qui influenceront par la suite le comportement.<sup>171</sup> L'attention sert à l'allocation de toutes les ressources cognitives disponibles de manière sélective afin de prévenir une surcharge d'information sensorielles.<sup>172</sup> Le système attentionnel s'occupe de trois fonctions principales. Premièrement l'orientation vers les stimuli sensoriels, la détection d'événements à classer selon leur importance et le maintien de l'état de vigilance.<sup>173</sup> Les théories développées pour expliquer le principe d'interférence dans une division d'attention peuvent être classées en trois grandes catégories comme étant les théories de la capacité, les théories de l'entonnoir et les théories neurologiques.<sup>174</sup>

La théorie de la capacité est basée sur le fait que la capacité des processus centraux est limitée, que l'exécution d'une seule tâche requiert déjà une partie de cette capacité et que lors de l'exécution de deux tâches exécutées simultanément, la capacité totale est dépassée et dès lors la performance d'une ou des deux tâches sera diminuée en conséquence.<sup>175</sup> Les théories de l'entonnoir présentent un autre point de vue sur l'exécution des tâches. Ces théories sont fondées en grande partie sur les résultats d'expériences utilisant des temps de réaction. Dans ce paradigme, deux types de stimuli se succèdent rapidement et la capacité

du participant de répondre rapidement à chaque stimulus est mesurée. Habituellement, le temps de réaction pour la deuxième tâche est plus élevé que celle de la première tâche, mais beaucoup plus court que le temps combiné pour effectuer chaque tâche individuellement. Il semble que les deux événements avant et après la réponse de la réaction peuvent avoir lieu simultanément pour les différentes tâches. Toutefois, la sélection de réponse ne peut être effectuée que pour une tâche à la fois, nécessitant l'utilisation exclusive de cette voie de signalisation spécifique.<sup>174</sup> Les théories neurologiques, quant à elles essaient de donner une explication physiologique aux données expérimentales et tentent d'expliquer que des caractéristiques anatomiques et physiologiques sont la cause des interférences observées dans les tâches de division d'attention. L'hypothèse de distance fonctionnelle correspond à la recherche de cartographie corticale qui a identifié des domaines spécifiques du cerveau qui sont plus actifs lors de l'exécution d'une tâche donnée.<sup>176</sup> Cette théorie indique que l'interférence dans l'exécution des tâches multiples est inversement proportionnelle à la distance entre les zones du cerveau qui sont activées à ces tâches.<sup>176</sup> Le travail de cette thèse ne dépend pas ou n'étudie pas quelle théorie est la plus appropriée, mais bel et bien par le fait qu'une interférence est causé par la division d'attention.

Il y a quatre types d'attention : l'attention sélective, l'attention soutenue (vigilance), l'attention divisée et l'attention alternée.<sup>177</sup> L'attention sélective est souvent appelée «concentration»<sup>177</sup> et est la capacité d'ignorer les distractions environnantes pour prioriser un ou plusieurs stimuli. L'attention soutenue est la capacité de maintenir une activité attentionnelle sur une certaine période de temps. L'attention divisée réfère à la capacité de répondre à plus d'une tâche simultanément, finalement l'attention alternative permet de changer la concentration d'une tâche vers une autre.<sup>177</sup> Dans le texte de cette thèse incluant les articles, le terme division d'attention (*divided attention*) a été utilisé de façon arbitraire pour alléger le texte et englobe l'attention divisée et l'attention alternative qui sont probablement les deux types d'attention retrouvés au sein des divers projets.

### **1.10.2 Concept de double tâche pendant la marche**

Le paradigme de double tâche requiert qu'un individu exécute deux tâches simultanément, afin de comparer la performance relative à chaque tâche. Habituellement ce type de

paradigme est utilisé en demandant d'exécuter une tâche cognitive simultanément avec une tâche motrice. Le réseau attentionnel contrôle le traitement mental de l'information provenant des systèmes sensoriels et moteurs en déterminant le niveau de signification attribué à chacune de ces entrées d'information et en allouant les ressources disponibles aux différents systèmes de traitement. Se tenir debout et marcher demandent tous deux plus d'attention que demeurer dans la position assise alors que marcher nécessite plus d'attention que se tenir debout.<sup>167,178</sup> En effet, Lajoie et ses collaborateurs<sup>167</sup> ont démontré que se tenir debout et marcher sont des conditions qui requièrent plus d'attention que d'être assis sur une chaise. Ils ont aussi démontré que le coût attentionnel de la marche est aussi significativement plus grand que lors d'une position debout statique. Lors de la marche, les temps de réaction étaient significativement plus longs lorsque les participants étaient en phase de simple appui (un seul pied au sol) que ceux obtenus en phase de double appui (les deux pieds au sol), suggérant que la demande attentionnelle augmente avec une augmentation des exigences en équilibre de la tâche. Les mécanismes de contrôle de l'équilibre sont régulés en continu par le biais de l'intégration d'informations sensorielles.

Des études utilisant un paradigme de double tâche durant la marche ont été faites avec des populations ayant la maladie de Parkinson<sup>175,179</sup> et se sont révélées utiles pour démontrer les effets de la maladie sur l'allocation de l'attention durant des tâches posturales et se sont aussi avérées assez sensibles pour prédire le risque de chute ainsi que pour documenter l'état de récupération des gens qui en sont atteints.

Le paradigme de double tâche a aussi déjà été utilisé dans des environnements avec marche obstruée.<sup>119,168,180</sup> Ces études ont démontré que la division d'attention diminue l'habileté à éviter un obstacle apparaissant soudainement sur un tapis roulant ou au sol. Les paramètres de la marche relatifs au contrôle de l'équilibre sont modulés en fonction des demandes attentionnelles de tâches concurrentes, et ce même si la marche est une activité qui est excessivement bien maîtrisée par les humains. Ebersbach et ses collaborateurs<sup>144</sup> ont étudié les effets de différentes tâches interférentielles sur le contrôle locomoteur. Ils ont démontré un double support plus long lors de tâches de mémorisation et lorsque les sujets devaient attacher un bouton de veste pendant la marche. Leur performance aux tâches cognitives a aussi diminué durant la marche, comparativement à la marche sans tâche d'interférence.

Les auteurs ont donc conclu que les sujets avaient dû moduler leur patron de marche afin d'assurer un meilleur contrôle de leur équilibre. Par contre la durée de leur foulée est demeurée inchangée, même lors de la double tâche, ce qui a amené les auteurs à suggérer que la rythmicité de la marche n'est pas affectée par l'exécution de tâches supplémentaires concurrentielles.

Dans le même ordre d'idée, la marche à vitesse naturelle confortable demande moins d'attention que la marche à des vitesses plus ou moins rapides.<sup>181</sup> Ainsi, dans son ensemble, la conservation et la régulation de l'équilibre requière une quantité substantielle de capacité de traitement de l'information, et les tâches nécessitant un plus grand contrôle de l'équilibre demandent une plus grande proportion des ressources attentionnelles disponibles. Les demandes attentionnelles associées à l'exécution des tâches cognitives et motrices lors de la marche conduisent à une modification nécessaire du patron de marche pour assurer le contrôle de l'équilibre.<sup>144</sup> Dans un modèle impliquant une tâche cognitive interférentielle, une tâche exigeante au point de vue attentionnel est exécutée simultanément avec une autre tâche et les effets négatifs de la première influent sur la performance de la deuxième.

La double tâche a aussi été utilisée pour étudier le facteur attentionnel dans des contextes de marche obstruée.<sup>119,168,182</sup> En ce sens, la division d'attention diminue significativement l'habileté à éviter un obstacle, et les paramètres de la marche reliés au contrôle de l'équilibre sont sujets à être modifiés selon les demandes attentionnelles de tâches concurrentes. Étant donné le haut degré des habiletés de la fonction motrice chez les athlètes, la recherche est donc bien de mise pour étudier les capacités locomotrices chez cette population lorsqu'elle subit un TCCL. Une telle étude revêt une importance certaine pour établir un pont entre la recherche sur la locomotion et les cliniciens qui doivent évaluer la fonction motrice de cette population.<sup>118,183-185</sup>

### **1.10.3 Déficit attentionnel dû au TCC.**

Les déficits attentionnels chez les personnes ayant subi un TCC (toutes sévérités confondues) sont communs. Le TCC modéré à sévère amène des déficits neurocomportementaux. Ces déficits amènent une diminution de l'attention, de la

concentration, de la mémoire et de la capacité à résoudre des problèmes.<sup>186</sup> Les conséquences chroniques à la suite d'un TCC sont en partie déterminées par le degré et la persistance de ces déficits. Le TCCL affecte, quant à lui, significativement l'orientation ainsi que les fonctions exécutives des athlètes alors que leur état de vigilance ne semble pas affecté.<sup>187,188</sup> De plus, les composantes de l'orientation reviennent habituellement à la normale à l'intérieur d'une semaine alors que les déficits des fonctions exécutives peuvent être présents jusqu'à 1 mois après le trauma.<sup>187</sup> Les tâches impliquant des questions et réponses demandent un temps de réaction plus long chez les athlètes ayant subi un TCCL que chez des sujets contrôles.<sup>188</sup> Ces études suggèrent donc que les composantes de l'orientation et de l'attention sont les plus sensibles aux effets d'un TCCL chez les athlètes.

#### **1.10.4 Incapacités attentionnelles pendant la marche suivant un TCC**

La demande d'une tâche interférentielle lors du franchissement d'un obstacle amène une plus grande diminution des paramètres de marche en ce qui a trait à la vitesse de marche et à la longueur du pas, et une plus petite amplitude de mouvement du CM que lors de la même tâche à la marche non-obstruée. De plus, chez les individus ayant subi un TCCL, on a remarqué une plus grande amplitude de déplacement du CM dans le plan médiolatéral que chez les sujets sains. Ces effets peuvent perdurer jusqu'à un mois après le trauma.<sup>189</sup> Étant donné les déficits attentionnels de cette population, il est important d'étudier les habiletés motrices de celle-ci dans des environnements complexes et offrant des distractions similaires aux situations que l'on rencontre en situation de tous les jours ou en compétition pour les athlètes. Nombreuses sont les avenues qui demeurent à explorer dans ce domaine pour comprendre comment les déficits attentionnels dans des environnements complexes pourraient affecter les ajustements locomoteurs anticipatoires. Ces éléments de réponse pourraient nous amener à établir un protocole de retour au jeu basé sur la capacité fonctionnelle des athlètes et non seulement sur une évaluation neuropsychologique des ceux-ci. Jusqu'à maintenant, on en sait très peu sur les effets d'une division d'attention sur la locomotion des personnes ayant subi un TCC peu de temps après la blessure. Un changement dans la performance lors d'une tâche cognitive d'interférence demandée durant la marche pourrait être reliée à la condition post-TCC et dévoiler des altérations fonctionnelles, et pourrait fournir plus d'informations pertinentes en ce qui a trait au retour à la fonction chez les personnes ayant subi un TCC.

## 1.11 Objectifs généraux

Comparer les capacités locomotrices et cognitives combinées lors d'une division d'attention entre des participants ayant subi un TCC et des participants sains lors du contournement d'obstacles fixes et mobiles.

## 1.12 Hypothèses générales

Les sujets auront une diminution de la vitesse de locomotion ainsi qu'une déviation plus tardive de la trajectoire initiale lors de l'augmentation de la complexité de l'environnement physique (i.e.: aucun obstacle → obstacle statique → obstacle dynamique), mais ces changements seront plus importants chez les participants ayant subi un TCC.

Pour les tâches impliquant à la fois un obstacle et une division d'attention visuelle, tous les participants auront une augmentation de la marge de dégagement minimale (*minimal clearance*), une diminution de la vitesse de marche ainsi qu'une déviation plus tardive de la trajectoire initiale et les temps de réaction pour effectuer la tâche cognitive simultanée seront plus élevés.

### 1.11.2 Hypothèses spécifiques

#### 1.11.2.1 Étude I

Les adultes avec un TCC auront des temps de réaction plus longs, feront plus d'erreurs à la tâche d'interférence, auront une vitesse de marche plus lente tout en ayant une plus grande marge de dégagement minimale (*minimal clearance*) que le groupe-contrôle.

#### 1.11.2.3 Étude II

Les athlètes ayant subi un TCCL ne démontreront pas de différences au niveau de leurs symptômes ainsi qu'à leurs tests cliniques comparativement aux athlètes du groupe contrôle. Par contre, ils auront des temps de réactions plus lents et feront plus d'erreurs à la tâche d'interférence. Ils auront aussi une marge de dégagement minimale plus large (*minimal clearance*) que les athlètes du groupe-contrôle. Leur vitesse de marche maximale sera aussi moins élevée que celle du group contrôle.



### **1.11.2.3 Étude III**

L'athlète ayant subi un TCCL ne démontrera pas de différences au niveau de ses symptômes ainsi qu'à ses tests cliniques comparativement aux mesures prises chez lui avant le TCCL. Par contre, il aura des temps de réactions plus lents et fera plus d'erreurs à la tâche d'interférence après avoir subi le TCCL. Il aura une marge de dégagement minimale plus grande (*minimal clearance*) et sa vitesse de marche maximale sera aussi moins élevée qu'avant son TCCL.

### **1.11.2.4 Étude IV**

Les enfants athlètes démontreront une diminution de leur vitesse de patinage ainsi qu'une augmentation de la marge de dégagement minimale (*minimal clearance*) lors de l'ajout de la tâche d'interférence.

# CHAPITRE 2 –MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Ce chapitre est une version allégée de la méthodologie des études constituant cet ouvrage, afin que soit évitée la redondance, puisque chaque article scientifique retrouvé plus loin comporte une section spécifique à la méthodologie utilisée.

## 2.1 Participants et déclaration d'éthique

Tous les participants aux différentes études rapportées ont été recrutés au moyen d'affiches et de contacts personnels. Les caractéristiques des participants de chaque échantillon étant assez différentes, elles sont décrites dans chacun des chapitres spécifiques relatant les différentes études. L'ensemble des projets expérimentaux décrits dans cet ouvrage a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche de l'Institut de réadaptation en déficience physique de Québec (IRDPO) et a reçu une exemption de la part du Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université Laval, en vertu d'une entente avec les établissements affiliés à l'Université Laval. L'étude IV a aussi reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Toronto, puisque la totalité du recrutement et de la collecte de données s'y sont déroulés (consulter le certificat d'éthique et le formulaire d'information et de consentement à l'Annexe 1 et 2). Le consentement libre et éclairé a été obtenu des participants (ainsi que de leur tuteur légal dans le cas de mineurs) avant qu'ils ne participent à l'expérimentation. Les critères d'inclusion et d'exclusion relatifs à chaque étude sont présentés en détails dans les chapitres 3 à 6.

## 2.2 Équipement

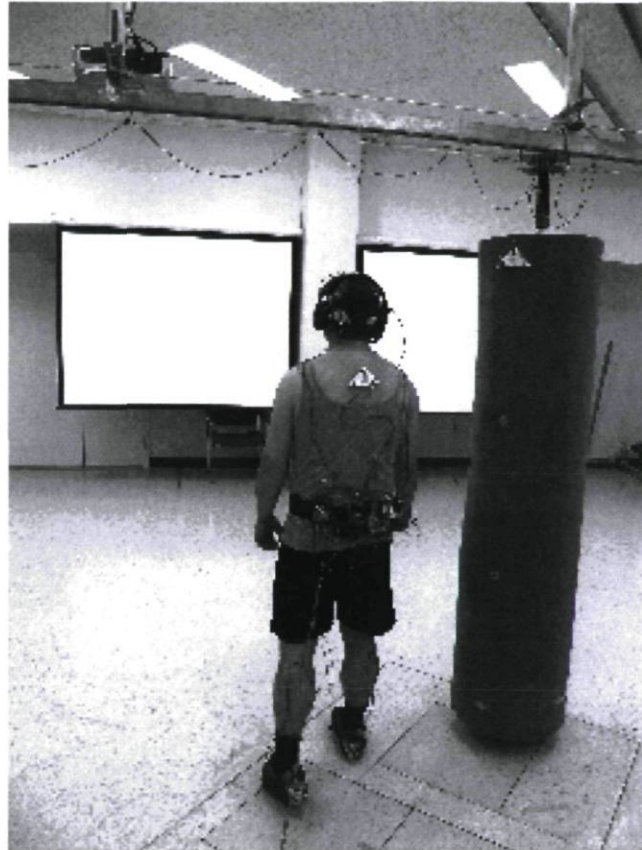
### 2.2.1 Obstacles

Tous les obstacles utilisés pour les études décrites dans cet ouvrage ont été conçus par M. Martin Gérin-Lajoie.<sup>153</sup> L'obstacle en mousse de polyuréthane (Figure 1) utilisé pour les études I, II et III est accroché sur un rail long de 3,66 mètres fixé au plafond du laboratoire.

#### 2.2.1.1 Obstacle mobile (étude I, II et III)

L'obstacle peut être mobile sur le rail grâce à une courroie le reliant à un moteur électrique (MDI 0.25 Hp, Joliette, Québec) permettant la programmation jusqu'à quatre vitesses ainsi

que quatre positions distinctes. Le système, opéré grâce à une télécommande, a été programmé pour s'arrêter à trois positions (gauche, centre, et droite, en fonction de la position de départ du participant). La vitesse moyenne de déplacement de l'obstacle entre les positions programmées a été réglée à environ 1.5 m/s.

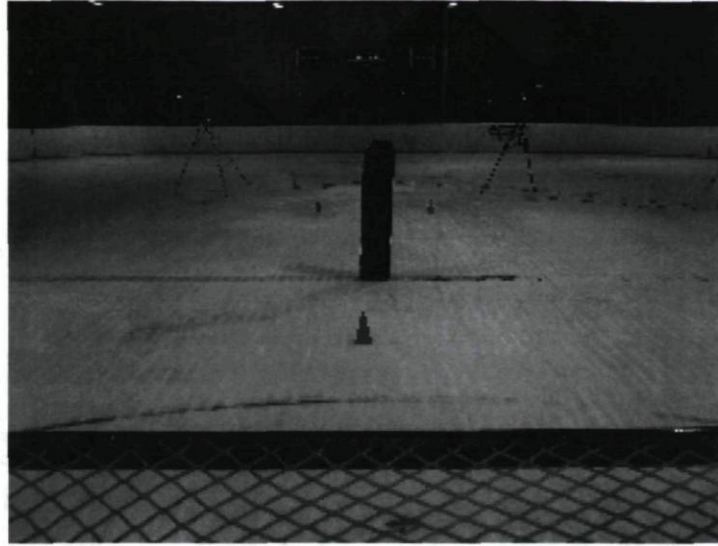


*Figure 1. Système d'obstacle mobile utilisé dans les Études I, II et III pouvant être déplacé le long d'un rail suspendu et croisant l'allée de marche à 90°.*

### **2.2.1.2 Obstacle fixe**

Dans le cas des conditions avec obstacle fixe pour les études I, II et III, l'obstacle était positionné en plein centre du rail avant le début de chaque essai. Pour l'étude IV, un obstacle différent fut utilisé puisque ce projet se déroulait directement sur une patinoire. Ici, l'obstacle d'une hauteur de 1.45 mètres et d'un diamètre de 0.30 mètre était constitué de cinq ballons de plage gonflés et empilés à l'intérieur d'une poche de tissu cylindrique (figure 2). Afin que l'obstacle ne s'affaisse pas et tienne bien en place durant l'expérimentation, un poids circulaire fait de sable a été placé dans le fond du cylindre, sur

une plaque de carton rigide. L'obstacle était par la suite placé sur une tuile de 0.3 mètre carré pour faciliter son déplacement sur la glace lorsque requis.



*Figure 2. Obstacle gonflable utilisé pour l'Étude IV.*

## **2.2.2 Outils de mesure du mouvement 3D**

Les systèmes de mesure optique tridimensionnels (3D) utilisent le principe de triangulation aussi bien pour déterminer les dimensions spatiales que la géométrie d'un élément. Fondamentalement, la configuration se compose de trois capteurs d'observation d'un marqueur. Un des capteurs est typiquement un dispositif de caméra à infrarouge (système actif; Optotrak modèle 3020) ou une caméra vidéo avec lumière infrarouge (système passif; Vicon modèle Mx).

### **2.2.2.1 Prises de données cinématique avec le système Optotrak 3020**

Pour les études I, II et III, la prise de données cinématique a été effectuée avec un système de capture de mouvement optoélectrique (Optotrak 3020, NDI, Ontario, Canada). La fréquence d'acquisition des données a été fixée à 100Hz. Des triades de marqueurs placées de façon non colinéaire étaient disposées sur différents points anatomiques (Annexe 3) afin de permettre la reconstruction en 3D du mouvement des segments des participants dans l'espace, à l'aide de matrices de rotations, selon une séquence spécifique d'Euler (X,Y,Z). Un logiciel développé au CIRRIIS a été utilisé pour calculer les axes, leur centre de rotation, ainsi que les centres de masses (CM) des segments utilisés pour ces études. Un système d'axe local propre à chacun des segments a ensuite été créé. Puis, à la suite d'une collecte

de données servant de référence lorsque le sujet devait se tenir en position neutre, des matrices de rotations ont été calculées pour trouver les coordonnées globales du CM de chaque segment. Par la suite, le CM global fut calculé en utilisant une somme pondérée des CM des segments individuels et des angles absolus dans les trois axes principaux.

Trois barres composées de trois capteurs chacune furent orientées afin d'obtenir la meilleure détection possible des marqueurs infrarouges placés sur les participants. La lumière infrarouge générée lors de la prise de données est transformée en un signal électrique qui permet de calculer la position du CM des participants selon trois dimensions. Le CM a été estimé en calculant le CM de la tête et du tronc pour chaque participant.

#### **2.2.2.2 Vicon Mx™**

Pour réaliser l'étude IV avec l'équipe du « Brain Fit Lab » de l'Université de Toronto, trois caméras vidéo Vicon™ (Vicon Mx Ultramet HD with 3 MX-3+ Cameras, USA) ont été utilisées pour mesurer les mouvements en 3D des participants. La fréquence d'acquisition des données a été fixée à 50Hz.

Le système Vicon Mx est un système passif utilisant des marqueurs réfléchissant la lumière infrarouge projetée depuis les caméras qui captent par la suite la réflexion pour calculer la position des marqueurs dans l'espace. Les données cinématiques en 3D ont été prélevées à une fréquence de 50 Hz en cours de patinage. Des marqueurs réfléchissants ont été fixés sur les pieds des participants (talon du patin), le tronc (au niveau de C7), les épaules (niveau acromioclaviculaire), et sur la tête (arrière du casque protecteur).

Puisque les caméras Vicon Nexus™ sont légères et compactes, elles sont facilement transportables hors du laboratoire et leur montage est relativement rapide. Ces atouts sont importants puisque l'étude IV se déroulait directement sur une patinoire.

## **2.3 Procédures expérimentales**

### **2.3.1 Préparation de l'équipement**

La calibration des équipements utilisés est essentielle dans le processus de prise de données afin d'en assurer la meilleure précision. Cette étape fut effectuée avant chaque session en laboratoire pour tous les appareils de mesures utilisés. Pour le système Optotrak, un corps rigide comportant 16 marqueurs était promené dans l'espace pendant 60 secondes, pendant

que les capteurs prenaient les données. Pour le système Vicon, la calibration a été faite en visualisant huit marqueurs montés sur un objet rigide et en le faisant bouger dans l'espace jusqu'à ce que le système ait assez de données (plusieurs minutes requises). Puisque le système Vicon était utilisé sur la glace, plusieurs séances de calibration furent nécessaires pour évaluer la performance de l'outil sur une patinoire qui peut réfléchir la lumière. Une calibration optimale fut trouvée, permettant de réduire la réflexion de la glace dans les caméras.

Le positionnement de l'obstacle mobile sur le rail a aussi été vérifié avant le début de chaque session. Une autre vérification a eu lieu en cours de session, à tous les 15 essais, afin de s'assurer de l'exactitude dans les positions d'arrêt de l'obstacle sur le rail.

### **2.3.2 Préparation des sujets**

Avant le début de la session d'expérimentation en laboratoire, les participants devaient lire et signer le formulaire de consentement. Par la suite, ils avaient à remplir un questionnaire démographique, un questionnaire sur les symptômes (sujets avec TCC seulement), un questionnaire sur la dominance de leurs membres supérieurs et inférieurs. Tous ces formulaires et questionnaires se retrouvent à l'Annexe 4.

Chaque participant était ensuite invité à enfiler des vêtements appropriés. Des mesures anthropométriques (masse, taille, mesure de la largeur et longueur du tronc et des jambes) étaient par la suite prises en note avant de vérifier l'acuité visuelle à l'aide d'une charte de Snellen. Des marqueurs infrarouges étaient installés sur différents repères anatomiques du participant et un casque d'écoute était ensuite installé sur la tête du participant avec un microphone fixé au moyen d'une armature de plastique rigide.

Avant de passer à l'étape de la calibration, il était demandé au participant de marcher et de bouger dans le laboratoire afin de s'assurer que la marche puisse s'effectuer sans encombre. À ce moment-là, une calibration de l'outil de mesure 3D en position neutre statique était prise. Pour les études I à III, une numérisation de divers points anatomiques précis (Annexe 3) à l'aide d'une sonde (6-Marker Probe, Northern Digital Inc., Ontario) était aussi effectuée afin de pouvoir calculer le CM spécifique à chaque sujet.

### 2.3.3 Protocole de test du comportement locomoteur

Avant chaque début d'expérimentation, les participants ont pu profiter de quatre essais de marche non-obstruée (études I, II et III) ou de patinage sans obstruction (étude IV) afin d'estimer la vitesse utilisée en cours d'expérimentation. Trois pratiques incorporant les obstacles et diverses conditions (incluant les obstacles) ont aussi été faites en début d'expérimentation afin de se familiariser à la tâche.

Les différentes tâches locomotrices étudiées au cours des différentes études sont décrites en détails dans les chapitres 3 à 6 dans lesquels sont rapportées respectivement les études I, II, III et IV. Les feuilles de prises de données, le protocole expérimental et le protocole technique pour chaque étude se trouvent à l'Annexe 5.

### 2.3.3 Tâche d'interférence

Une tâche d'interférence de type Stroop-mot<sup>190</sup> fut utilisée avec les mots *rouge*, *vert* et *bleu* projetés sur un écran (étude hockey) ou deux écrans (autres études) face au sujet, d'une manière aléatoire et à une fréquence de 1Hz dans différentes couleurs, de manière congruente ou non congruente. Le sujet devait alors nommer la couleur des mots projetés le plus rapidement, tout en ignorant le sens lexical du mot lui-même.

## 2.4 Procédures d'analyse

### 2.4.1 Traitement des données cinématiques

Les données cinématiques ont été interpolées à l'aide d'un programme développé à l'interne avec MatLab™ (version 7.1, The MathWorks Inc., USA) et ensuite filtrées (filtre Butterworth passe-bas, fréquence de coupure à 6 Hz 2<sup>e</sup> ordre à double passage) afin d'éliminer le bruit de haute fréquence.

Chaque fichier de données de marqueurs obtenu par le système Vicon Mx™ a dû être converti à l'aide d'un programme élaboré avec MatLab™, afin d'être compatible avec le programme d'interpolation développé à l'interne au laboratoire du CIRRIIS.

Étant donné que le système Vicon n'utilisait pas les mêmes axes de références, une conversion fut effectuée avant le traitement des données. Les axes furent convertis comme suit (axes de Toronto vers axes du CIRRIIS):  $X=Z$  ;  $Y=X$  et  $Z=Y$ .

### 2.4.2 Variables dépendantes

Les variables dépendantes mesurées à l'aide des outils précédemment cités sont les temps de réactions verbaux convertis en coût de division d'attention (*Dual Task Costs*), le nombre d'erreurs à la tâche d'interférence Stroop-mot, la vitesse de marche moyenne pendant l'approche de l'obstacle, la vitesse maximale atteinte pendant l'approche de l'obstacle, la marge de dégagement minimale (*minimal clearance*) entre le CM et l'obstacle, le point de déviation de la trajectoire initiale et la variabilité reliée à ces variables. Chaque variable sera étudiée en détail dans les chapitres relatant les études respectives dans lesquelles elles furent mesurées.

### 2.4.3 Statistiques

Une moyenne de tous les essais pour chaque variable dépendante et pour chaque participant a été utilisée pour les analyses statistiques. Ces moyennes ont été calculées en utilisant des programmes sur Matlab et Excel. Les analyses statistiques ont par la suite été réalisées à l'aide du logiciel SPSS (version 16.0 SPSS Inc, Chicago, USA). Des tests non paramétriques statistiques ont été utilisés pour trouver des différences significatives entre les groupes (Mann-Whitney) et les principaux effets au sein des groupes, à travers les conditions expérimentales (Friedmann). Lorsqu'une différence était relevée au sein des groupes, une analyse post-hoc a été effectuée avec le test de Wilcoxon pour déterminer quelles étaient les conditions qui différaient. Le niveau de signification a été fixé à 0,05. De plus amples détails concernant les tests statistiques relatifs à chaque étude sont présentés dans les chapitres correspondant respectivement à ces études.



## CHAPITRE 3 – ÉTUDE I

Understanding changes in locomotor navigation during the circumvention of fixed and moving obstacles in adults with moderate or severe traumatic brain injury.

### 3.1 Résumé en français

Des mesures cliniques et l'analyse de la marche ont été faites chez des participants (5 hommes, 3 femmes; âge, 39.91 +/-18.10 ans) ayant subi un TCC modéré ou sévère ainsi que chez un groupe contrôle formé de personnes n'ayant jamais subi de TCC (4 hommes, 4 femmes; âge, 39.28 +/- 9.07 ans). La tâche consistait à marcher à une vitesse confortable auto-sélectionnée le long d'un parcours libre ou entravé, avec et sans présence d'une tâche visuelle d'interférence (Stroop-mot). Les mesures comprenaient le temps de réaction de la réponse, les erreurs de réponse, la vitesse de marche moyenne, la vitesse maximale de marche, le point de déviation de la trajectoire et le dégagement minimal avec l'obstacle. Les adultes ayant subi un TCC ont démontré des temps de réaction de réponse plus longs, ont fait plus d'erreurs dans la réponse à la tâche d'interférence, avaient une vitesse moyenne de marche plus lente, une vitesse maximale de marche plus lente et démontraient aussi plus de dégagement minimal face aux obstacles. Ces résultats démontrent que même après un bon rétablissement au niveau locomoteur, les personnes qui ont subi un TCC modéré ou grave présentent toujours des déficits locomoteurs résiduels lors de l'exécution multitâche pendant la marche. Plus précisément, les participants les personnes avec un TCC modéré ou sévère ont démontré plus de difficultés à faire face à la planification dans des environnements complexes écologiques qui de façon simultanée utilisaient leur capacités locomotrices et attentionnelles, et ce même si le l'équilibre dynamique a été minimalement sollicité.

### 3.2 Introduction

Persons with moderate or severe traumatic brain injuries (TBI) usually present complex neurological deficits. Many systems in the human body can be affected by such an injury including vision, audition, somatosensation, and the vestibular systems. Deficits usually appear within days and can last for months following the trauma. Cognitive problems can also cause difficulties for the individual, such as with memory, attention, or concentration,

as well as executive function problems.<sup>61</sup> However, with rehabilitation some recovery can be achieved.<sup>61</sup> In terms of locomotor ability, it has been shown that it takes on average between 1.5 to 3 months to return to autonomous ambulation following a severe TBI.<sup>117</sup>

Individuals who recover well from a TBI will still have to face different challenges when returning to their community including safe locomotion within different environments. A systematic review<sup>191</sup> showed that individuals who sustained a TBI usually walk more slowly, with shorter steps and greater mediolateral sway, compared to healthy subjects. The deficits were even more pronounced when individuals who sustained a TBI were asked to step over obstacles, walk with their eyes closed, or perform a division of attention (dual task).<sup>191</sup> Other work<sup>192</sup> has shown that higher level locomotor activity necessary to quality of life and return to normal function is poorly understood. These authors also showed that environmental barriers affect individuals who sustained a TBI.

However, there is still little understood about locomotion in the complex environments encountered daily by individuals who have sustained a TBI. Previous studies<sup>119,193</sup> have shown that participants with moderate or severe TBI have difficulties in dealing with environments that concurrently challenge their locomotor and cognitive abilities, for example performing a simultaneous cognitive task dividing their attention while stepping over obstacles. In one study,<sup>119</sup> participants with TBI walked more slowly and with greater clearance margins than control participants for the leading limb over the obstacle<sup>119</sup> In a more recent study,<sup>193</sup> response reaction times to a simultaneous Stroop task were also found to be longer for the TBI group and the TBI group also showed greater attention costs for a visual versus an auditory interference stimuli when compared to a control group of healthy individuals.<sup>193</sup> These studies were very challenging for equilibrium postural control because they involved stepping over an obstacle. Also, the high functioning persons with moderate or severe TBI showed greater deficits in more complex environments (avoiding wider obstacles and performing the Stroop word task<sup>119</sup>).

The present study concentrates on the effects of locomotor planning for increasingly demanding environments but for less challenging dynamic equilibrium tasks (circumventing an obstacle) following moderate to severe TBI. Thus, the purpose of this study was to compare combined locomotor and cognitive abilities between participants who

sustained a moderate or severe TBI and a control group in environments with increasing complexity in the planning aspect for circumventing static and moving obstacles with and without simultaneous non-locomotor cognitive tasks.

### 3.3 Methodology

The study was approved by the Ethics Committee of the Quebec City Rehabilitation Institute (QRI) and all participants signed an informed consent before data collection. A sample of eight participants (5 men, 3 women; age, 39.91 +/-18.10 y) who sustained a moderate or severe TBI injury was recruited from the TBI unit of the QRI. An age matched control group (4 men, 4 women; age, 39.28 +/- 9.07 y) was recruited from the community. See table 1 for the participants' characteristics.

*Table 1: Characteristics of the participants*

<b>Participant</b>	<b>Sex</b>	<b>Dominance</b>	<b>Age (year)</b>	<b>Time since injury (month)</b>	<b>Classification TBI</b>
<b>TBI participants</b>					
MT1	F	R	55.30	4.04	Severe
MT2	M	R	59.76	6.54	Severe
MT3	M	R	23.72	3.78	Severe
MT4	M	R	54.36	5.79	Severe
MT5	F	R	17.89	10.16	Severe
MT6	M	R	56.42	2.99	Severe
MT7	F	R	30.58	5.85	Moderate
MT8	M	R	21.29	1.41	Severe
		Mean	<b>39.91</b>	<b>5.07</b>	
		SD	<b>18.10</b>	<b>2.66</b>	
<b>Control participants</b>					
MT9	F	R	51.76		
MT10	F	R	31.96		
MT11	F	R	43.39		
MT12	M	R	38.92		
MT13	M	R	46.95		
MT14	M	R	22.54		
MT15	F	R	37.04		
MT16	M	R	41.66		
		Mean	<b>39.28</b>		
		SD	<b>9.07</b>		

The inclusion criteria for the TBI group were to have sustained a moderate or severe TBI (based on their score on the Glasgow Coma Scale, duration of post-traumatic amnesia and neuroradiological exam by the QRI TBI unit).<sup>3</sup> All subjects were also required to be older than 18 years and have normal vision with or without correction verified with a Snellen eye chart test. The exclusion criteria for all subjects were: being on medication that may affect motor control; having a musculoskeletal or neurologic (other than the brain injury for the TBI group) problem that could affect locomotion; having a cognitive or behavioural problem that could interfere with the study participation; having had a general anaesthesia during the three months period prior to study participation; having an average consumption of more than two servings of alcohol per day.

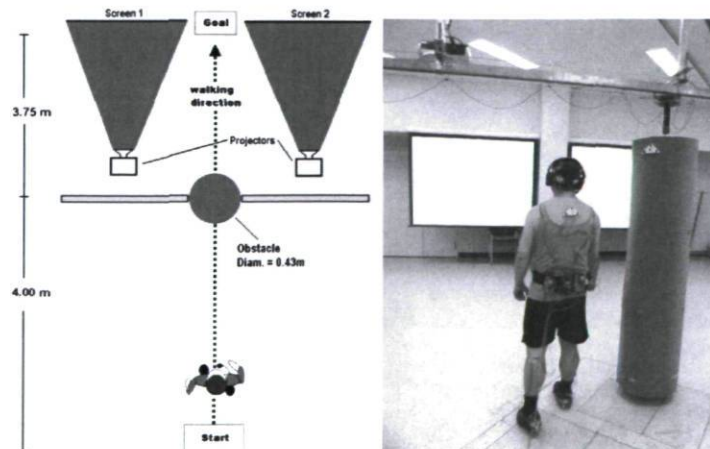
The study included clinical testing divided into two sessions: physiotherapy screening and neuropsychological testing. The physiotherapy screening was performed by a licensed physiotherapist of the TBI unit and included the time (maximum of 30 seconds) for standing still with feet together, tandem standing with open and closed eyes, the unipodal test,<sup>194</sup> as well as the Step test,<sup>195</sup> the Four Square Step test<sup>196</sup>, the functional dynamic gait index<sup>197</sup> and gait speed over 10 meters.<sup>198</sup> Participants with TBI were classified as high functioning as they were within normal values for the majority of the physiotherapy tests. They showed poorer results than accepted values only for the unipodal test and on the functional dynamic gait index.

Clinical neuropsychological measures of attention and executive function were administered by licensed neuropsychologists of the TBI unit and included the Spatial and Digit Span Tests of the Wechsler Memory Scale, 3rd edition,<sup>199</sup> the Symbol Digit Modalities Test,<sup>200</sup> the Trail Making Test and the Color-Word Interference Test of the Delis-Kaplan Executive Function System,<sup>201</sup> the subtests Elevator counting with distraction, Telephone search and Telephone search dual task of the Test of Everyday Attention<sup>202</sup> and the subtests Choice Reaction Time for Single Digits and Sequential Reaction Time of the California Computerized Assessment Package.<sup>203</sup>

In the laboratory, anthropometric measurements (e.g., height and mass) were taken before beginning data collection. Subjects were also instrumented with triads of non-collinear infrared markers fixed on the feet, trunk and head. Specific anatomical points were

digitized (the front of the feet; the heads of 5th metatarsal bones; the heels of the feet; the sternal notch; the lateral surface of the humeral heads; and both ears) to later estimate the centre of mass (CM) of each individual segment.

The participants were asked to walk, without stopping, at a self-selected comfortable speed from a starting location marked on the floor up to a column located 8.75 m straight-ahead. Three dimensional kinematic data from the infrared markers were tracked during walking at a frequency of 100 Hz with a motion analysis system (Optotrak 3020, NDI, Canada). The locomotor tasks consisted of walking along an unobstructed or an obstructed path both with and without a visual interference Stroop-word task. Four unobstructed walking trials were initially performed to estimate the participants' comfortable walking speed. For the obstructed trials, participants were required to circumvent a cylindrical obstacle made of foam (height of 181 cm, diameter of 43 cm) set on a suspended rail within the walking path at 4 m from the participants starting location. When static, the obstacle was set in the middle of the path giving an equivalent spacing of 2.09 m on either side of the obstacle to allow a symmetric clearance area (see Figure 1). When moving, the average speed of the obstacle was approximately 1.5 m/s to simulate the average walking speed of adults. For all of the static obstacle conditions, the participants were informed that the obstacle would remain static for the duration of the trial and they were instructed as to which side of the obstacle they had to pass (i.e., left or right). For the moving obstacle conditions, or when no obstacle was present, the participants had no other instructions than the ones indicated earlier.



*Figure 1. A) top view of the experimental laboratory set-up and B) picture of a participant performing the task obstacle circumvention and Stroop tasks.*

The visual interference task was used on half of the trials and the participants were informed in advance of its presence or its absence in the trial. The visual interference involved a visual Stroop-word task<sup>190</sup> with the words “red”, “green” and “blue” projected at a rate of 1Hz in different congruent or incongruent colours on two screens fixed in front of the athlete at the end of the path on either side of the column. Participants were required to indicate the colour of the word as fast as possible while ignoring its lexical meaning. The participants’ verbal responses were recorded (1000 Hz) with a microphone placed in front of the mouth and fixed on headphones that played pink noise (80 db) to minimize distraction from ambient sounds in the laboratory. All of the trials were videotaped to identify responses during the performance of the Stroop-word task. Errors were computed when an omission or the wrong color was named by the participants.

The experimental gait conditions were 1) no obstacle, without Stroop; 2) no obstacle, with Stroop; 3) fixed obstacle, passing right, without Stroop; 4) fixed obstacle, passing right with Stroop; 5) fixed obstacle, passing left without Stroop; 6) fixed obstacle, passing left with Stroop; 7) moving obstacle from left to right, without Stroop; 8) moving obstacle from left to right, with Stroop; 9) moving obstacle from right to left without Stroop; and 10) moving obstacle from right to left with Stroop. Five trials of each condition were performed in a random order for a total of 50 trials per participant.

The kinematic data were interpolated and then low-pass filtered at 6 Hz with a 4<sup>th</sup> order zero-lag Butterworth filter. Response reaction times to the Stroop task during gait were calculated from the time difference between the stimulus onset and the onset of the verbal response. Dependent variables that were kept for analyses were reaction times, response errors, average gait speed (with the acceleration of the first two steps of walking removed), maximal gait speed, point of deviation and minimal clearance (minimal distance of the trunk CM from the obstacle surface during circumvention and up to the point of crossing the center line of the obstacle). The data were calculated from the starting location to the crossing point of the obstacle. For the no obstacle conditions, the variables were processed up to the point where the static obstacle would be situated in the walking path.

Statistical analyses were performed with SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL). An average of each dependent variable was calculated using custom Matlab programs across trials for

each athlete to be used for statistical analyses. Nonparametric statistical tests were used to find significant differences across groups (Mann-Whitney-U) and main effects within groups (Friedmann). Post-hoc analyses for significant within-group findings were performed using the Wilcoxon test. The significance level was set to 0.05.

### 3.4 Results

#### 3.4.1 Clinical neuropsychological testing

For the neuropsychological testing battery, participants with TBI had poorer clinical results than the control group when looking at the overall battery of tests (see table 2).

*Table 2. Neuropsychological tests and p-values*

<b>Neuropsychological testing</b>			
	<b>TBI</b>	<b>CONTROL</b>	
	<b>Average (SD)</b>	<b>Average (SD)</b>	<b>p-values</b>
Numeric Span	16.75 (5.23)	17.88 (5.52)	.798
Spatial Span	16.50 (2.20)	16.43 (2.70)	.798
SDMT	40.63 (10.85)	59.57 (14.92)	.010
Stroop 1	32.50 (6.50)	29.14 (4.14)	.234
Stroop 2	27.88 (6.42)	22.71 (5.12)	.161
Stroop 3	56.38 (14.36)	52.29 (13.95)	.382
Stroop 4	74.88 (17.02)	58.57 (13.16)	.038
TEA 3	6.63 (2.62)	7.714 (1.80)	.721
TEA 6	4.73 (1.79)	2.67 (0.48)	.010
TEA 7	6.35 (3.04)	3.23 (0.65)	.072
TEA dual task decrement	1.62 (2.72)	0.53 (0.38)	.867
TMT 1	21.63 (5.10)	16.29 (3.68)	.028
TMT 2	30.63 (9.15)	22.57 (4.31)	.038
TMT 3	44.57 (21.28)	25.00 (9.15)	.072
TMT 4	100.00 (39.82)	53.29 (13.88)	.021
TMT 5	28.25 (15.67)	17.29 (4.5)	.130
CalCAP 1 TR	469.75 (40.03)	415.29 (40.57)	.010
CalCAP 1 true +	14.88 (0.35)	15.00 (0.00)	.721
CalCAP 1 false +	0.00 (0.00)	0.57 (0.98)	.234
CalCAP 2 TR	637.88 (96.04)	521.00 (126.26)	.065
CalCAP 2 true +	16.50 (4.69)	18.71 (2.56)	.161
CalCAP 2 false +	0.38 (0.74)	1.00 (1.83)	.721

### 3.4.2 Responses Reaction Times (RRT)

The TBI group showed higher RRT ( $p < 0.001$ ) compared to the control group (Figure 2) across all conditions. The TBI group also showed higher RRT than the control group for both the fixed ( $p < 0.001$ ) and the moving ( $p < 0.001$ ) obstacle conditions. When looking at the side of circumvention, it was found that the TBI group had higher RRT for both sides (left,  $p < 0.001$  and right  $p < 0.001$ ) than the control group. For each group specifically, no statistically significant differences were found across the different conditions (TBI group  $p = 0.103$ ; control group  $p = 0.681$ ).

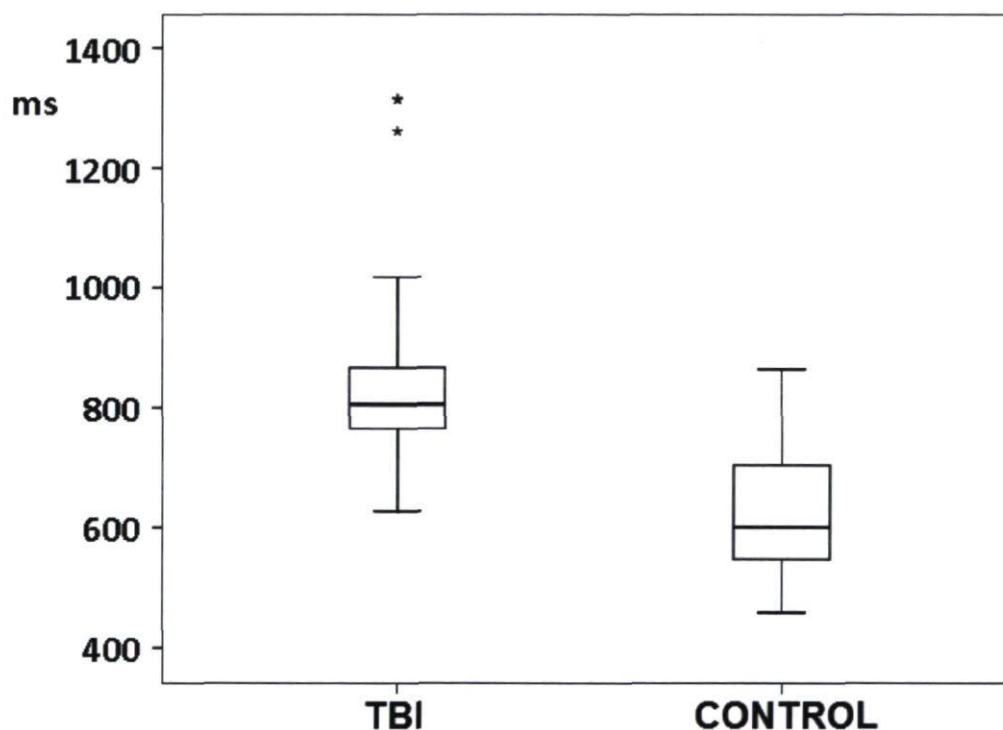


Figure 2. Box plots of response reaction time for each group.



### 3.4.3 Errors

The TBI group made more errors overall than the control group ( $p=0.032$ ) with a total of 51 errors compared to 28 for the control group (Figure 3). When looking at each condition separately, no statistically significant differences were found between the TBI group and the control group.

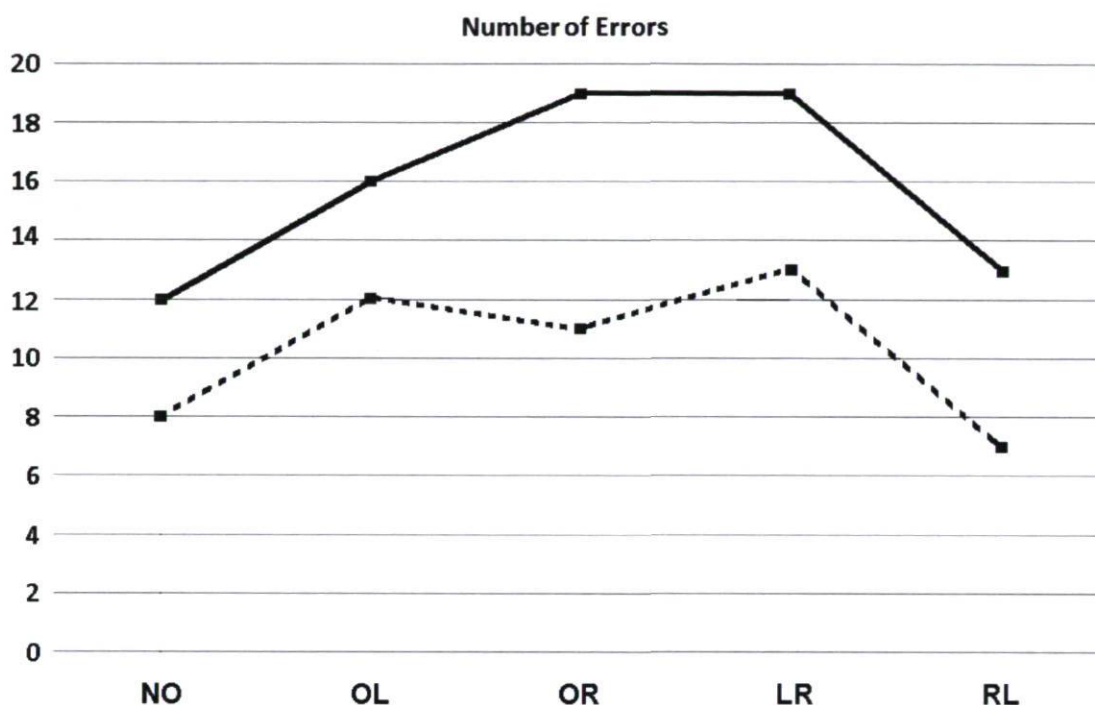


Figure 3. Number of errors committed on the Stroop-word task for the TBI (solid line) and Control (dashed line) groups across the conditions of no obstacle (NO), left (OL) and right (OR) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL).

### 3.4.4 Average gait speed

The average gait speed data are shown in Figure 4. The data showed that the overall average gait speeds of the participants with TBI were slower than those in the control group ( $p<0.001$ ). This slower average gait speed was found both when no interference task was present ( $p<0.001$ ) and with the Stroop task ( $p<0.001$ ). When looking specifically at obstacle avoidance, this finding was also shown both for fixed ( $p=0.003$ ) and moving ( $p<0.001$ ) obstacles. For both groups, the average gait speed decreased when an

interference Stroop task was added (TBI group  $p < 0.001$ ; control group  $p < 0.001$ ) as well as when the obstacle was moving comparing to the fixed conditions (TBI group  $p < 0.001$ ; control group  $p < 0.001$ ). Both groups showed no difference in average gait speed for the side of circumvention (TBI group  $p = 0.926$ , control group  $p = 0.708$ ).

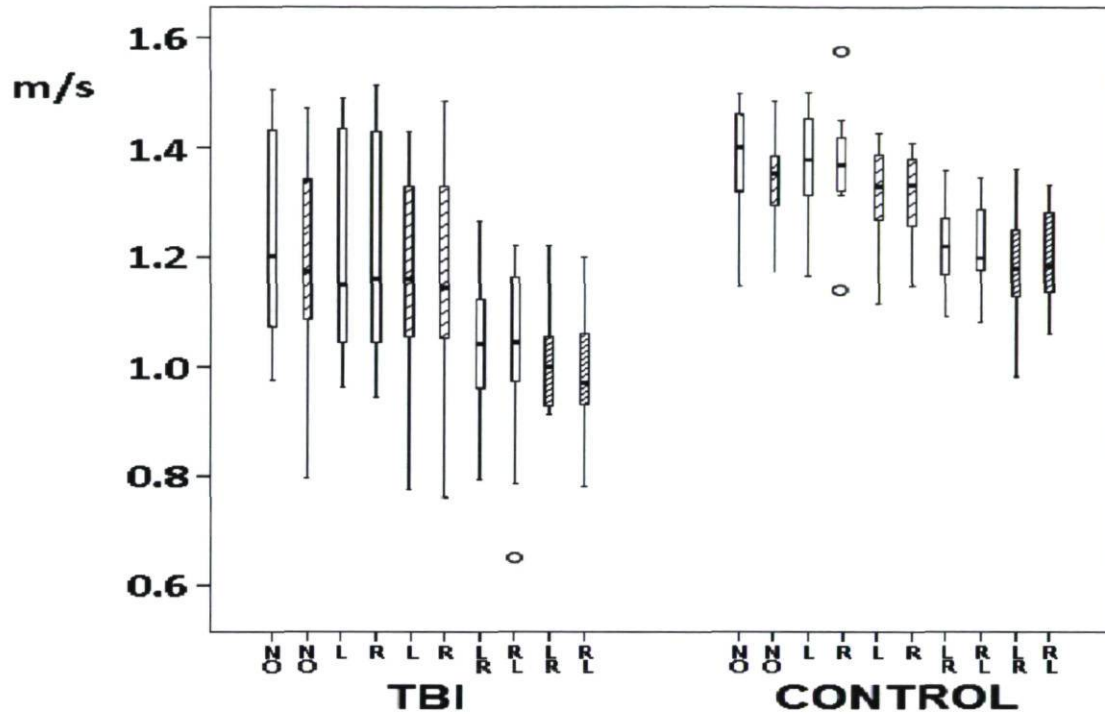


Figure 4. Box plots of average gait speed for each group across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes.

### 3.4.5 Maximal gait speed

Maximum speed during obstacle approach is presented in the same manner as for minimum clearance in Figure 5. The overall data showed that the maximal gait speed was slower in the TBI group compared to the control group ( $p < 0.001$ ). This was also found when looking at fixed obstacles conditions only ( $p < 0.001$ ), moving obstacle conditions only ( $p < 0.001$ ), and with ( $p < 0.001$ ) or without ( $p = 0.003$ ) an interference task. When looking specifically at each group, differences in maximal gait speed were found across all conditions for both groups (TBI  $p < 0.001$ , control group  $p < 0.001$ ) showing a statistically significant decrease in maximum approach gait speed when the obstacle was moving (TBI group  $p < 0.001$ ; control

group  $p < 0.001$ ) compared to fixed obstacle conditions. Maximal gait speed was also slower when a Stroop interference task was present (TBI group  $p < 0.001$ ; control group  $p < 0.001$ ).

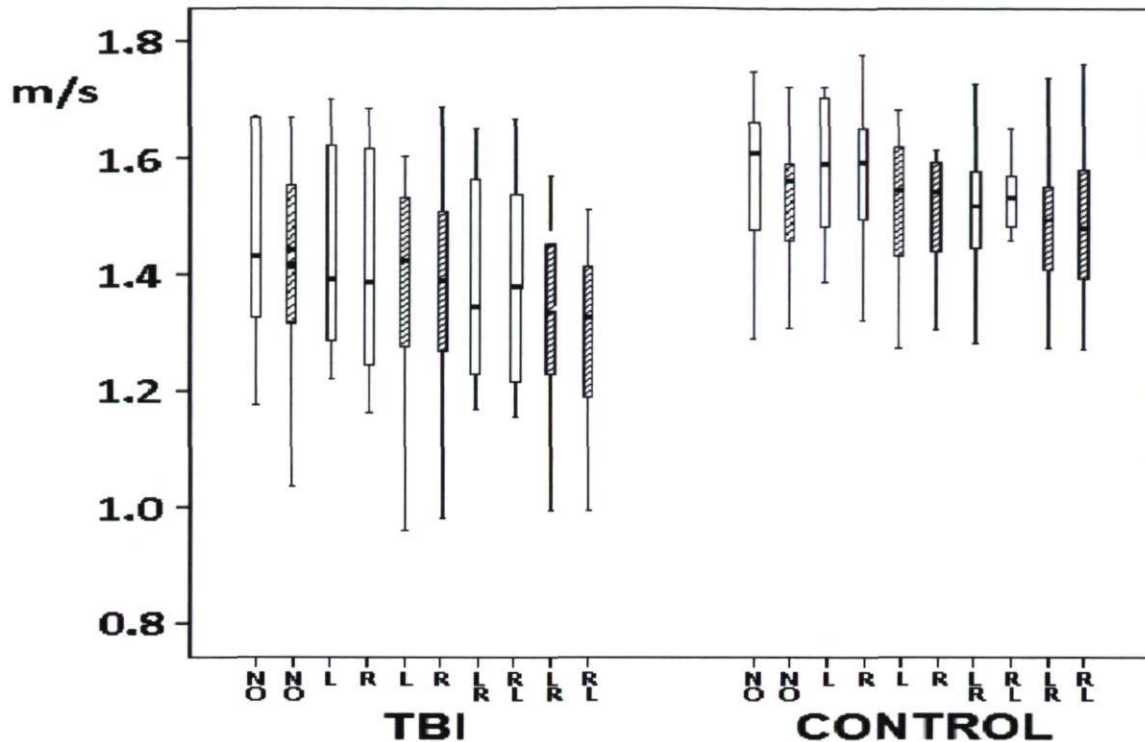


Figure 5. Box plots of maximal gait speed across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes.

### 3.4.6 Point of deviation

There was no difference between the TBI group and the control group on the overall conditions ( $p = 0.221$ ) for the point of deviation (see Figure 6). When looking at each group specifically, both groups had a statistically significant difference for the point of deviation between the fixed and the moving obstacles conditions (for both groups  $p < 0.001$ ) showing an earlier point of deviation when the obstacle was fixed. No other intra-group differences were found as there was no difference in the visual Stroop interference task conditions (TBI group:  $p = 0.331$ ; control group:  $p = 0.390$ ) or in the side of circumvention (TBI group:  $p = 0.779$ ; control group:  $p = 0.708$ ) for the point of deviation.

### 3.4.7. Variability in Point of deviation

The TBI group showed a larger variability of the point of deviation on the overall conditions ( $p=0.002$ ) compared to the control group (see Figure 7). There was no statistically significant difference between the groups when no interference task was present ( $p=0.088$ ) but a statistically significant difference was found for the interference task conditions, showing a larger variability in the TBI group than for the control group ( $p=0.008$ ). When looking at fixed and moving obstacles conditions separately, a larger variability in the TBI group was found for both fixed obstacle conditions ( $p=0.008$ ) and moving obstacle conditions ( $p=0.012$ ). When looking at each group specifically, it was found that adding an interference task increased the variability in the point of deviation for the TBI group ( $p=0.026$ ), but had no effect for the control group ( $p=0.970$ ). Also, for the moving obstacles conditions both groups showed an increased variability when compared to fixed obstacles conditions (TBI group  $p=0.001$ , control group  $p<0.001$ ).

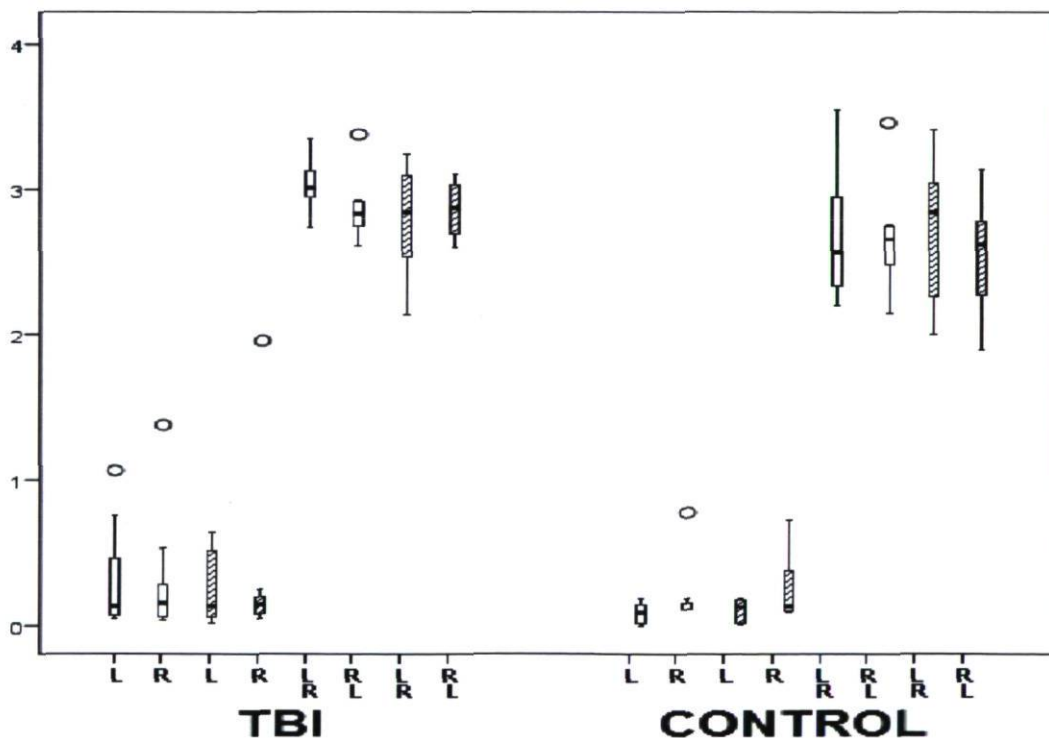


Figure 6. Box plots of point of path deviation across conditions of left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes.

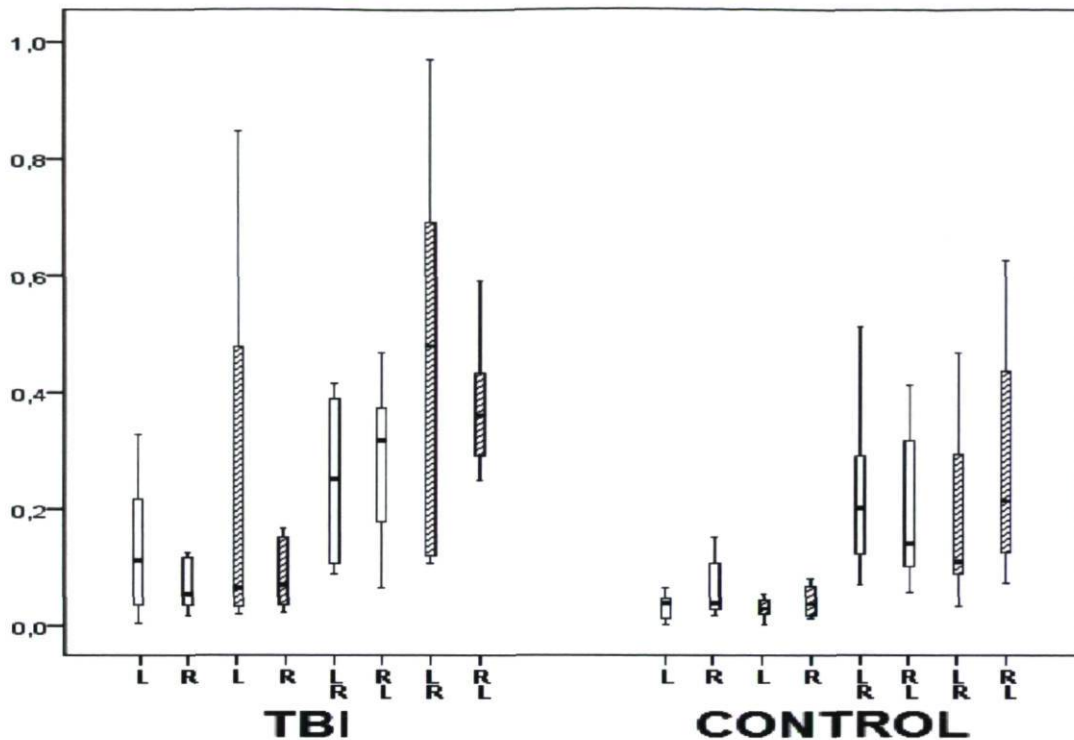


Figure 7. Box plots of the variability of the point of path deviation across conditions of left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes.

### 3.4.8 Minimal clearance

All minimal clearance data are presented in Figure 8. The group with TBI showed larger minimal clearances when compared to the control group ( $p < 0.001$ ). The minimum clearance was larger in the TBI group for both sides of circumvention (left,  $p = 0.001$ , right  $p = 0.045$ ) compared to the control group. For both groups, the minimal clearance of the obstacle was smaller on the left side than on the right side ( $p < 0.001$ ) for all conditions pooled. When the conditions were separated out for “Side” and “Stroop”, the same general behaviour was also evident for both groups even though the simultaneous Stroop task caused greater clearances due to a division of attention for the left side only in the TBI group ( $p = 0.003$ ) and the right side only for the control group ( $p = 0.004$ ). When looking specifically at fixed and moving obstacle conditions, larger minimal clearance was found for the TBI group when compared to the control group for the fixed obstacle conditions only ( $p = 0.006$ ), as no statistically significant differences in minimal clearance were found for the moving obstacle conditions ( $p = 0.115$ ).

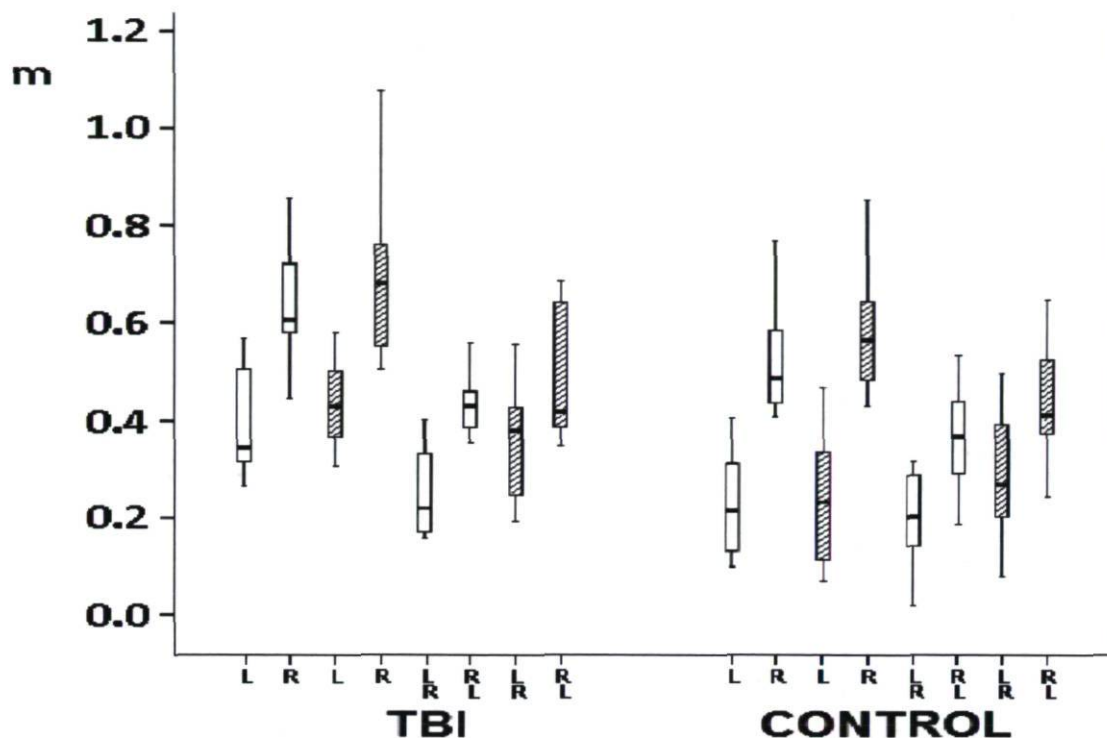


Figure 8. Box plots of minimal clearance across conditions of left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes.

### 3.5 Discussion

All the participants in this study were considered to be of high level functioning (i.e. clinical walking speed greater than 1m/s; and could walk without assistance or walking aid). Despite their highly functional level, differences in locomotor and cognitive functions were shown in the laboratory setting for individuals who sustained a TBI. These alterations were specifically shown when adding a division of attention to the locomotor task. In addition, the results of the TBI group were poorer in the neuropsychological testing as well as during the cognitive task in the laboratory where they made more errors and were slower to respond in the Stroop task compared to controls. The participants with TBI had a slower executive functioning capacity and reduced attention skills as seen in their neuropsychological test results. However, they had a high functioning capacity since their physiotherapy test results were poorer than those of the controls for only two of the tests used.

Even though the individuals who sustained a TBI were high functioning participants, they walked slower than the control participants for all conditions. Slower walking speed for individuals with TBI has also been shown in other studies.<sup>143,141,142</sup> However, the subjects with TBI showed the same overall pattern of locomotor behaviour compared to the control group. First, they had no significant differences between conditions for response reaction times. They also showed a decrease in average gait speed when an interference Stroop task was added, like the control group although greater for the TBI group. Concerning the point of path deviation, they also showed no differences compared to the control group even if they were more variable. Lastly, although they showed greater minimal clearance than the control group, subjects with TBI also increased their clearance when the visual interference was present, like the control group.

It is known that individuals with TBI present decreased attention capacities skills<sup>204</sup> and the neuropsychological testing results of this paper also support this. In this study, it was shown that people who sustained a TBI were slower when performing the simultaneous cognitive task, had greater errors and also showed a greater variability in the point of path deviation. It is possible that such behaviour is related to a general deficit of attention following moderate or severe TBI, resulting in difficulties to perform the dual-task effectively. It is also possible that the present results also show more cautiousness during the locomotor tasks to avoid contact with the obstacle in complex, ecological environments. This increase in cautiousness might be a residual carry over from the recovery process, even if a good locomotor capacity is recovered.<sup>141</sup> Patients with TBI may also experience a certain level of anxiety<sup>205,75,76</sup> that could affect motor control.<sup>206</sup> However, anxiety was not measured in this study.

It is also known that individuals with TBI present general instability<sup>157,162,164,140</sup> that could result in increased cautious behaviour when their postural stability is challenged. In this study, however, circumvention of obstacles was less demanding on the subjects' equilibrium compared to when having to step over an obstacle.<sup>119,193</sup> In addition, participants could have put their attention more on the visual interference task, because even contact with the obstacle would not greatly challenge their balance. Such a difference is crucial, because individuals with TBI are usually more cautious when stepping over an obstacle.<sup>119,141</sup> Yet, even if the demands on dynamic equilibrium were less in this study, the

presence of moving obstacles in the environment still increased planning complexity. However, the planning didn't seem to be an issue in the present context for the high functioning study participants with TBI. Thus, it is possible that these high functioning subjects, although having executive function and attention deficits, possessed the locomotor ability to allow them to deal with the level of information processing and planning of the present navigational context. The participants had a general division of attention deficit that manifested itself across all locomotor conditions. In previous studies<sup>119,193</sup> involving stepping over obstacles and dual-tasking, increased demands on both the equilibrium control and visuo-spatial attention provided greater challenges for the high functioning person with moderate or severe TBI. It remains to be seen whether persons with more deficits in locomotor function or environments with greater challenges to planning (i.e., increased number of moving obstacles with different speeds, like in crowds) would result in increased deficits with increased environmental complexity.

It is interesting to see similarities between results for individuals with moderate or severe TBI and those of mild traumatic brain injury (mTBI) (Fait et al., submitted) for similar navigational tasks. Using the same paradigm, functional alterations were also found for athletes who sustained an mTBI, even though these athletes had normal neuropsychological testing values and were completely asymptomatic at the time of testing. Increasing complexity of the task was not an issue for both studies, but the presence of deficits was still shown when a dual task was presented to the participants.

This current paper shows that the residual deficits of TBI are clearly revealed when attention is divided in ecological, complex environments. The results of this study, therefore, may have clinical implications for patients who have sustained a TBI, but who appear to recover well. They support the need to accurately evaluate their deficits during the course of their rehabilitation to assist in decision making about whether a patient is ready or not to go back to challenging activities in their community. Another interesting point for the clinician is that the complexity in such environments may be exploited not only to show general deficits in mobility, but also when using more demanding tasks (e.g. stepping over obstacles or a combination of stepping over and circumventing moving obstacles), to show more subtle changes in function for persons with TBI. More research should be done with more subjects, greater ranges of deficits (e.g., slower walking speeds)



and with different types and shapes of obstacles, to differentiate subtle to severe deficits following TBI. This could also eventually include the development of a functional test battery that would help the clinician more specifically evaluate the level of function of a patient with TBI.

### **3.6 Conclusion**

The present results show that, even after good locomotor recovery, individuals who have sustained a moderate or severe TBI still show residual locomotor deficits in multitasking during mobility. Specifically, participants with moderate to severe TBI showed greater difficulties in dealing with planning in complex ecological environments that simultaneously challenged their locomotor and attention abilities even when the challenge to dynamic equilibrium was minimal.

### **3.7 Acknowledgements**

We would like to thank Guy St-Vincent for his technical assistance, Eric Huard and Janick Bisson for their consultation and development of the Stroop presentation program and the TBI unit of the IRDPQ. This study was funded in part by the Canadian Institutes of Health Research and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada to BJ McFadyen.

## CHAPITRE 4 – ÉTUDE II

Athletes showing normal clinical outcomes present alterations to integrated locomotor and cognitive function more than 30 days following a first non-complex mild traumatic brain injury.

### 4.1 Résumé en français

Des mesures cliniques et des analyses de la marche ont été prises plus de 30 jours après un TCCL chez des athlètes d'élite (4 hommes, 2 femmes; âge, 19.7 +/-2.3 ans) ainsi que pour les athlètes qui n'ont jamais subi un TCCL (4 hommes, 2 femmes; âge, 20.1 +/- 2.7 ans). Les athlètes assignés au groupe contrôle étaient appariés pour l'âge, le sexe, l'équipe sportive et la position qu'ils occupaient dans leur équipe. La tâche consistait à marcher à une vitesse confortable auto-sélectionnée le long d'un parcours libre ou entravé, avec et sans présence d'une tâche visuelle d'interférence (Stroop-mot). Les mesures comprenaient les coûts de la division d'attention (*dual task costs*), les erreurs aux réponses, la vitesse de marche moyenne, la vitesse maximale de marche, le point de déviation de la trajectoire, la distance de dégagement avec l'obstacle, ainsi que la variabilité de ces mesures. Les athlètes qui ont subi un TCCL étaient asymptotiques au moment du test et leurs résultats d'essais cliniques (la fonction motrice et de la neuropsychologie) n'étaient pas différents de ceux des athlètes du groupe contrôle. Toutefois, les athlètes ayant subi un TCCL ont démontré un coût de division d'attention plus élevé, ont effectué plus d'erreurs dans les réponses à la tâche d'interférence, ont eu une marge de dégagement dynamique plus grande avec les obstacles, ont eu une plus grande variabilité de la vitesse de marche moyenne, une plus grande variabilité dans le point de déviation de la trajectoire, et des changements dans les vitesses maximales de marche entre les diverses conditions, plus de 30 jours après le TCCL.

### 4.2 Introduction

Mild traumatic brain injury (mTBI) is often more difficult to diagnose than moderate or severe traumatic brain injuries (TBI) even for the experienced clinician.<sup>207</sup> The lack of evidence-based assessment guidelines<sup>208</sup> to establish specific and clear diagnostics has led to disagreements among clinicians about return-to-play guidelines. Usually mTBI involves a rapid resolution of post-concussion symptoms (e.g., disorientation, confusion, headache,

fatigue)<sup>209-212</sup> as well as an absence of clinical evidence from currently available neuroimaging techniques<sup>213</sup> that adds to difficulties in diagnoses. Some studies on sport-related mTBI have concluded that athletes who sustain a non-complex mTBI, (non-complex definition from the Zurich consensus on concussion in sport)<sup>62</sup> need no specific intervention during the period of recovery other than limiting exercise and sport-specific training while symptoms persist. It is also generally accepted that an athlete who sustained a sport-related mTBI usually resumes his or her activities, including returning to their sport, without further apparent problem.<sup>214</sup> However, some authors suggest that a minimum period of 7 days of rest before resuming sporting activities and that this recovery period could help decrease the risk of recurrent mTBI.<sup>211,215</sup> At the collegiate and high school levels in the United States, an average of 90% of football athletes who sustained an mTBI returned to play after a period of rest of 5 to 7 days.<sup>215</sup> Athletes can sustain a subsequent mTBI during the same sports season within a window of 7 to 10 days following return-to-play after the first mTBI.<sup>215</sup>

It is well known that mTBI affects cognitive function including reaction time, information processing and memory.<sup>216-218</sup> However, neuropsychological testing measures generally return to their baseline within 5 to 7 days after an mTBI.<sup>209,211,219</sup> Although a variety of neuropsychological tests have been developed to evaluate the athlete's cognitive performance following an mTBI,<sup>220</sup> research on the assessment of dynamic motor task performance after an mTBI has not attracted a lot of attention. Some research has looked at postural changes after mTBI, mainly studying the standing postural sway during quiet stance with altered sensory inputs.<sup>158,221,164,161</sup> On the other hand, no relationship has been found between symptoms and performance on tests of cognitive function and static postural stability.<sup>166</sup> Therefore, it appears that the recovery of cognitive and motor function after sustaining an mTBI probably does not progress over the same timeframe.

Some authors have shown that compared to a control group, individuals who sustained a moderate to severe TBI still walked with increased caution and showed a significantly slower gait speed despite high-functioning behaviour.<sup>140,142,141</sup> Other authors<sup>119</sup> found that even with a good recovery of locomotor capacity, individuals who sustained a moderate or severe TBI showed greater difficulties in dealing with complex environments challenging their locomotor and attention abilities concurrently. The consideration of obstacle

avoidance and divided attention following mTBI is very recent in the literature, showing that compared to healthy subjects, individuals who have suffered an mTBI have reduced postural stability when walking with a divided attention task.<sup>156,222</sup> In these studies, the subjects who sustained a concussion generally showed a more conservative strategy for their gait stability. They also showed a more conservative gait during obstacle crossing (e.g., took longer to complete a stride during obstacle crossing) and were even more careful when doing a dual-task (e.g., greater trailing toe clearance over the obstacle) while showing some postural instability during dual tasking. These authors suggested that following an mTBI, the ability to control stability during gait is decreased when doing a dual-task.

Persistent problems in combined motor and cognitive functions and the time required to complete functional recovery must be better understood following mTBI. Using a dual task paradigm may help identify subtle functional deficits persisting after an mTBI difficult to detect otherwise. The objective of this paper was to better understand the effects of a sport-related mTBI on navigational behaviour in elite athletes that no longer have symptoms and have apparent normal clinical scores.

### **4.3 Methodology**

The study was approved by the Ethics Committee of the Quebec Rehabilitation Institute (QRI) and all participants signed an informed consent before data collection. A sample of twelve elite athletes were studied in two matched groups of six subjects each, those who sustained their first medically diagnosed sports-related mTBI (4 men, 2 woman; age, 19.7 +/-2.3 y) and those without previous history of mTBI but matched for age and sex (control group; 4 men, 2 woman; age, 20.1 +/- 2.7 y). In addition, all control subjects were matched for the same sports team and position for each subject with mTBI to control for level of expertise (e.g. triple A ice hockey) and ability (e.g. defensemen require high level backward skating skills). All subjects were recruited from different elite contact sport teams of the Quebec City area. Table 1 shows the athletes' characteristics.

Table 1. Participants characteristics

Concussed Athlete	Sex	Age (year)	Matched control	Sex	Age (year)	Sport	Time elapsed before lab testing (days)	Time elapsed before clinical testing (days)	Return-to-Play after injury (days)
MS1	M	18.19	MS3	M	18.07	Ice Hockey	42	42	7
MS2	M	17.56	MS12	M	18.03	Ice Hockey	36	46	7
MS4	F	23.86	MS5	F	24.18	Rugby	34	27	8
MS6	M	19.10	MS11	M	19.79	Ice Hockey	30	28	9
MS7	F	20.56	MS9	F	21.47	Soccer	41	41	11
MS8	M	18.90	MS10	M	18.04	Ice Hockey	41	41	7
	<b>Mean</b>	<b>19.17</b>			<b>19.83</b>		<b>37.33</b>	<b>37.50</b>	<b>8.17</b>
	<b>SD</b>	<b>2.17</b>			<b>2.56</b>		<b>4.80</b>	<b>7.97</b>	<b>1.60</b>

The inclusion criteria included having sustained an mTBI while participating in their elite sport, being older than 16 years and being a registered athlete of a provincial or national sports federation. The exclusion criteria were having sustained more than one medically diagnosed mTBI, taking medication that may affect motor control, having musculoskeletal or neurologic problems or having cognitive or behavioral problems that could interfere with participation in the study; having had a general anesthesia during the three month period prior to study participation, consuming on average more than two servings of alcohol per day (all self-reported).

The study included clinical testing divided in two sessions (1-physiotherapy testing and 2-neuropsychological testing) held on the same day and within 14 days of the laboratory measures. The physiotherapy testing was performed by a licensed physiotherapist of the QRI and included the unipodal test with open and closed eyes,<sup>194</sup> the Balance Error Scoring System,<sup>223</sup> the step test,<sup>195</sup> the dynamic gait index<sup>197</sup> and gait speed measured over 10 meters.<sup>198</sup> Clinical neuropsychological measures of attention and executive function were administered by a neuropsychologist of the QRI and included the Spatial and Digit Span Tests of the Wechsler Memory Scale, 3rd edition,<sup>224</sup> the Brown-Peterson test,<sup>225</sup> the Symbol Digit Modalities Test,<sup>200</sup> the Trail Making Test and the Color-Word Interference Test of the Delis-Kaplan Executive Function System,<sup>201</sup> three sub-tests of the Test of

Everyday Attention (Elevator counting with distraction, Telephone search and Telephone search dual task),<sup>202</sup> two subtests of the California Computerized Assessment Package (Choice Reaction Time for Single Digits and Sequential Reaction Time)<sup>203</sup> and the Paced Auditory Serial Addition Test<sup>226</sup>.

Laboratory measures were taken  $\geq 30$  days after the mTBI. Before the beginning of the experiment, anthropometric measures (e.g., height and weight) were made and subjects completed the lateral preference questionnaires using the Edinburgh Inventory for handedness<sup>227</sup> and the Wai-Hang Footedness Inventory<sup>228</sup>. mTBI symptoms for the mTBI group were assessed using the Keatley Questionnaire Symptom.<sup>229</sup>

In the laboratory, three dimensional kinematic data during walking were tracked at a frequency of 100 Hz with a motion analysis system (Optotrak 3020, NDI, Canada) using triads of non-collinear infrared markers that were fixed on the athletes' feet, trunk and head. Specific anatomical points were also digitized (anterior extremity of the feet; the heads of 5th metatarsal bones; the heels of the feet; the sternal notch; the lateral surface of the humeral heads; and both ears) to estimate the centre of mass (CM) of each individual segment.

The locomotor task consisted of walking along an unobstructed or an obstructed path both with and without a visual interference task. The athletes were asked to walk at a comfortable speed, from a starting location marked on the floor without stopping, until they reached a column located 8.75 m straight-ahead. For static obstacle conditions, the athletes were informed that the obstacle would remain static during the trial and they were instructed as to which side of the obstacle they had to pass (i.e., left or right). For moving obstacle conditions or when no obstacle was present, the athletes had no other instructions than the ones provided initially. Four unobstructed walking trials were initially performed to estimate the athletes' comfortable walking speed. For the obstructed trials, athletes were required to circumvent a cylindrical obstacle made of foam (height of 181 cm, diameter of 43 cm) set on a ceiling mounted rail over the walking path at 4 m from the athletes starting location. When static, the obstacle was set in the middle of the rail giving an equivalent spacing of 2.09 m laterally on either side of the obstacle to allow a symmetric clearance area (see Figure 1).

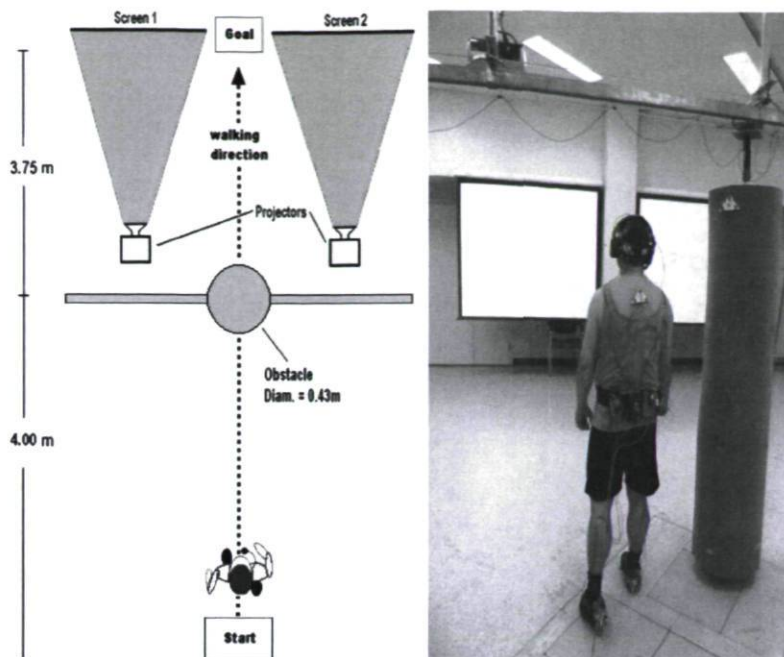


Figure 1. A) Top view of the experimental laboratory set-up and b) picture of a participant performing the task obstacle circumvention and Stroop tasks.

A visual interference task was used on half of the trials and the athletes were informed in advance of its presence or its absence in the trial. The visual interference involved a modified visual Stroop<sup>190</sup> task with the words “red”, “green” and “blue” projected at a rate of 1Hz in different congruent or incongruent colours simultaneously on two screens fixed in front of the athlete at the end of the path on either side of the column. Athletes were required to indicate the colour of the word as fast as possible while ignoring its lexical meaning. The athlete’s verbal responses were recorded (1000 Hz) with a microphone placed in front of the mouth and fixed on headphones that played pink noise (at 80 db) to minimize distraction from ambient sounds in the laboratory. All of the trials were videotaped to identify responses during the performance of the Stroop-word task. Errors were computed as omissions or when the wrong color was named by the athletes.

A baseline for the Stroop-word task was performed prior the beginning of the experiment in a standing position, facing the screen. Two trials of 5 seconds duration each were used to calculate the baseline. The experimental gait conditions were 1) no obstacle, without Stroop, 2) no obstacle, with Stroop, 3) fixed obstacle, passing right, without Stroop, 4) fixed obstacle, passing right with Stroop, 5) fixed obstacle, passing left without Stroop, 6)

fixed obstacle, passing left with Stroop, 7) moving obstacle from left to right, without Stroop, 8) moving obstacle from left to right, with Stroop, 9) moving obstacle from left to right without Stroop and 10) moving obstacle from right to left with Stroop. Another condition with the obstacle moving and stopping in the middle of the path was used as a catch trial to keep the uncertainty of the moving obstacle tasks. This condition was not kept for analysis. Five trials of each condition were performed in a random order for a total of 70 trials per athlete.

The kinematic data were interpolated and then low-pass filtered at 6 Hz with a 4<sup>th</sup> order zero-lag Butterworth filter. Response reaction times to the Stroop task during gait were calculated from the time difference between the stimulus onset and the onset of the verbal response. These reaction times were then converted to a dual task cost (DTC) by subtracting out the response reaction times while standing at the beginning of the session. Dependent variables that were kept for analyses were DTC, response errors, average gait speed (with the acceleration of the first two steps removed), maximal gait speed, point of path deviation, variability of the maximal gait speed and the point of path deviation and dynamic clearance (minimal distance of the CM from the obstacle during the whole circumvention from the start to the crossing point). The data were calculated from the starting location to the crossing point of the obstacle. For the no obstacle conditions, the variables were processed until the point where the obstacle usually obstructed the walking path.

Statistical analyses were performed with SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL). Means for each dependent variable across trials were calculated for each athlete using custom Matlab programs to be used for statistical analyses. Nonparametric statistical tests were used to find significant differences across groups (Mann-Whitney) and main effects within groups (Friedmann). Post-hoc analysis for significant within-group findings was done with the Wilcoxon test. The significance level was set to 0.05.

#### **4.4 Results**

The athletes who sustained an mTBI did not present with any post-concussion symptoms (e.g., headache, dizziness, tinnitus, vision trouble, etc.) at the time of the study nor did score differently on the Keatley symptoms questionnaire ( $p=0.589$ ) from the athletes of the control group. There were no statistically significant differences between the experimental



and control groups for all motor function and neuropsychological tests (see Table 2 for all p-values).

*Table 2. Neuropsychological and physiotherapy testing and p-values*

NEUROPSYCHOLOGICAL TESTING					
	TEST	p-value		TEST	p-value
1)	Empan_num	p=0.518	15)	TMT2	p=0.419
2)	Empan_spat	p=0.871	16)	TMT3	p=0.687
3)	SDMT	p=0.575	17)	TMT4	p=0.873
4)	Stroop_1	p=0.935	18)	TMT5	p=0.102
5)	Stroop_2	p=0.935	19)	CalCAP_1_TR	p=0.262
6)	Stroop_3	p=0.422	20)	CalCAP_1_true_pos	p=1.000
7)	Stroop_4	p=0.149	21)	CalCAP_1_fals_pos	p=1.000
8)	Stroop_Laptop	p=1.000	22)	CalCAP_2_TR	p=0.631
9)	BP	p=0.520	23)	CalCAP_2_true_pos	p=0.604
10)	TEA3	p=0.514	24)	CalCAP_2_fals_pos	p=0.863
11)	TEA6	p=0.810	25)	PASAT_2_4	p=0.574
12)	TEA7	p=0.873	26)	PASAT_2	p=0.748
13)	TEA_dual_task_dec	p=0.873	27)	PASAT_1_6	p=0.872
14)	TMT1	p=0.251	28)	PASAT_1_2	p=0.092

PHYSIOTHERAPY TESTING		
	TEST	p-value
1)	UNIPODAL	
	Eyes Open L	p=1.000
	Eyes Open R	p=1.000
	Eyes Closed L	p=0.673
	Eyes closed R	p=0.521
2)	BESS	p=0.589
3)	STEP TEST	
	Eyes Open L	p=0.310
	Eyes Open R	p=0.394
	Eyes Closed L	p=0.394
	Eyes closed R	p=0.180
4)	DYNAMIC GAIT INDEX	p=0.589
5)	GAIT SPEED (10m)	p=0.937
6)	SYMPTOM QUESTIONNAIRE	p=0.589

There was a significant difference between groups for DTC ( $p < 0.001$ ) showing higher DTC in the mTBI group compared to the control group (Figure 2). Post-hoc analyses showed that the athletes with mTBI had higher DTC than the control group for circumvention to both

left ( $p=0.010$ ) and right sides ( $p=0.014$ ) as well as for both the fixed ( $p=0.017$ ) and the moving ( $p=.014$ ) obstacle conditions.

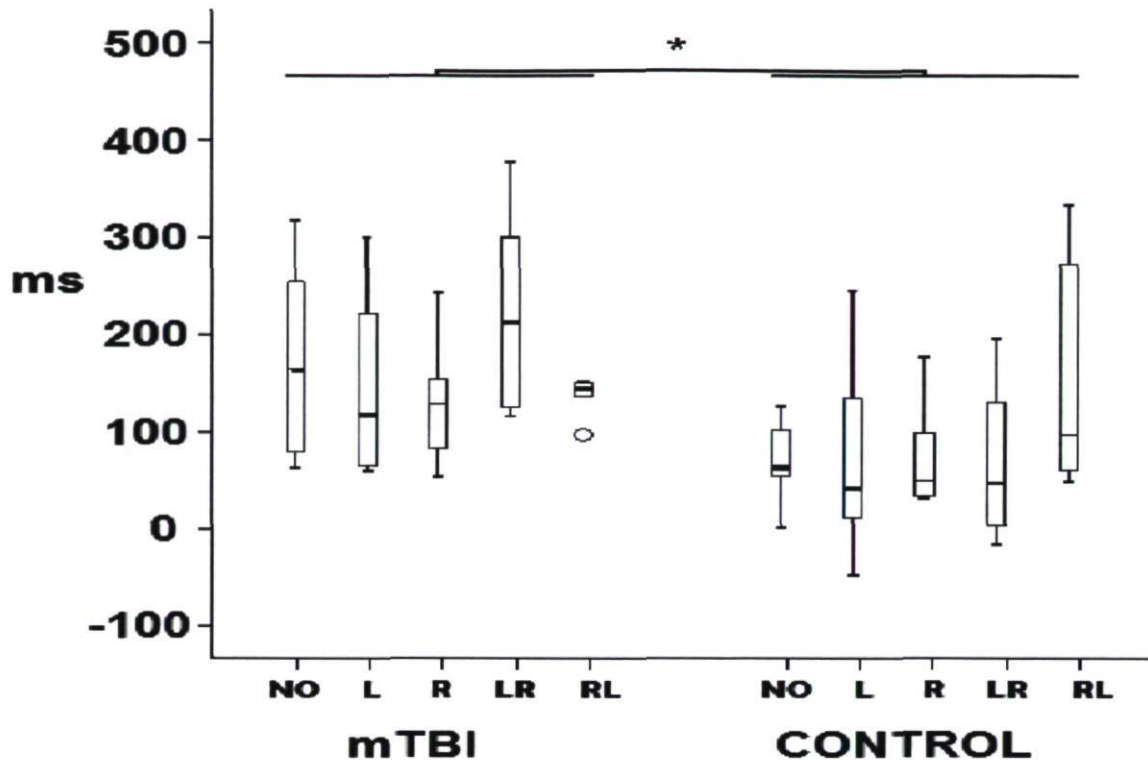


Figure 2. Box plots of the dual task costs across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p<0.05$ ).

The mTBI group made more errors on the Stroop task overall than the control group ( $p=0.009$ ) with a total of 15 errors compared to 5 for the control group (Figure 3). When looking at each condition separately, no statistical differences were found between groups.

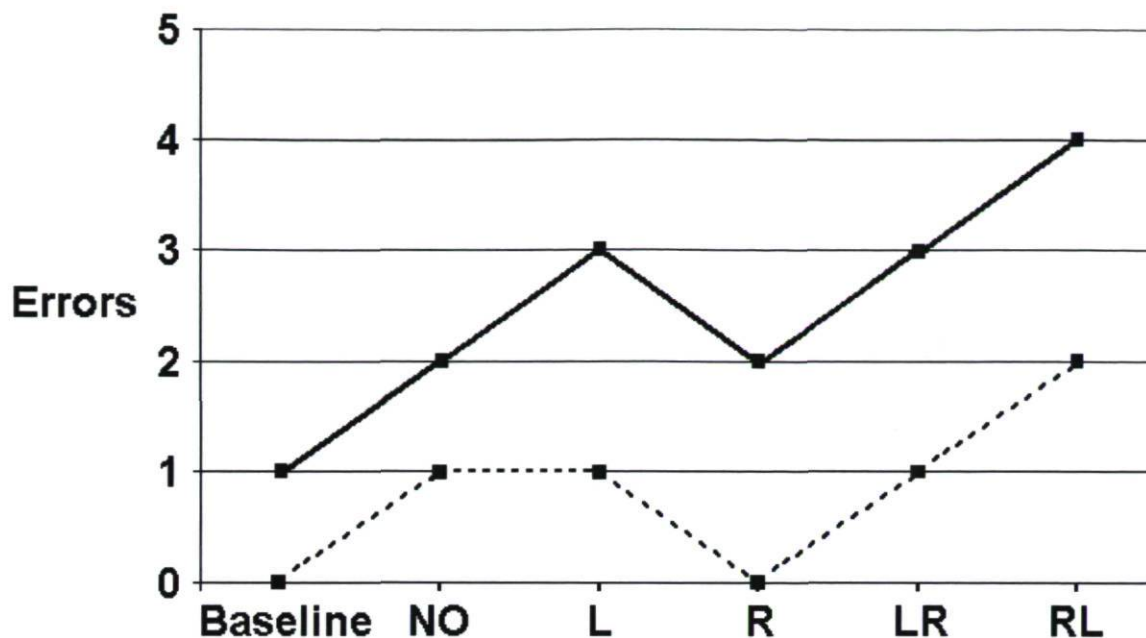


Figure 3. Number of errors committed on the Stroop-word task for the mTBI (solid line) and Control (dashed line) groups across the conditions of baseline, no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL).

The mTBI group showed larger minimal clearances from the obstacle ( $p < 0.001$ ) when compared to the control group (Figure 4). The minimal clearance was larger for the mTBI group for both sides of circumvention (left,  $p = 0.011$ , right  $p < 0.001$ ), but both groups showed smaller minimal clearance of the obstacle on the left side than on the right side ( $p < 0.001$ ) for all conditions. When looking specifically at fixed and moving obstacle conditions, however, no statistically significant differences were found between groups for the fixed obstacle conditions ( $p = .112$ ), but the minimal clearance was larger in the mTBI group for the moving obstacle conditions ( $p < 0.001$ ).

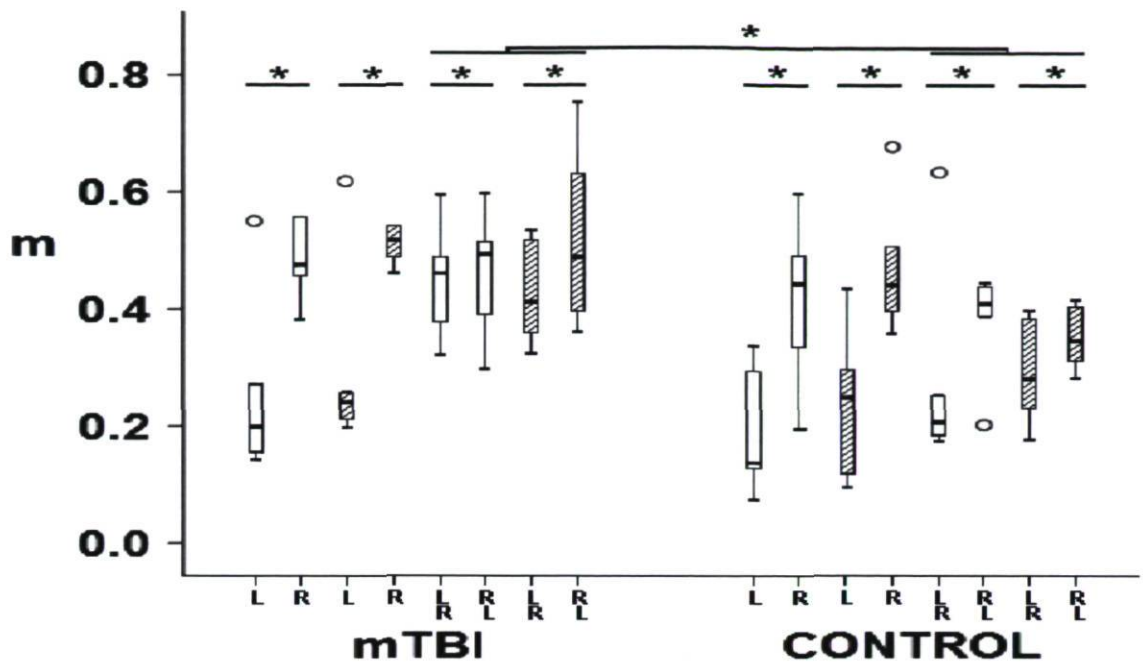


Figure 4. Box plots of minimal clearance for each group across conditions of left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

The overall data (Figure 5) showed that the average gait speed for athletes with mTBI was not different than for the control group ( $p = 0.815$ ). For both groups, the average gait speed was decreased when an interference Stroop task was added (mTBI group  $p < 0.001$ , control group  $p = 0.004$ ) as well as when the obstacle was moving comparing to fixed (mTBI group  $p = 0.049$ , control group  $p = 0.004$ ). Yet, both groups showed no differences in average gait speed for the side of circumvention (mTBI group  $p = 0.475$ , control group  $p = 0.166$ ).

The variability of average gait speed for the athletes with mTBI was significantly larger than for the control group ( $p = 0.024$ ; Figure 6). When looking across conditions, the mTBI group showed a larger variability in gait speed specifically for the Stroop conditions ( $p < 0.001$ ) and fixed obstacle conditions ( $p = 0.005$ ). When looking at each group, the variability in the mTBI group for the average gait speed across all conditions was not statistically different ( $p = 0.142$ ). For the control group, it was statistically significant ( $p = 0.021$ ) across all conditions. Further analyses showed that the variability was smaller

with no visual interference ( $p=0.014$ ) compared to when it was present, and was smaller for fixed obstacles compared to moving obstacles ( $p=0.028$ ). However, when looking at the side of circumvention, no statistically significant differences were found ( $p=0.137$ ).

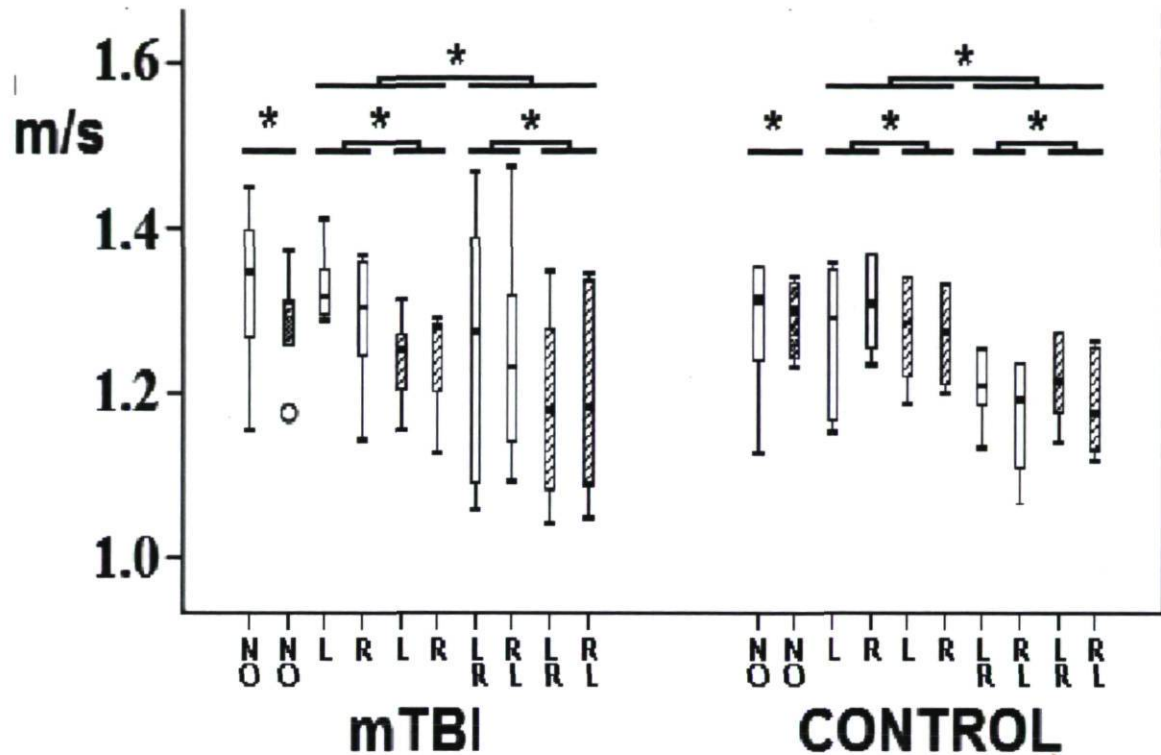


Figure 5. Box plots of average gait speed for each group across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

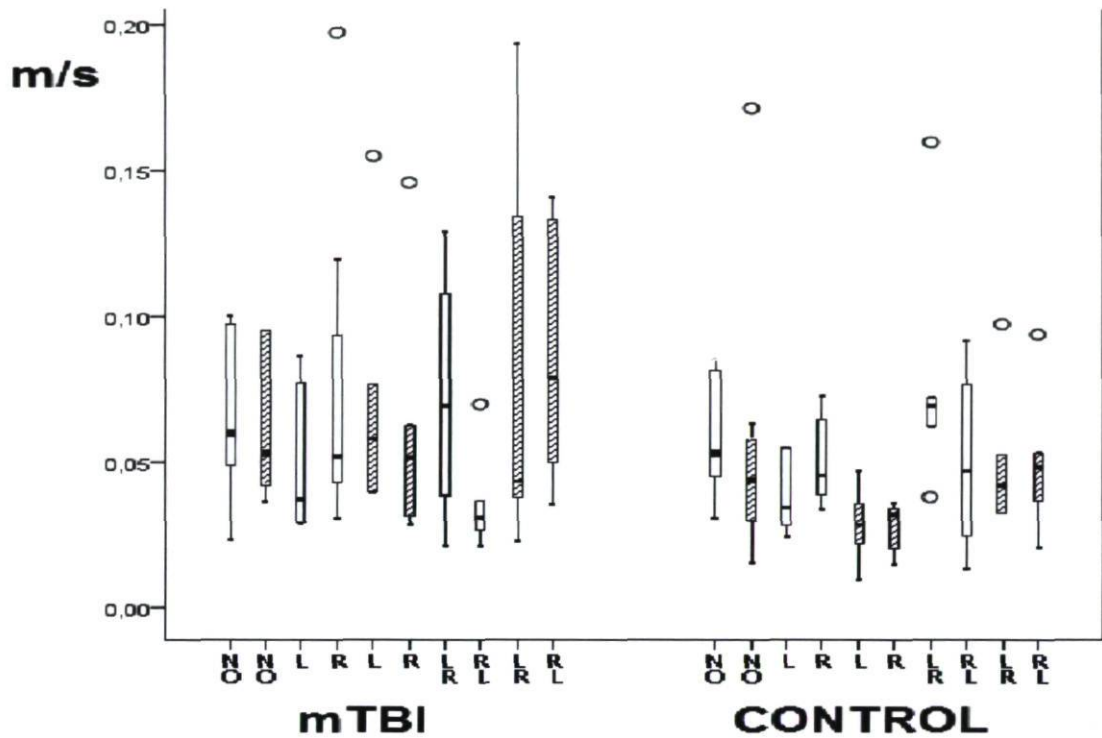


Figure 6. Box plots of intra-subject variability of average gait speed for each group across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

The overall data (Figure 7) show that there were no significant differences between groups for the maximal gait speed ( $p = 0.551$ ). When looking specifically at each group, for the control group, no differences were found across all conditions ( $p = 0.408$ ), but in the mTBI group, there were differences in maximal gait speed across all conditions ( $p = 0.026$ ). There was also a statistically significant decrease in maximal approach gait speed for the mTBI group when the obstacle was moving ( $p = 0.035$ ) as compared to static and for the Stroop interference task which was slower than when no Stroop interference was present ( $p < 0.001$ ).

No significant differences were found in the variability of the maximal gait speed (Figure 7) between groups ( $p = 0.162$ ). When looking specifically at each group, no statistical differences were found across all conditions for maximal gait speed (mTBI group,  $p = 0.149$ , control group,  $p = 0.237$ ).

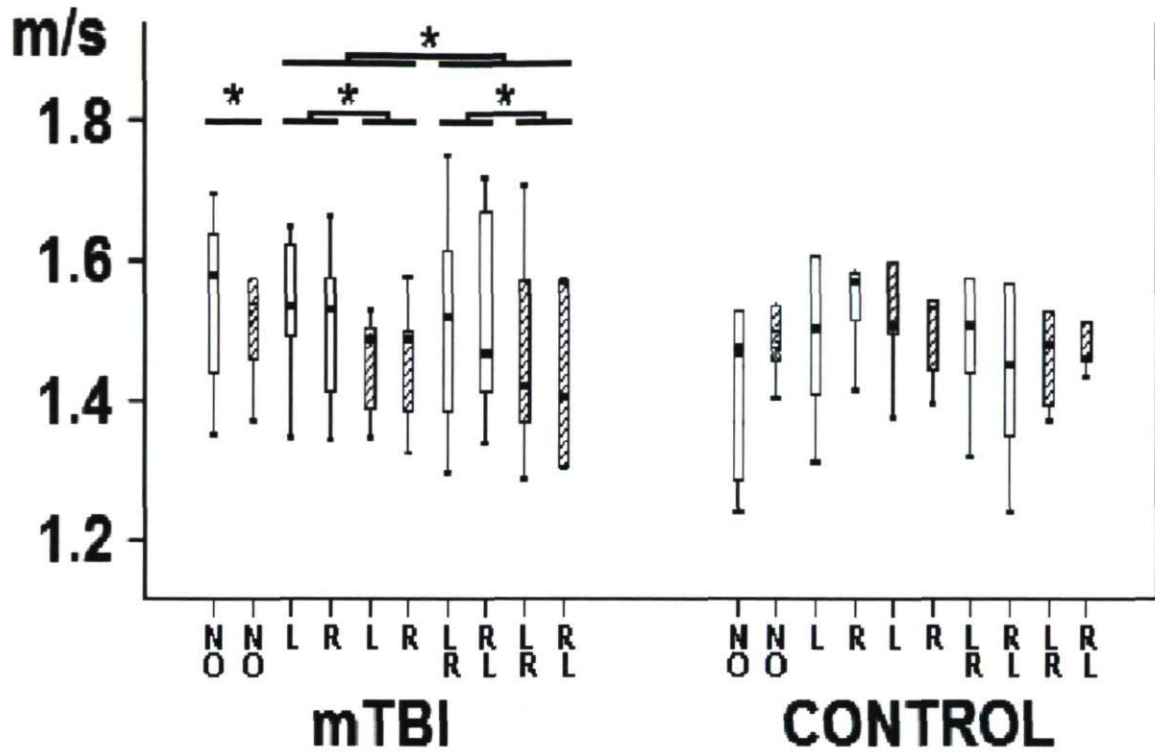


Figure 7. Box plots of maximal gait speed across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

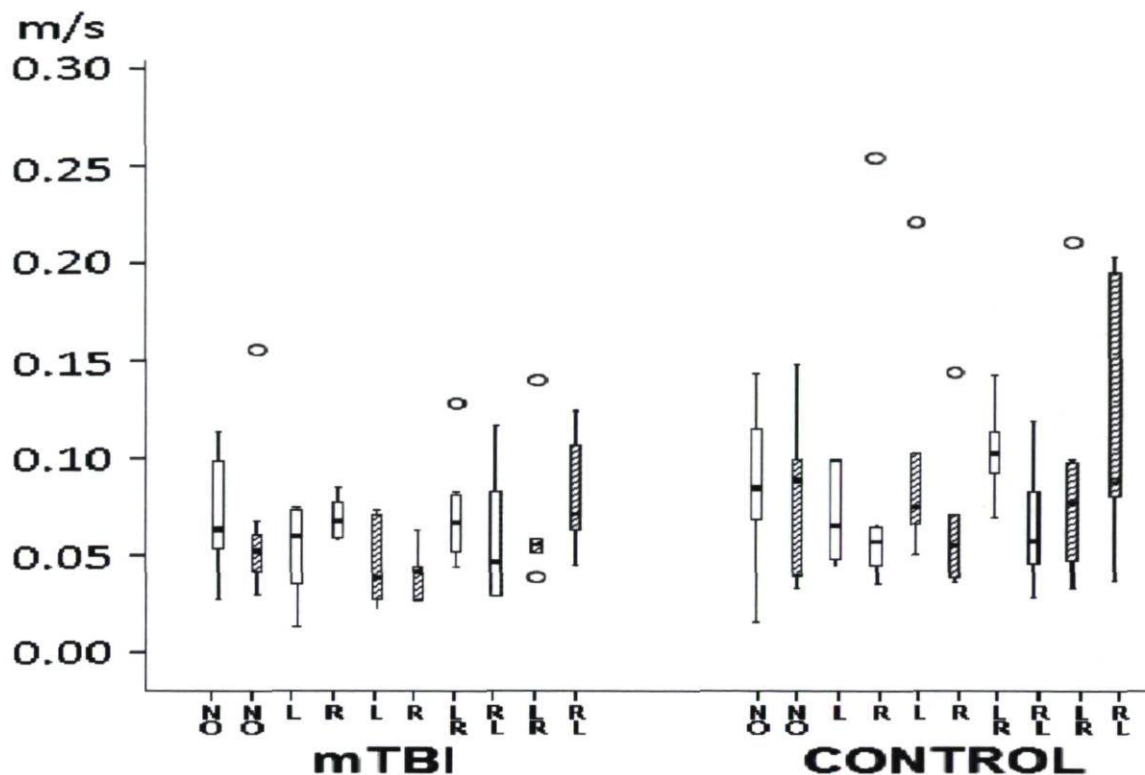


Figure 8. Box plots of intra-subject variability of maximal gait speed across conditions of no obstacle (NO), left (L) and right (R) circumvention of the static obstacle and circumvention of the obstacle moving from left to right (LR) or right to left (RL). Conditions without the Stroop task are indicated by solid boxes while those with the Stroop task are in hashed boxes. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

There was no difference between the mTBI and the control groups on the overall data ( $p=0.473$ ) for their point of path deviation (Figure 9a). When looking at each group separately, it was found that both groups had a significantly earlier point of deviation when the obstacle was fixed ( $p < 0.001$  for both groups). No other intra-group differences were found for the visual Stroop interference tasks (mTBI group:  $p=0.265$ ; control group:  $p=0.278$ ) or across sides of circumvention (mTBI group:  $p=0.081$ ; control group:  $p=0.066$ ).

The mTBI group showed a larger variability of the point of path deviation across all conditions ( $p=0.004$ ) compared to the control group (see Figure 9b). More specifically, although there was no significant difference between the groups when no interference task was present ( $p=0.076$ ), there was a larger variability in the mTBI group than for the control group ( $p=0.043$ ) for the interference conditions. When looking at fixed versus moving obstacle conditions, no differences were found between the groups for the fixed obstacle



conditions ( $p=0.095$ ) but there was a larger variability for the mTBI group when in the presence of moving obstacles ( $p=0.017$ ). When looking at each group specifically, no intra-group statistically significant differences were found for any of the conditions.

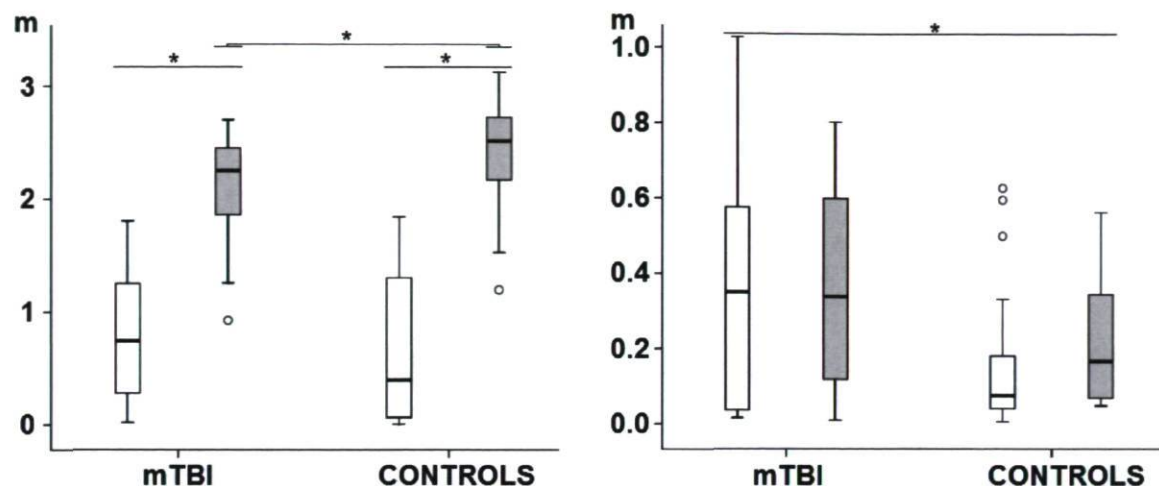


Figure 9. Box plots of a) point of path deviation; b) intra-subject variability in point of path deviation for each group for fixed (white boxes) and moving (grey boxes) obstacles. Horizontal lines with asterisks indicate statistically significant differences between conditions ( $p < 0.05$ ).

#### 4.5 Discussion

Despite its classification as “mild”, mTBI can cause significant attention and information processing impairments.<sup>187</sup> However, post-concussion symptoms usually resolve within 7-10 days and in the apparent absence of any neurological or neuropsychological problems, persons who sustain an mTBI return to their previous activities, including contact sports. In this study, athletes who sustained an mTBI were symptom-free and their clinical test results (motor function and neuropsychology) were no different from athletes in the control group at time of testing. In addition, these athletes were returned to play their sport according to the Zurich return-to-play consensus for concussion in sport.<sup>62</sup> However, alterations in performance as measured by the locomotor navigation tasks used in this study were observed for athletes who sustained an mTBI more than 30 days prior to data collection. These concussed athletes (as compared to non concussed athletes) showed higher dual task costs (DTC), made more errors in the response to the interference task, had larger obstacle clearance distances, had greater variability in average gait speed, had more variability in their point of path deviation and showed changes of maximal gait speed across conditions.

The results for DTC disagree with those of Collie et al<sup>217</sup> who found no significant changes in reaction time for concussed athletes who were asymptomatic 10 days following their injury. On the other hand, Halterman et al<sup>187</sup> found greater reaction time differences up to one month following mTBI for executive and orienting components of a visuo-spatial attention task, but didn't show any effect on response errors. Other studies have also shown longer reaction times between individuals with mTBI and control subjects.<sup>230,231</sup> Although different tasks and modes of response were used in the studies cited above compared to the present study, we were able to demonstrate a locomotion navigation task conducted in complex environments appears to put more difficult (but realistic) demands on executive function (e.g. planning, attention). Navigating around a moving obstacle while performing a concurrent dual task greatly adds to the attention and planning demands compared to walking unobstructed without a dual-task or even the circumvention of a fixed obstacle.

It is interesting that locomotor navigational variables were also altered in these more complex environments for athletes who sustained an mTBI. Although they showed no differences in their average gait speed when compared with the control group, they still showed greater variability. This suggests that control of gait speed could be altered for athletes following 30 days post mTBI. Also, during the approach to the obstacle, these same athletes didn't show maximal gait speed differences when compared with the control group. However, when looking within groups, it was observed that differences were found across conditions only for the athletes with mTBI. For example, a decrease in maximal gait speed was noted when adding difficulty to the task (for example adding the Stroop interference task or passing from a fixed to a mobile obstacle). This is in line with previous studies that showed decreases in gait speed after an mTBI.<sup>222</sup> Concussed participants may have decreased their gait speed to maintain dynamic postural control because their attentional system required more resources following the mTBI to prevent entering in contact with the obstacle. The fact that maximal gait speed was not different between the two groups demonstrates how subtle mTBI deficits can be in highly functional elite athletes. As noted above, individuals who have recently suffered an mTBI may have difficulty processing two tasks at the same time, especially when the combined tasks are more complex. This could explain why the minimal clearance for the fixed obstacle conditions were not different between groups, but when having to deal with a moving

obstacle, the concussed athletes increased their minimal clearance creating a safer clearance margin compared to the control group.

However, it appears that executive function deficits, in particular planning, are also evident in these elite athletes following their first documented mTBI. Even though there was no difference between the mTBI group and the control group for their point of path deviation, the mTBI group still showed a larger variability across all conditions. In particular, it is interesting to note that, without visual interference or when the obstacle was fixed, no differences were observed between groups. However, athletes who sustained an mTBI showed greater variability in the tasks adding a visual interference task or a moving obstacle. This is probably due by the increased demand on executive functioning when increasing the complexity of the task. This was specifically observed in the minimal clearance data where no differences were seen when the obstacle was fixed, but when the obstacle was moving, concussed athletes showed larger clearances with the obstacle. This might be interpreted as indicating a residual planning problem related to the mTBI. Both clearance and path deviation planning are crucial in sports to avoid opponents and especially important to avoid recurring injuries.

Overall, the present observed alterations in performance of such complex navigation tasks appear to suggest longer-term alterations of planning and attention due to a first documented mTBI. It is possible that such persisting altered behaviour may be a factor related to future injury and should be considered in return-to-play decision protocols. Other studies have shown that even in the absence of neuropsychological abnormalities 12 months post-injury in individuals who have sustained an mTBI, long-term oculomotor and visuomotor function deficits can be detected.<sup>232,233</sup> Their results indicate that multiple sensori-motor systems can be impaired following an mTBI and that this can occur independent of neuropsychological impairment. However, all the individuals in these previous studies showed elevated levels of post-concussion symptoms which was not the case in the current study.

The results of the present work are also in line with a previous published case study<sup>170</sup> of an elite athlete from the same control group used in the current study who experienced an mTBI seven months after initially participating in the current study. Once he suffered a

concussion, laboratory measures were taken again seven days as well as 30 days post-mTBI and compared to his own baseline measures taken before he sustained an mTBI. DTCs increased at 7 days post-injury but came back to baseline values at 30 days. In the present paper, DTCs were still higher in the mTBI compared to the control group. Concerning response errors, both the case study and the present study showed that even after 30 days following an mTBI, the athletes made significantly more errors than for the data collected in the absence of mTBI. However, the athlete in the case study showed smaller minimal obstacle clearances both at 7 and 30 days post-mTBI. This is the opposite of the current findings where clearances were larger in the mTBI group compared to the control. This could be due to a learning effect for the case study participant, since he went through the experiment three times, compared to the current study where the participants participated only once in the laboratory testing.

The similarities between the results of the present cohort comparisons and the within subject pre-post mTBI case study suggest that a similar protocol for evaluating the integrated motor and cognitive state of persons with an mTBI before returning back to their daily activities should be developed. Even without more sophisticated tools to evaluate patients, a combination of various assessment methods and tools should be used by clinicians to assist in decision making about return to activities and to decrease the risk of a recurrent mTBI.<sup>208,62</sup> A slower recovery timeline and an increased risk of future harm could also be related to some neuronal vulnerability following recurrent mTBI injuries.<sup>215</sup> It has also been suggested that the notion of transient and rapid symptoms resolution is usually not indicative of injury resolution.<sup>234</sup> The clinician might think that the individual has returned to a pre-mTBI state while the brain injury could be still present.<sup>235</sup> The present work shows that the residual deficits of mTBI are more clearly revealed when attention is divided in an ecologically valid and demanding task. Such deficits may not actually be detected otherwise by using more conventional assessment tools. The results of this study, therefore, may have clinical implications for athletes who might otherwise be returned to play too early, based on conventional evaluation of symptom resolution, acceptable neuropsychological and motor function testing. Such early return to function, in particular for contact sports, may increase the risk for future musculoskeletal injury and subsequent brain injury.

#### **4.6 Limitations of the study**

Because there were only 12 participants, further work with more subjects should be done to confirm these results. The study did not have baseline measures for the athletes before the mTBI occurred, however, it was controlled well for age and gender as well as team expertise level and playing position.

#### **4.7 Conclusion**

Despite similar results on traditional measures of neuropsychological and motor function testing between concussed and non concussed athletes, those who sustained their first diagnosed mTBI still showed significant differences in both dual tasks during locomotor navigation. In general, these results showed altered locomotor capacity post-mTBI in ecologically valid environments challenging planning and division of attention. These results support previous data from a case study<sup>170</sup> assessing an elite athlete one month post-mTBI. The study also provides further evidence that the laboratory testing protocol used in this study is sensitive and should be explored with other patient populations with cognitive impairments (Mild Cognitive Impairment, moderate or severe TBI, stroke patients, etc.).

Finally, these results underscore the importance of proper management of sport-related mTBI. The methods used here can provide clinicians with information to allow them to make better decisions about returning athletes back to their sport in a safe manner. To date, it is virtually impossible to predict which athletes are at risk for future mTBI based on pre-season baseline assessment and symptom resolution following a first mTBI. The present study begins to provide evidence that will be important to guide return to pre-mTBI function involving locomotor behaviour.

#### **4.8 Acknowledgments**

We would like to thank Guy St-Vincent for his technical assistance, Eric Huard and Janick Bisson for their consultation and development of the Stroop presentation program and the TBI unit of the IRDPQ. This study was partially funded by the Canadian Institutes of Health Research and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (BJ McFadyen).

## CHAPITRE 5 – ÉTUDE III

Alterations to locomotor navigation in a complex environment at 7 and 30 days following a concussion in an elite athlete

### 5.1 Résumé en français

Des analyses de la marche et des mesures neuropsychologiques clinique ont été prises avant et à 7 et 30 jours après un TCCL chez un athlète de 18 ans jouant au hockey junior masculin. La tâche consistait à marcher le long d'un parcours libre ou entravé, avec ou sans une tâche visuelle d'interférence (Stroop-mot). Les mesures comprenaient les coûts de la division d'attention (*dual task costs*), les erreurs aux réponses, la vitesse maximale de marche, et la marge de dégagement minimale avec l'obstacle. Bien que l'athlète ait été sans symptôme et que les résultats des tests neuropsychologiques étaient de retour aux valeurs de base assez rapidement, il a démontré des erreurs à la tâche d'interférence visuelle, a présenté des marges de dégagement minimales avec les obstacles anormalement petites, ainsi qu'une diminution de la vitesse de marche maximale, 30 jours après le TCCL.

### 5.2 Introduction

The incidence of reported sport-related concussions has been growing over the past 25 years and is still rising.<sup>236</sup> The Centers for Disease Control and Prevention estimate that in the USA alone, 50 000 to 300 000 athletes of all ages from contact sports sustain a concussion during the course of a single sporting season.<sup>237</sup> Following the recent summary and agreement statement of Prague,<sup>238</sup> sports concussions are now subdivided into two main categories. These include (I) Simple concussion and (II) Complex concussion, the first representing the most common form in sports.

Some studies on sport concussions have concluded that athletes who sustain a simple concussion need no further intervention during the recovery period, apart from limiting training or sport-specific physical activities while still symptomatic, and that usually the athlete typically resumes playing without further apparent problem.<sup>214</sup> It has been reported, that on average 70% of collegiate and high school football athletes who sustained a concussion returned to the game following only 4 days of rest.<sup>239</sup> Yet, there is literature suggesting that a minimum waiting period of 7 days could decrease the risk of recurrent

concussion.<sup>215,211</sup> In addition, repeat concussion in the same season typically happens within 7 to 10 days after the first concussion.<sup>215</sup> It is known that concussions have a significant effect on reaction time, information processing, and memory.<sup>216,218,217</sup> However, neuropsychological measures generally return to baseline within 5 to 7 days after the concussion.<sup>209,211,219</sup>

While many neuropsychological tests have been developed to assess cognitive performance following concussions in athletes,<sup>240</sup> very little research has been done regarding the assessment of dynamic motor task performance. Research studying postural changes after concussion has mainly looked at postural sway during quiet stance and with altered sensory inputs during standing.<sup>158,166,161,164</sup> It has also been reported<sup>221</sup> that there is no relationship between symptoms, performance on tests of cognitive function and static postural stability. These data suggest, therefore, that recovery of motor and cognitive functions following concussion do not necessarily evolve over the same timeframe.

Not much attention has been given to gait assessment following traumatic brain injuries (TBI) either. Some work has shown that persons with moderate to severe TBI with normal neurological and physical examinations still walked with increased caution and showed a significantly slower walking speed than control subjects.<sup>119,142,141</sup> In a recent study,<sup>119</sup> it was found that despite good locomotor recovery, with respect to normal level walking speeds and the ability to avoid obstacles, subjects with moderate or severe TBI showed residual deficits in relation to greater difficulties in dealing with environments that challenge their simultaneous locomotor and attention abilities when a visual interference task was introduced during obstacle avoidance. Only recent work has considered such obstacle avoidance and attention following concussion showing that concussed athletes present a reduced postural stability during gait with divided attention, as compared to healthy subjects.<sup>222,156</sup> The use of such dual tasks may help identify functional deficits that persist following concussion, but may be difficult to detect otherwise.

Given the recent relative increase in the reporting of sports concussions, specific challenges to the recovery of function and the time course needed for functional recovery must be better understood. The following case report illustrates such issues and highlights the

importance of a comprehensive clinical and functional investigation for the evaluation of sport concussion.

### **5.3 Case Report**

An 18 year old junior hockey player with right upper and lower extremity dominance was originally recruited as a non-concussed control subject for another study. He later suffered a concussion after colliding with an opposing player while trying to get a loose puck along the boards during a regular season hockey game. The player was playing at the most elite level in Canada for junior hockey in a league providing recruitment for professional hockey. He fell on the ice and then arose slowly and started skating towards his team bench, appearing dazed. He was brought to the medical room by the team athletic therapist for evaluation. He complained of a headache and dizziness, but didn't present any tinnitus, nausea or visual problems. He was well oriented to person, place, and time, but was unable to recall the current score or the period they were in.

Symptoms abated after 20 minutes, but the medical team decided not to let him return to play and agreed to follow the team protocol for the management and grading of concussions in accordance with the summary and agreement statement of Prague.<sup>238</sup> According to this classification system, the player was deemed to have sustained a 'simple' concussion. According to the Prague protocol, on the first day the athlete is to rest for 24 hours and must not show any symptoms before moving onto the next step. Thus, the second day, the athlete rested, and the symptoms diminished over the next 24 hours. The third day he started very light physical activity under medical supervision, still showing no symptoms. On day four, he participated in an intense off-ice physical activity training program. Immediately after the training, he still reported no symptoms and the following day, he took part in an on-ice training session with his teammates, but without contact with other players. Since he was still asymptomatic, he was cleared the next day, which was 7 days after he sustained the concussion, to take part in full practices with his teammates. He was then cleared for return-to-play since he still reported no medical symptoms. He played for the first time two days later (day 9 following the concussion).

Thus, we had a unique opportunity to use a rare set of data to probe persistent concussion effects in locomotor behaviour and open the discussion on the sensitivity of current return-to-play protocols.



## 5.4 Objectives

The objective of this case report is to better understand the persisting effects of concussion on navigational behaviour by comparing separate and combined locomotor and cognitive capacities during unobstructed walking and the circumvention of a fixed obstacle with and without a simultaneous visual task in this elite athlete before and at two periods after the concussion.

## 5.5 Methodology

This study was part of a larger project approved by the Ethics Committee of the Quebec Rehabilitation Institute and the subject signed informed consent before data collection.

Laboratory gait measures were taken before and at 7 and 30 days after the concussion. Clinical neuropsychological measures of attention and executive function were taken before and only at 14 days after the concussion to provide a single post-concussion measure to limit potential learning effects. These neuropsychological measures were administered by a neuropsychologist and included the Spatial and Digit Span Tests of the WMS-III,<sup>199</sup> the Brown-Peterson test,<sup>225</sup> the Symbol Digit Modalities Test,<sup>200</sup> a visual Stroop task,<sup>190</sup> the Delis-Kaplan Executive Function System Trail making Test,<sup>201</sup> the Test of Everyday Attention,<sup>202</sup> the California Computerized Assessment Package,<sup>203</sup> The Paced Auditory Serial Addition Test,<sup>241</sup> and the Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence.<sup>224</sup>

Other measures included subject anthropometrics (e.g., height and mass) and lateral preference questionnaires using the Edinburgh Inventory for handedness<sup>227</sup> and the Wai-Hang Footedness Inventory.<sup>228</sup> Symptoms of the athlete were also assessed by the Keatley Questionnaire Symptom.<sup>229</sup>

In the laboratory, three dimensional kinematic data during walking were tracked at a frequency of 100 Hz with a motion analysis system (Optotrak 3020, NDI, Canada) using triads of non-colinear infrared markers that were fixed on the subject's feet, trunk and head. Specific anatomical points were also digitized (the front of the feet, the heads of 5th metatarsal bones and the heels of the feet; the sternal notch; the lateral surface of the humeral heads; both ears) to estimate the centre of mass (CM) of each individual segment.

The locomotor task consisted of walking along an unobstructed or an obstructed path both with and without a visual interference task. The athlete was asked to walk at a comfortable speed, without stopping, from a starting location marked on the floor up to a column located 8.75 m straight-ahead, and to circumvent a cylindrical obstacle made of foam (height of 181 cm, diameter of 43 cm) when it was set within the walking path at 4 m from the subject's starting location. An equivalent spacing of 2.09 m was provided on either side of the obstacle to allow a symmetric clearance area (see figure 1).

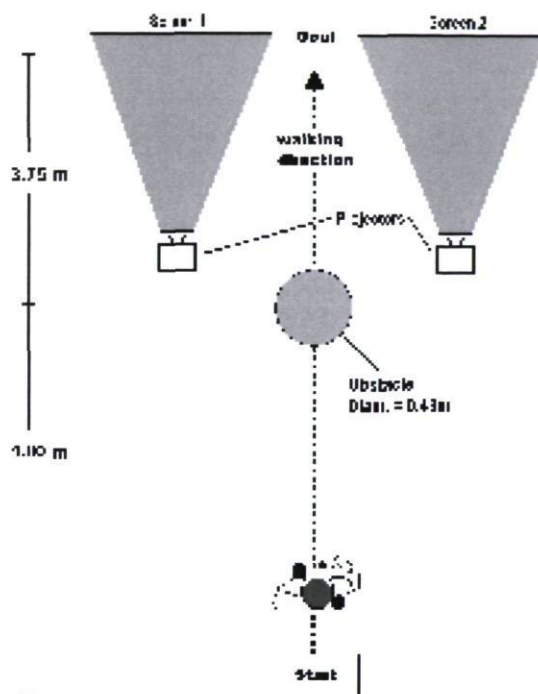


Figure 1. Set-up of the laboratory

The visual interference task was used on half of the trials and the subject was informed in advance of its presence in the trial. The visual interference involved a visual Stroop<sup>190</sup> task with the words “red”, “green” and “blue” projected at a rate of 1Hz in different congruent or incongruent colours on two screens fixed in front of the participant at the end of the path and requiring the subject to indicate the colour of the word while ignoring its meaning. The athlete’s verbal responses were recorded with a microphone placed in front of the mouth and fixed on headphones that played pink noise to minimize distraction from ambient sounds in the laboratory. All of the trials were videotaped to identify any errors during the performance of the Stroop task. Response reaction times to the Stroop task during gait were

converted to a dual task cost (DTC) by subtracting out the response reaction times while standing at the beginning of each session (baseline, Day 7 and day 30).

Four unobstructed walking trials were initially performed to estimate the athlete's comfortable walking speed. For the obstructed trials, the athlete was informed that the obstacle would always be static during the trial and he was instructed as to which side of the obstacle to target (i.e., left or right). Five trials of each experimental condition were performed in random order.

The kinematic data were interpolated and then low-pass filtered at 6 Hz with a 2nd order double-pass Butterworth filter. An average of each dependent variable was calculated using custom Matlab programs across trials for each subject to be used for statistical analyses. Dependent variables that were kept for analyses were DTC, maximal gait speed (average speed of the estimated body CM between consecutive same foot contacts), and clearance (minimal distance of the CM from the obstacle during the whole circumvention).

Nonparametric statistical tests were used to find main effects across days (Kruskal-Wallis) and post-hoc analysis was done with the Wilcoxon test, comparing each condition together. The significance level was set to 0.05.

## **5.6 Results**

The athlete did not have any medical symptoms (e.g., headache, dizziness, tinnitus, etc) on day 7 or on day 30. His neuropsychological testing results returned to baseline values at day 14.

### **5.6.1 Dual Task Costs**

There was a main effect for concussion ( $p < 0.001$ ) showing higher DTC after concussion (Figure 2a). Post-hoc analyses showed that DTCs were higher at 7 days following the concussion ( $p < 0.001$ ) but returned slightly below baseline values ( $p = 0.038$ ) at 30 days.

When looking at side of avoidance, the athlete's DTCs were lower during left than right circumventions ( $p = 0.001$ ), but the same general trend was found for concussion effects such that DTCs at 7 days following concussion were higher for left ( $p < 0.001$ ) and right ( $p = 0.033$ ) sides. At 30 days, however, there was a statistically significant difference with

baseline values for the left side ( $p=0.016$ ) only. In addition, negative DTCs, indicating faster performance for walking than standing, were found for the left side before concussion and again 30 days later.

### 5.6.2 Errors

The athlete made no errors in the Stroop task at baseline or for any unobstructed condition (figure 2b). However, when involved in simultaneous obstacle avoidance, the athlete made 5 errors in the Stroop task at day 7. Even when the DTCs returned to baseline levels on day 30, the athlete made 4 errors in the Stroop task. More errors were made during left than right crossings.

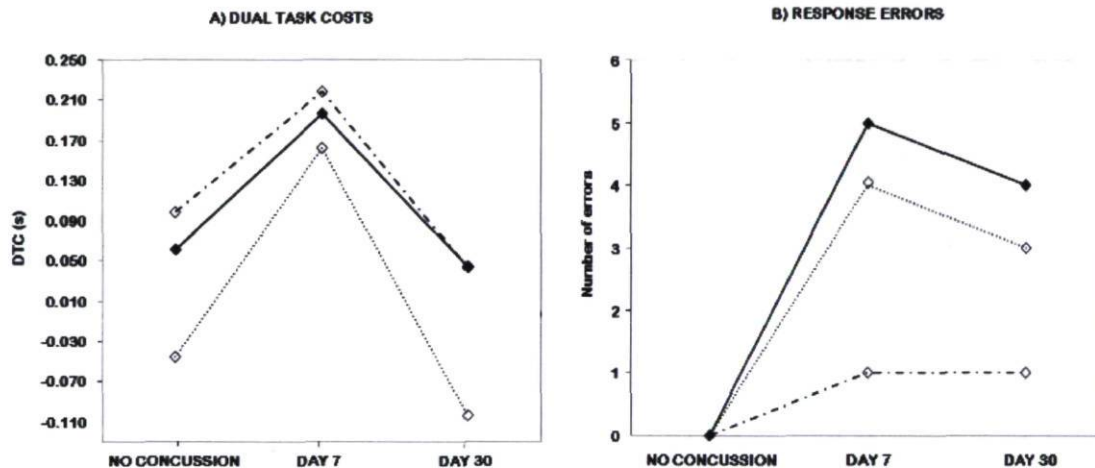


Figure 2. Athlete responses related to (a) dual task costs and (b) response errors for no obstacle (solid line), left circumvention (dotted line) and right circumvention (dash and dotted line).

### 5.6.3 Minimal clearance

All minimal clearance data are presented in figure 3a across concussion states (baseline, 7 and 30 days after) for separate conditions of side of clearance and presence of simultaneous Stroop task. Overall, before considering specific conditions, there was a main effect for concussion ( $p=0.027$ ) showing closer clearances after concussion. Post-hoc analyses showed that minimum clearance was closer for both 7 days ( $p=0.001$ ) and 30 days ( $p<0.001$ ) following concussion as compared to baseline, but that the athlete passed with similar minimal clearances for the two post-concussion periods.

For all conditions, the minimal clearance of the obstacle was smaller ( $p < 0.001$ ) on the left side than on the right side. This is consistent with a previous study by Gérin-Lajoie<sup>152</sup> showing that a smaller clearance (called personal space by Gérin-Lajoie) is generally observed to the side to which the dominant part of the body is closest. When differentiated for side, it was found that the same trend was maintained with significant decreases for day 30 on the left side ( $p = 0.002$ ) and for day 7 ( $p = 0.002$ ) and day 30 ( $p = 0.002$ ) for the right side. Only left clearance at day 7 was not different from baseline.

When concussion effects were separated out for both side and Stroop, it can be seen that although the simultaneous Stroop task caused greater clearances due to a division of attention, the same general trend was evident. However, minimal clearances for days 7 and 30 following concussion were not different.

#### **5.6.4 Maximal gait speed**

Maximum speed during obstacle approach is presented in the same manner as for minimum clearance in figure 3b. The overall data showed that the athlete slowed his approach speed after concussion ( $p = 0.006$ ). Post-hoc analyses showed that there was a significant decrease in maximum approach speed for both days 7 ( $p = 0.002$ ) and 30 ( $p = 0.003$ ) following concussion as compared to baseline, but no difference from 7 to 30 days post-concussion.

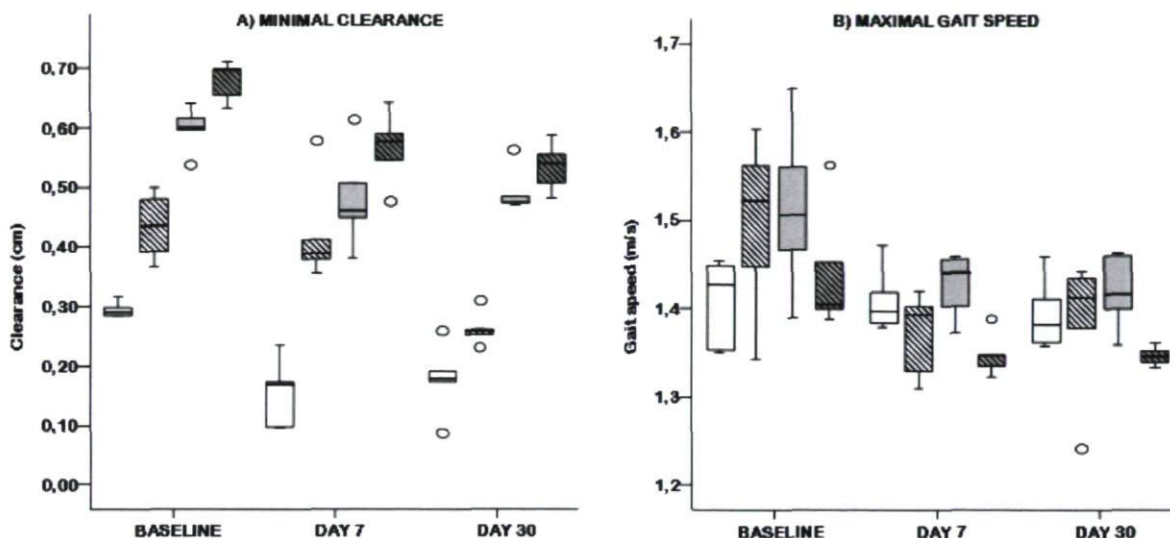


Figure 3. Box plots of gait measures related to (a) minimal clearance and (b) maximal gait speed for left (white bars) and right (grey bars) circumventions as well as with (hatched) and without (plain) the Stroop task.

The maximal gait speed was not different between sides of clearance. When looking at each side of crossing individually, the same decrease in speed from baseline was found for right crossings with decreases from baseline at 7 ( $p=0.006$ ) and 30 ( $p=0.018$ ) days post-concussion. This was not the case, however, for left crossings, particularly without Stroop where the maximum approach speed was the same over the 30-day period.

## 5.7 Discussion

The most utilized method to decide whether an athlete is ready or not to go back to sport after sustaining a concussion is currently based on the results of neuropsychological testing and symptoms assessment. As such, medical clearance for return-to-play following a concussion classified as simple is usually given within 7 to 10 days.<sup>239</sup> Athletes, however, engage in a number of navigation tasks while participating in their sport that require complex information processing and executive functioning that may not be represented by classical clinical testing. In the present paper, a case study was carried out after an elite hockey player, originally recruited as a control subject (i.e., without concussion) for another study, suffered a simple concussion. The results showed that even in the absence of classical medical symptoms and the fact that the athlete's performance on

neuropsychological testing had returned to baseline (i.e. prior to his concussion), his locomotor navigational abilities were still affected up to 30 days following the concussion.

The recovery of the athlete's cognitive performance on neuropsychological testing that occurred during the first 14 days post-concussion, corresponds to what has been found in other studies.<sup>152,242,210</sup> The athlete definitely showed signs of general cognitive recovery even in the DTC that were also shown to have returned to baseline levels at 30 days post-concussion. However, despite these results, the athlete continued to make more errors compared to baseline and even as compared to day 7. In addition, up to one month following concussion, the athlete slowed down his gait speed and tended to decrease his clearance of the obstruction during circumvention. These changes suggest longer term planning deficits due to the concussion and, in conjunction with the visual interference task errors, an overall persisting attention deficit.

The present DTC results are not corroborated by Collie et al<sup>217</sup> who found no significant changes in reaction time for concussed athletes who were asymptomatic 10 days following their injury. Although, the present case report looked for DTCs at day 7 post-concussion, which is 3 days earlier than Collie et al., Halterman et al<sup>187</sup> found greater reaction time differences between accurate and inaccurate responses to a visuo-spatial attention test that continued for executive and orienting components up to one month following concussion. These authors, however, found no effects on errors. Although there are some differences in the tasks and response modes between the cited studies and the present one, one main difference in the present study is the use of a locomotor navigation task presenting more challenge to executive functioning (e.g., planning, attention).

With respect to the differences found in the present study in relation to the side of clearance, less clearance on the left side corresponds to a preferred side for avoiding the obstacle, as previously shown in the literature.<sup>229</sup> Thus the athlete could be more comfortable during his left crossing by having a preferred perception of space around the obstacle during the challenging dual task. However, the athlete made more response errors to the visual interference task during left crossings, showing that even when using his preferred side, his attention was decreased faced with such a challenging situation. Regardless of the side of crossing, there was an overall decrease in minimum clearance

following the concussion as compared to baseline. This could be related to poor decision making and the athlete's choice of avoidance strategies. Such decision making is crucial when playing sports to avoid opponents and particularly important to avoid further injury. It is suggested that an athlete is much more at risk of another concussion when he has already suffered one.<sup>215</sup> According to the same authors, the increased risk of future injury, as well as a slower recovery, may be indicative of increased neuronal vulnerability following recurrent concussive injuries. It is also possible that poor planning and avoidance strategies that persist up to 30 days after a concussion could be a factor related to future injury and this should be considered in return-to-play decision protocols. Finally, during the approach to the obstacle the athlete decreased his maximal gait speed following the concussion and this decreased speed was still present at day 30 post-concussion. These post-concussion decreases in speed were also observed in previous studies.<sup>222,242</sup> It is possible that recently concussed individuals might have a reduced ability in properly controlling their movement in space as discussed for clearance results. Therefore, gait speed may have been decreased to maintain postural control within a safe limit during gait to avoid hitting the obstacle. The fact that maximal gait speed was not affected by the interference task when the athlete crossed the obstacle on the left side could be because it was his preferred side and thus required less attention as compared to the right crossing.

## **5.8 Conclusion**

In summary, a sport-related concussion can result in multiple neuropsychological and motor problems. This case report is the first account of an athlete who has sustained a simple concussion and still presented with problems with multi-task behaviour in a sport relevant locomotor task up to 30 days post-concussion. This suggests that the concussed athlete may have difficulties in adjusting to the high-demanding, multi-tasking, real sport environment. A similar assessment protocol as the one described here could be used with athletes who have recently suffered a concussion in order to explore return-to-play assessments and ultimately help avoid the risk of subsequent injury or concussions. Indeed, additional research must be carried out with more subjects and could be replicated within a hockey environment (e.g. ice rink). The present study provides support for the assessment of locomotor function in managing return-to-play in athletes with concussion.



## **5.9 Acknowledgements**

We thank Guy St-Vincent for his technical assistance, Eric Huard and Janick Bisson for their consultation and the development of the Stroop presentation program. This study was supported in part by the Canadian Institutes for Health Research and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (BJ McFadyen).

## CHAPITRE 6 – ÉTUDE IV

Increasing task complexity and ice hockey skills of youth athletes.

### 6.1 Résumé en français

L'objectif de cette étude pilote était d'étudier les effets d'une tâche interférence visuelle (Stroop-mot) sur des tâches spécifiques de patinage rapide, de maniement de bâton, et d'évitement d'obstacles, ainsi que sur les performances cognitives. Un autre objectif était d'étudier les effets sur le patinage à vitesse maximale et la marge de dégagement minimale avec l'obstacle, d'ajouter progressivement des tâches spécifiques de maniement du bâton, une interférence visuelle, et l'évitement d'obstacles chez huit athlètes masculins âgés de 10 à 12 ans (moyenne de 11.25 +/- 0.90 ans). Les résultats ont révélé une baisse des performances à la fois sur les mesures cognitives et physiques lors d'une augmentation de la complexité de la tâche, ce qui suggère que l'augmentation de la complexité à un environnement influe sur la performance des compétences spécifiques de hockey chez des athlètes masculins enfants.

### 6.2 Introduction

The sport of ice hockey requires the integration of multiple skills (i.e., performing the locomotor task of skating while trying to direct a pass, shoot a goal and/or avoid a body check) for successful performance and for safety (i.e., avoiding collision and injury). Ice hockey skills have rarely been subject to experimental manipulation<sup>243</sup>, thus the information processing demands associated with the integration of cognitive and locomotor skills in this sport-specific context are poorly understood. Dual-task paradigms provide an experimental method where the effect of increasing task complexity on information processing load can be observed via performance decrements on one or more tasks. The present study adapted dual-task protocols used to examine locomotor navigation while walking over ground (e.g., Gérin-Lajoie, Richards, & McFadyen, 2005)<sup>152</sup> to skating on ice.

As outlined by Abernethy<sup>244</sup>, dual-task methodology examines two tasks performed simultaneously, one task designated as the primary task and the other as the secondary task. This paradigm purports that performance on the primary task is to remain at baseline or single-task level (as would be performed in the absence of the secondary task), while reduced performance on the secondary task during the dual-task condition is what denotes an interference effect.<sup>245,175</sup> In the current study performance on the cognitive task of the Stroop Color Word Test interference condition<sup>246</sup> and skating, stickhandling and obstacle avoidance were simultaneously prioritized by asking the athletes to skate as fast as possible and at the same time, perform the Stroop Colour Word Test as fast and accurately as possible. Dual-task cost (DTC) was the metric used to determine the difference in performance during a dual-task condition compared to a single-task condition.<sup>245</sup>

In youth populations, most dual-task studies have looked at developmental differences in cognition<sup>247-251</sup> and tend to show that as children get older, there is a general decrease in dual-task costs. Studies of typically developing children have demonstrated age-related differences between children and young adults with respect to dual-task prioritization, where children place greater priority placed on balance stability versus cognitive tasks in dual-task conditions.<sup>252</sup> Irwin-Chase and Burns<sup>249</sup> also found developmental changes in children's dual-task performance when tasks were assigned different priorities. In this case, only older children (mean age of 11.1 years) were able to differentially allocate attention during a dual-task.

Studies examining the effects of the dual-task paradigm on children have been traditionally held in laboratory settings (i.e., Huang, Mercer, & Thorpe, 2003; Laufer, Ashkenazi, & Josman, 2008; Schaefer et al., 2008).<sup>253,254,252</sup> However, two studies involving youth

athletes have been performed in a sport-specific setting.<sup>243,255</sup> The first, performed by Leavitt (1979)<sup>243</sup>, analyzed dual-task performance in hockey skills in order to provide information regarding the cognitive demands of ice hockey. Leavitt (1979) conducted a series of studies where progressively adding the secondary tasks of stickhandling a puck and visual interference produced little effect on the primary task of skating speed in experienced hockey players, but significantly slowed skating speed in novice hockey players. A more recent study by Smith and Chamberlain (1992)<sup>255</sup> sought to examine whether similar results could be found in the sport of soccer, where running and dribbling a ball are performed by the same limbs (compared to hockey where stickhandling and skating are performed by separate limbs) where the dual-task cost is hypothesized to be greater.<sup>255</sup> Their results revealed that the addition of cognitively demanding elements caused a decrement in performance, regardless of level of expertise, but that this decrement in performance was reduced with increased expertise.

These two studies are unique with respect to the measurement of dual-task performance in a sport-specific environment. While Leavitt (1979)<sup>243</sup> did combine the skills of skating, stickhandling and visual interference (which required the players to skate with their heads up— a skill emphasized to prevent injury), he did not include obstacle avoidance, a fourth skill which is arguably necessary for successful hockey performance in order to avoid intentional body checks from opposing players and incidental contact with opponents, teammates, referees and objects on the playing surface (i.e., hockey nets etc.). In addition, neither study examined biomechanical measures associated with sport performance (i.e., minimum distance to obstacle clearance). Given the paucity of information regarding dual-task performance in sport-specific environments, particularly in youth, we designed the current study to 1) investigate the effects of progressively adding the ice hockey specific

tasks of skating, stickhandling and obstacle avoidance on cognitive performance during a visual interference task; and 2) investigate the effects of progressively adding the ice hockey specific tasks of stickhandling, visual interference and obstacle avoidance on maximal skating speed and minimal obstacle clearance in youth athletes ages 10-12 years. It was hypothesized that cognitive performance (as measured by accuracy and DTC on the Stroop Color and Word Test interference condition) would be negatively affected by the introduction of each secondary physical task compared to baseline (i.e., single task performance). Likewise, it was hypothesized that maximal skating speed and minimal obstacle clearance (measured in meters per second and meters, respectively) would be negatively affected by the introduction of each secondary task compared to baseline.

## **6.3 Method**

### **6.3.1 Participants**

A convenience sample of eight competitive youth male ice hockey players (mean age = 11.25 years, SD = 0.90 years) from the Greater Toronto Hockey League (minor Peewee AA and Peewee AA) and the Mississauga Hockey League (Minor Peewee A) were recruited. Representative level ice hockey teams participate in three divisions based on skill level. These divisions are A, AA and AAA, where A represents the lowest skill level and AAA represents the highest skill level. Youth ice hockey players who participated on A and AA hockey teams were enrolled in this study to provide a more accurate representation of the typical youth representative level ice hockey player. Participants' characteristics are shown in Table 1. All participants were male to minimize the influence of gender on task performance. Ethics approval was obtained from the University of Toronto Health Sciences Research Ethics Board and all participants' legal guardians signed informed consent prior to data collection. In addition, the study was explained to the youth participants and their assent was obtained in order to proceed with the study protocol. Exclusion criteria included any self-reported neurological or musculoskeletal problems or taking medication affecting alertness or locomotion. The participants wore their own helmets, skates, gloves, and a comfortable full track suit. They also used their own hockey sticks.

*Table 1. Participants' characteristics*

<i>Participant</i>	<i>Age (y)</i>	<i>Height (m)</i>	<i>Weight (kg)</i>	<i>Stickhandling</i>
<i>SK005</i>	<i>10</i>	<i>1.45</i>	<i>44.3</i>	<i>Left</i>
<i>SK006</i>	<i>11</i>	<i>1.50</i>	<i>31.8</i>	<i>Left</i>
<i>SK007</i>	<i>12</i>	<i>1.62</i>	<i>62.9</i>	<i>Left</i>
<i>SK008</i>	<i>10</i>	<i>1.35</i>	<i>32.7</i>	<i>Left</i>
<i>SK009</i>	<i>12</i>	<i>1.50</i>	<i>38.5</i>	<i>Left</i>
<i>SK010</i>	<i>12</i>	<i>1.75</i>	<i>72.3</i>	<i>Right</i>
<i>SK011</i>	<i>12</i>	<i>1.64</i>	<i>50.5</i>	<i>Left</i>
<i>SK012</i>	<i>11</i>	<i>1.42</i>	<i>40.9</i>	<i>Left</i>
<i>Mean</i>	<i>11.25</i>	<i>1.53</i>	<i>46.74</i>	
<i>SD</i>	<i>0.89</i>	<i>0.13</i>	<i>14.43</i>	

### 6.3.2 Task protocol

The protocol was designed to increase task complexity in a step-wise fashion to replicate the increasing attentional and physical demands present in a complex, real-world ice hockey competition. Participants had to perform three trials for each of the twelve conditions representing four levels of complexity (Level 1 = lowest complexity to Level 4 = highest complexity) presented in a randomized fashion. The task protocol conditions, along with their corresponding level of complexity, are presented in Table 2. All participants were allowed to practice the Stroop task ahead of time and to perform each condition (with and without obstacle, with and without dual task, with and without stick handling) before data collection began. These practice trials were performed prior to the protocol and after the youth athletes had completed a warm-up consisting of light skating and stretching of large muscle groups.

Table 2. Task Protocol conditions

Complexity	Skating	Stroop-word task	Obstacle avoidance (left and right)	Stickhandling
1	✓	✓		
2	✓ ✓ ✓	✓	✓	✓
3	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓	✓ ✓
4	✓	✓	✓	✓

### 6.3.3 Description of Tasks

#### 6.3.3.1 Skating

This locomotor task consisted of skating along a 16.5 m long path (see Figure 1). The athlete was instructed to skate as fast as possible without stopping from a starting location marked on the ice to an ice hockey net located straight-ahead. Full speed skating was used to target a specific locomotor behavior of ice hockey players and to reduce variability in performance observed during pilot work associated with instructions to skate at a comfortable pace.

#### 6.3.3.2 Visual Interference.

The Stroop Color-Word Test interference condition<sup>246</sup> was used on half of the trials and the youth athletes were informed in advance of its presence in the trial. During the Interference Condition the words 'red', 'green' and 'blue' were projected using PowerPoint 2007 (Microsoft corporation, USA) with a data projector (Epson Powerlite 77c) set 2.83 m from the screen on a table that was 0.90 m in height. The onset of the visual stimulus was indicated via a visual and auditory countdown prior to the beginning of the trial. During this countdown the numbers '3', '2', '1' followed by the signal 'Go!' would appear every 500 ms apart paired with a beep. Athletes would start skating as fast as possible at the presentation of 'Go!', and 500 ms after the 'Go!' signal appeared on the screen, the first Stroop stimulus would appear. The words were projected at a rate of 1Hz in different congruent or incongruent colors and required the subject to indicate the color of the word while ignoring its lexical meaning. A screen (1.52 m x 1.35 m) was placed in front of the

participant at the end of the path. The participants were asked to identify the colors as fast as possible and their verbal responses were recorded on a voice recorder (Panasonic RR-U360) worn by the participant. Recorded verbal responses were then processed using a custom Matlab 7.7.0.471 (The MathWorks, USA) program. Verbal response reaction time was calculated by subtracting the onset of verbal response from the time of the onset of the visual stimuli. The onset of the visual stimulus could be differentiated from the verbal response because the first visual stimulus always appeared 1.5 seconds after the last beep of the visual and auditory countdown leading into the task and the inter-stimulus interval was 500 ms, allowing accurate calculation of all visual stimulus onset times. All of the trials were videotaped to identify any errors or no response during the performance of the Stroop task.

### 6.3.3.3 Obstacle avoidance.

During obstructed trials, participants circumvented a cylindrical obstacle set within the skating path at 4.70 m from the youth athletes' starting location. The custom built obstacle (height: 1.45 m, diameter: 0.30 m) was made of a thick cylindrical fabric shell filled with a stack of five inflated beach balls. Sandbags were placed at the bottom of the obstacle to stand them upright. A similar obstacle has been used with adult athletes in a previous study.<sup>154</sup> For all obstructed trials, the athletes were instructed as to the side of the obstacle they had to circumvent (i.e. left or right). No other instructions were given to the athletes about how to perform the skating tasks. An equivalent spacing was provided on either side of the obstacle to allow a symmetric clearance area (see Figure 1).

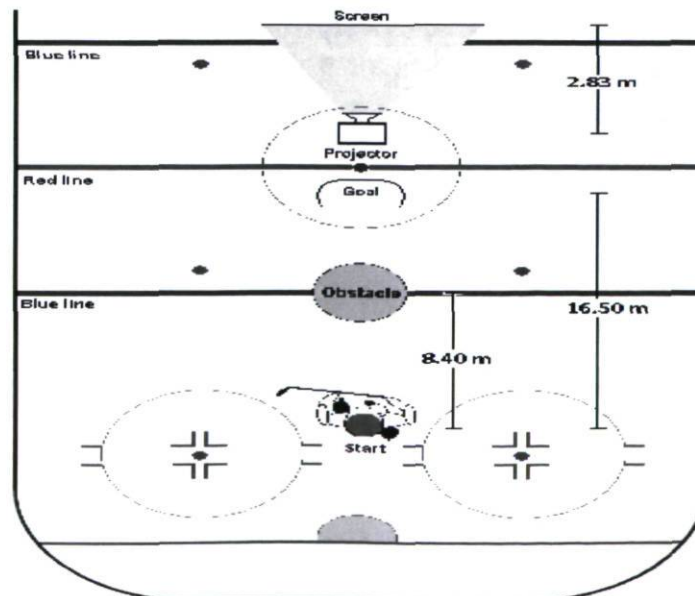


Figure 1. Experiment set-up



#### **6.3.3.4 Stickhandling.**

The participants were asked to carry a standard black ice hockey puck (2.5 cm thick, 7.6 cm in diameter, 0.170 kg) with an ice hockey stick from the start location to the net set at the end of the path. All participants used their own ice hockey stick for the experiment.

#### **6.3.4 Apparatus.**

Three-dimensional kinematic data during skating were collected at a frequency of 50 Hz with a motion analysis system (Vicon Mx Ultramet HD with 3 MX-3+ Cameras, USA) and using markers that were fixed on the participants' feet (on the heel of the skates), trunk (at C7 level), shoulders, and on the back of their helmet. Other measures included participants' height and weight. The kinematic data were interpolated and low-pass filtered at 6Hz with a 2<sup>nd</sup>-order double pass Butterworth filter.

#### **6.3.5 Outcomes measures**

Dependent variables included measures of cognitive and locomotor performance across varying levels of complexity. Cognitive outcome measures included the number of errors (omission or wrong answer) on the Stroop Color-Word Test interference condition as well as the dual-task cost (DTC) associated with reaction time (RT). Response RTs to the Stroop task during skating were converted to DTC by subtracting out the response RTs while performing the Stroop task alone (Level 1 task complexity) (i.e. with no skating, stickhandling or obstacle avoidance) from each condition under subsequent levels of complexity and averaged across trials within that condition. Physical outcome measures included maximum skating speed in metres per second as well as minimum object clearance in metres across all relevant conditions and levels of task complexity. An average for each dependent variable was calculated using custom Matlab 7.7.0.471 (The MathWorks, USA) programs across trials for each participant.

#### **6.3.6 Analysis**

Given the small number of participants, a non-parametric statistical test (Friedman's test) was applied to examine repeated effects of increasing task complexity across participants. Four separate Friedman's tests were performed using SPSS version 17.0 with condition as the independent variable and Stroop task errors, DTC, maximal skating speed and minimal obstacle clearance as the dependent variables, respectively. Post-hoc analyses were

completed using non-parametric Wilcoxon tests to determine what contrasts were significant at  $p < 0.05$ . Wilcoxon tests were limited to comparing each condition at subsequent levels of task complexity to the lowest level of task complexity for that dependent variable in order to limit the number of multiple comparisons.

## 6.4 Results

### 6.4.1 Cognitive Results

#### 6.4.1.1 Stroop Task Errors.

The frequency of Stroop task errors across all conditions and levels of task complexity are presented in Table 3. Overall, a total of 29 errors were made by five different athletes. Friedman's analysis did not reveal a significant effect of experimental task condition on number of Stroop task errors [ $X^2_r(6) = 9.86, p = 0.13$ ]. However, visual inspection of the Stroop task errors data revealed that 26 of the 29 errors were recorded when an obstacle was present compared to 1 error recorded when no obstacle was present and 2 errors recorded during baseline (i.e. Stroop alone). With respect to side of circumvention, 14 errors were recorded during left side obstacle circumvention and 12 errors were recorded during right side obstacle circumvention. To further explore the effect of obstacle circumvention on Stroop task errors, a subsequent Friedman's test was performed with Stroop task errors collapsed across obstacle circumvention conditions (e.g. no obstacle, left side obstacle circumvention and right side obstacle circumvention). The results of the Friedman's tests revealed a significant effect of obstacle circumvention [ $X^2_r(2) = 7.41, p = 0.025$ ]. Post-hoc Wilcoxon tests revealed that significantly more Stroop errors were made for the no obstacle versus left obstacle conditions [ $Z = -2.07, p = 0.038$ ], with no significant difference for the no obstacle versus right obstacle conditions [ $Z = -1.84, p = 0.066$ ] and for the left versus right obstacle conditions [ $Z = -0.272, p = 0.785$ ].

Table 3. Frequency of Stroop Task Errors by Experimental Condition

Task Complexity	Participants							
	SK 005	SK 006	SK 007	SK 008	SK 009	SK 010	SK 011	SK 012
<u>Level 1</u>								
Stroop alone	0	0	0	1	0	0	1	0
<u>Level 2</u>								
Skating + Stroop	0	0	0	1	0	0	0	0
<u>Level 3</u>								
Skating + Stickhandling + Stroop	0	0	0	0	0	0	0	0
Skating + Left obstacle + Stroop	0	0	0	4	1	0	1	0
Skating + Right obstacle + Stroop	0	0	0	3	3	0	0	0
<u>Level 4</u>								
Skating + Stickhandling + Left Obstacle + Stroop	1	0	0	1	2	3	1	0
Skating + Stickhandling + Right Obstacle + Stroop	4	0	0	0	0	0	2	0

#### 6.4.1.2 Dual Task Costs (DTC).

Descriptive statistics for DTC collapsed across trials for each experimental condition are presented in Table 4. Friedman's test revealed a significant effect of experimental task condition on DTC [ $X^2_r(6) = 25.13, p < 0.001$ ]. Follow-up analyses using Wilcoxon tests compared the DTC associated with each condition to the DTC associated with the Level 2 task complexity of Stroop task + skating. The Wilcoxon tests revealed a significant difference in DTC for the Level 4 complexity task of Stroop + skating + stickhandling + right obstacle circumvention compared to the DTC associated with Stroop + skating [ $Z = -2.38, p = 0.017$ ].

Table 4. Descriptive statistics for *du*; task costs collapsed across trials for each experimental condition

Task Complexity	N	Mean	Std. Error	Std. Deviation	Range	Min.	Max.
<u>Level 1</u>							
Stroop alone	8	0.81	0.05	0.13	0.41	0.61	1.02
<u>Level 2</u>							
Stroop + Skating	8	-0.08	0.04	0.11	0.28	-0.22	0.06
<u>Level 3</u>							
Stroop + Skating + Stickhandling	8	-0.05	0.05	0.14	0.41	-0.23	0.18
Stroop + Skating + Right obstacle	8	-0.06	0.05	0.13	0.34	-0.25	0.10
Stroop + Skating + Left obstacle	8	-0.05	0.04	0.10	0.29	-0.18	0.11
<u>Level 4</u>							
Stroop + Skating + Stickhandling + Left obstacle	8	-0.12	0.06	0.18	0.57	-0.18	0.39
Stroop + Skating + Stickhandling + Right obstacle	8	-0.01	0.05	0.13	0.37	-0.25	0.12

## 6.4.2 Locomotor Results

**6.4.2.1 Maximal skating speed.**- The descriptive statistics for maximal skating speeds for all experimental conditions are presented in Table 5. Friedman's test revealed a significant effect of experimental task condition on maximal skating speed [ $X^2_r(11) = 66.12, p < 0.001$ ]. Post-hoc Wilcoxon tests compared the maximal skating speed for each condition to the maximal skating speed associated with the Level 1 task complexity of skating alone. The addition of the Stroop task resulted in significantly slower maximal skating speed at Level 2 task complexity [ $Z = -2.24, p = 0.025$ ]; Level 3 task complexity (skating + Stroop + stickhandling: [ $Z = -2.38, p = 0.017$ ]; skating + Stroop + left obstacle circumvention: [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ]; skating + Stroop + right obstacle circumvention: [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ]); as well as Level 4 task complexity (skating + Stroop + stickhandling + right obstacle circumvention: [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ]; skating + Stroop + stickhandling + left obstacle circumvention: [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ]).

*Table 5. Descriptive statistics for maximal skating speed collapsed across trials for each experimental condition*

Task Complexity	N	Mean	Std. Error	Std. Dev.	Range	Min.	Max.
<u>Level 1</u>							
Skating only	8	5.41	0.09	0.24	0.69	5.01	5.71
<u>Level 2</u>							
Skating + Stickhandling	8	5.22	0.12	0.30	1.09	4.62	5.71
Skating + Stroop	8	5.21	0.11	0.30	0.82	4.67	5.48
Skating + Right Obstacle	8	5.11	0.10	0.28	0.91	4.69	5.59
<u>Skating + Left Obstacle</u>	8	5.04	0.11	0.32	1.01	4.47	5.47
<u>Level 3</u>							
Skating + Stickhandling + Stroop	8	4.99	0.11	0.31	1.03	4.37	5.40
Skating + Right Obstacle + Stroop	8	4.87	0.13	0.36	1.01	4.24	5.25
Skating + Left Obstacle + Stroop	8	4.86	0.13	0.37	1.06	4.12	5.17
Skating + Right Obstacle + Stickhandling	8	4.81	0.11	0.30	0.92	4.30	5.21
Skating + Left Obstacle + Stickhandling	8	4.76	0.08	0.23	0.54	4.48	5.02
<u>Level 4</u>							
Skating + Right Obstacle + Stickhandling + Stroop	8	4.52	0.10	0.28	0.75	4.13	4.88
Skating + Left Obstacle + Stickhandling + Stroop	8	4.51	0.14	0.39	1.13	3.82	4.95

#### 6.4.2.2 Minimal clearance of obstacles.

The descriptive statistics for the minimal obstacle clearance associated with all relevant experimental conditions are presented in Table 6. Friedman's test revealed a significant effect of experimental condition on minimal clearance [ $X^2_r(7) = 23.67, p = 0.001$ ]. Post-hoc Wilcoxon tests compared the left and right minimal obstacle clearance for each experimental condition to the minimal obstacle clearance recorded for the Level 2 task complexity condition of left obstacle clearance + skating and right obstacle clearance + skating, respectively. The addition of the Stroop task at Level 3 task complexity did not result in a significant difference in minimal obstacle clearance for the left [ $Z = -1.26, p = 0.208$ ] or the right side [ $Z = -1.54, p = 0.123$ ], respectively. In comparison, the addition of stickhandling at Level 3 task complexity did result in a significantly greater minimal obstacle clearance for both the left [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ] and the right [ $Z = -2.10, p = 0.036$ ] sides, respectively. Finally, the addition of both stickhandling and Stroop task at Level 4 task complexity also resulted in a significantly greater minimal obstacle clearance for both the left [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ] and the right [ $Z = -2.52, p = 0.012$ ] sides, respectively.

*Table 6. Descriptive statistics for minimal obstacle clearance collapsed across trials for each experimental condition*

Task Complexity	Side	N	Mean	Std. Error	Std. Dev.	Range	Min.	Max.
<u>Level 2</u>								
Skating	Right	8	0.67	0.06	0.18	0.56	0.43	0.98
Skating	Left	8	0.63	0.04	0.12	0.42	0.43	0.85
<u>Level 3</u>								
Skating + Stroop	Right	8	0.74	0.07	0.19	0.55	0.58	1.13
Skating + Stroop	Left	8	0.70	0.05	0.15	0.46	0.44	0.91
Skating + Stickhandling	Right	8	0.90	0.08	0.22	0.80	0.56	1.36
Skating + Stickhandling	Left	8	0.83	0.05	0.15	0.40	0.65	1.05
<u>Level 4</u>								
Skating + Stickhandling + Stroop	Right	8	1.02	0.11	0.31	0.87	0.72	1.56
Skating + Stickhandling + Stroop	Left	8	0.83	0.09	0.24	0.83	0.48	1.31

## 6.5 Discussion

The current study was designed to explore the effects of increasing task complexity on both cognitive and physical measures of hockey skill performance in youth athletes. Cognitive performance was measured via a visual interference task (Stroop Color Word Test interference condition) and physical performance was assessed by measuring maximal skating speed and minimal distance to circumvent an obstacle. It was hypothesized that cognitive performance (as measured by accuracy and DTC on the Stroop Color and Word Test interference condition) would be negatively affected by the introduction of each secondary physical task compared to baseline (i.e. single task performance). Likewise, it was hypothesized that maximal skating speed and minimal obstacle clearance would be negatively affected by the introduction of each secondary task compared to baseline. The findings relevant to these hypotheses are discussed below.

### 6.5.1 Cognitive Performance

The results of the study partially support the initial hypotheses that increasing task complexity affects cognitive performance in a hockey specific environment. The number of errors on the Stroop task was significantly higher when participants were required to circumvent an obstacle on the left side, but not the right side, compared to when there was

no obstacle avoidance required. In comparison, the added task of stickhandling a puck did not result in a greater number of errors on the Stroop task. This suggests that the hockey skill of stickhandling a puck may require less visual feedback than obstacle avoidance, and youth are able to stickhandle without looking down at the puck in order to maintain cognitive performance. The lack of significant difference between right side obstacle circumvention and no obstacle circumvention may be related to the side of the body that players stickhandle most comfortably. Seven out of eight players reported stickhandling on the left side of their body and it may be the case that they require less visual feedback to go around the obstacle on the right side than the left, which allows them to concentrate more fully on the visual interference task.

With respect to DTC associated with reaction time during the Stroop task, when compared to skating while performing the Stroop task alone (Level 2 task complexity), participants showed significantly greater DTC only during the most complex experimental condition (Level 4 task complexity) during right side obstacle circumvention. Together, the findings specific to Stroop errors and DTC suggest poorer cognitive performance during concurrent obstacle circumvention. With respect to cognitive performance, perhaps the participants were exhibiting a speed/accuracy trade-off during obstacle circumvention. For example, it is possible that the participants sacrificed Stroop task response accuracy in order to limit DTC specific to reaction time during left side obstacle circumvention, while during right side circumvention, response accuracy (fewer errors) was the priority. In both scenarios, concurrent obstacle circumvention resulted in poorer cognitive performance. A recent dual-task study examined the effects of a secondary cognitive task on obstacle avoidance in healthy young adults.<sup>256</sup> Participants were asked to respond to a secondary auditory Stroop task while concurrently crossing an obstacle during gait. It was found that with increased complexity of the locomotor task, incongruent stimuli required longer reaction times. Although the current study differs from the study conducted by Siu et al.<sup>256</sup> as it did not measure both incongruent and congruent reaction times, utilized a visual Stroop task rather than an auditory Stroop task and involved obstacle circumvention rather than obstacle crossing, the findings of increased locomotor task complexity leading to poorer cognitive performance is comparable. Similar to that discussed by Siu et al.<sup>256</sup> in relation to healthy young adults, this finding may be a result of youth ice hockey players prioritizing stability during skating over cognitive performance during dual-task situations, where decreased



cognitive performance during tasks of increased complexity manifests as both Stroop task errors (left side obstacle circumvention) and increased DTC (right side obstacle circumvention).

### **6.5.2 Locomotor Performance**

The locomotor results also partially supported the initial hypotheses. In particular, the addition of the visual interference test resulted in slower maximal skating speed at all levels of task complexity compared to the single task of skating alone, suggesting that hockey specific locomotor performance is significantly affected by introducing a cognitive dual-task condition. However the addition of the visual interference condition did not significantly affect minimal obstacle clearance, contrary to the hypotheses. It is interesting to compare these findings to the cognitive performance conditions where Stroop task errors were greater during the left side obstacle circumvention, and the DTC was significantly increased when required to circumvent to the right side of the obstacle. Taken together, the results suggest that participants were compromising skating speed to maintain cognitive performance on the visual interference task.

## **6.6 General Discussion**

The results of the study are intriguing as the original hypotheses were based on the assumption that participants would accommodate increasing task complexity in a step-wise fashion. However it appears that performance parameters are more dynamic and flexible than originally assumed, and that certain tasks are given priority depending on the combination of skills required. This assignment of priority makes sense given that some tasks are well learned (like skating) and other are least familiar (by example the Stroop Word test). However, even well learned tasks appear to be compromised by the introduction of novel information processing demands in complex environments.

The findings cannot be generalized to all youth ice hockey players because in the current study, all participants were experienced male hockey players and had played competitive hockey. It cannot be assumed that female youth hockey players would demonstrate the same pattern of performance decrements under dual-task conditions. Although, to date, very little has been reported with respect to gender differences specific to concurrent locomotor and cognitive dual-task performance, one study reports increased variability during dual-task walking in older men compared to older women.<sup>257</sup> Although this study

differs from the current study both methodologically and with respect to the population of interest, it highlights the potential for gender differences during concurrent locomotor and cognitive task performance. Further examination of potential influence of gender on dual-task performance specific to youth and the sport of ice hockey is needed.

In addition, it is possible that less experienced youth may demonstrate greater performance decrements under dual-task conditions. For example, Leavitt<sup>243</sup> found that the introduction of a visual identification task significantly slowed skating speed in novice hockey players, but not in more experienced hockey players. The difference in results between the Leavitt<sup>243</sup> study and the current study may be due to task differences associated with a visual identification versus visual interference task. Smith and Chamberlin<sup>255</sup> also found that the addition of cognitively demanding elements caused a decrement in performance, regardless of level of expertise, but that this decrement in performance was reduced with increased expertise. Regardless of methodological and task differences, the results of decreased cognitive performance with the addition of a sport-specific locomotor task in the current study echoes findings by both Leavitt<sup>243</sup> and Smith and Chamberlin.<sup>255</sup>

By comparing separate and combined performance of locomotor and cognitive capacities during skating with a simultaneous visual interference task, the present study provides an innovative way for assessment of locomotor function in a sport-specific and ecological environment. Moreover, it can provide information not accessible with more traditional testing which examines cognitive and locomotor performance independent of one another. In particular the experimental paradigm could be explored for its potential to reflect level of skill by measuring performance under dual-task conditions, as well as its potential to highlight sport-specific functional impairments following concussion. Individuals (including youth) with concussion are likely to show a more selective impairment on complex motor tests requiring visiospatial skills or on those that require the use of additional cognitive skills for successful performance<sup>258-260</sup> compared to other classical neuropsychological 'paper and pencil' tests.<sup>170</sup> Performance deficits arise when locomotor and cognitive tasks are performed concurrently that may otherwise go unnoticed if assessed in isolation of one another.<sup>261</sup> The results of the current study are limited by the small number of participants which reduces the power to detect statistically significant results. Future studies which include a larger number of participants who vary according to age, gender and skill level should be performed to better understand the influence of these variables on sport-specific dual-task performance. In addition, future studies could adapt

the experimental paradigm to other sport-specific environments (e.g., football, soccer, lacrosse etc.).

## **6.7 Conclusion**

This experiment was performed to look at the effects of dual-task conditions on ice hockey specific performance parameters in male youth ice hockey players. The observed differences in cognitive and locomotor performance associated with varying task complexity suggest that certain skills are given priority when competing for attentional resources in the sport of ice hockey. In particular obstacle avoidance appears to take priority when present, followed by cognitive performance as measured by a visual interference task. This study is unique as it is the first to examine the effect of combined ice hockey skills on sport-specific parameters and highlights the trade-off between physical and cognitive performance under more complex conditions. The findings have implications for sport-specific assessment of combined cognitive and motor skills of both healthy and concussed athletes.

## **6.8 Acknowledgements**

This work was supported by a conjunct program of the Ontario Neurotrauma Foundation (ONF) and the Quebec Rehabilitation Research Network (REPAR). The authors would also like to thank Mr Guy St-Vincent for his technical assistance. We would like to thank M. Michael McLellan and Ms Emmanuelle Careau for their suggestions and English language editing. The obstacle was conceived and designed by Dr. Martin Gérin-Lajoie.

## **CHAPITRE 7 - DISCUSSION**

### **7.1 La synthèse des études I, II, III et IV**

Dans l'ensemble des études menées pour l'élaboration de cette thèse, leur but commun était de comparer les capacités locomotrices et cognitives combinées lors d'une division d'attention lors du contournement d'obstacles fixes et mobiles. Pour les trois premières études, l'objectif était aussi de comparer les résultats entre des participants ayant subi un TCC et des participants sains pour voir si les participants aux diverses études présenteraient des altérations fonctionnelles à la suite d'un TCC de différent degré de sévérité. L'étude I a été menée auprès d'adultes avec un TCC modéré ou sévère, l'étude II auprès d'athlètes de haut niveau avec TCCL et l'étude III est une étude de cas avec un athlète masculin ayant subi un TCCL. L'étude IV comprenait des enfants masculins sains qui utilisaient un autre moyen de locomotion, soit le patinage. Cette dernière étude fut élaborée pour voir s'il était possible de répliquer, dans des environnements les plus écologiques possible, les deux études précédentes faites en laboratoire, le but étant de voir s'il est possible d'étudier les variables dans un environnement écologique et avec des conditions plus spécifiques (patinoire de hockey). Cette étude a été effectuée en collaboration avec l'équipe du Brain Fit lab de l'université de Toronto ayant un intérêt pour la population des enfants ayant subi un TCCL durant la pratique de leur sport. Ce projet a donc été élaboré en vue d'étudier la possibilité de jeter les bases de cette nouvelle méthode dans l'évaluation du TCCL chez l'enfant. Pour ce faire, il fallait vérifier s'il était possible de reproduire le protocole des études I à III sur une patinoire (proof of principle).

Tous les participants à l'étude I (TCC modérés ou sévères) avaient une capacité locomotrice élevée et pouvaient marcher sans aide. Malgré tout, des différences significatives furent trouvées avec le groupe contrôle quand ces personnes furent es à effectuer une tâche avec division d'attention dans des environnements écologiques mais complexes. Une des différences majeures entre l'étude I et II (athlètes avec TCCL) est la différence du tableau clinique. Chez les personnes avec TCC modérés ou sévères, tous les tests cliniques (neuropsychologiques et de la fonction motrice) présentaient des résultats en

dessous des participants du groupe-contrôle. Du côté des athlètes ayant subi un TCCL, le tableau clinique du groupe contrôle et du groupe expérimental était identique : aucun symptôme et des tests neuropsychologiques post-TCCL ayant les mêmes valeurs que lors de l'évaluation pré-commotionnelle. Le fait d'éviter un obstacle par la gauche ou par la droite est certainement moins demandant pour les participants que de passer par-dessus un obstacle puisque l'équilibre du participant n'est pas autant mis à l'épreuve. Un montage en laboratoire impliquant moins l'équilibre et ne présentant presque aucun risque de trébucher pourrait donc avoir un effet moindre pour les patients ayant subi un TCC, puisqu'il est connu que ces personnes sont habituellement plus anxieuses et plus prudente lorsqu'elles enjambent un obstacle. Par contre, il est à noter que l'anxiété des participants ne fut pas mesurée dans le cadre des études de cette thèse alors nous ne pourrions pas valider cette hypothèse explicative.

Les études de cette thèse ont clairement démontré que peu importe la sévérité d'un TCC, des déficits résiduels ont été décelés lorsque mis face à des situations de division d'attention dans des environnements complexes. Ainsi, les résultats des études 1 à 3 de cette thèse pourraient avoir des impacts cliniques pour les personnes avec un TCC, tant au niveau de l'évaluation que pour le retour aux activités quotidiennes ou au sport pour les athlètes de haut niveau. Les cliniciens, avec l'apport des chercheurs, pourraient utiliser cette nouvelle méthode d'évaluation afin d'ajouter un outil à leur programme d'évaluation et de traitement des TCC. Par contre, des études de faisabilité devraient être mises en place avant de pouvoir concrètement voir cette nouvelle méthode d'évaluation être implantée en clinique. Les chercheurs pourraient aussi promouvoir les résultats de ces études auprès des cliniciens afin d'aider ces derniers quant au processus décisionnel relatif au retour au sport à la suite d'un TCCL.

Même s'ils n'ont démontré aucune différence dans leur vitesse de marche moyenne comparativement aux sujets contrôles, les athlètes avec un TCCL ont démontré beaucoup plus de variabilité intra et inter sujet. Ceci démontre que le contrôle de la vitesse de marche pourrait être altéré chez ces athlètes blessés ou alors qu'ils sont plus affectés par les facteurs environnementaux que les participants contrôles et donc tentent d'ajuster leur

vitesse de marche durant les divers essais. Ces mêmes athlètes n'ont démontré aucune différence avec le groupe contrôle quant à la vitesse de marche maximale atteinte lors de l'approche de l'obstacle mais des différences intra-groupes ont été noté lorsque la difficulté de la tâche a été augmentée (par exemple, passer de la marche non-obstruée à obstruée ou ajouter une tâche d'interférence). Ces changements chez les participants qui ont subi un TCCL ont peut-être été provoqués parce que leur système attentionnel utilise plus de ressources que lorsqu'il n'y a pas d'atteinte au cerveau afin de prévenir un contact possible avec l'obstacle. Le fait que la vitesse maximale de marche n'ait pas été différente entre les athlètes avec TCCL et le groupe contrôle démontre l'aspect subtil des altérations lorsqu'on évalue des athlètes de haut niveau ayant subi un TCCL.

Tel que discuté auparavant, les individus qui ont subi un TCC ont plus de difficulté à effectuer deux tâches ou plus simultanément, spécialement lorsque les tâches requises sont plus complexes. Il semble aussi que les déficits des fonctions exécutives, plus particulièrement au niveau de la planification, sont évidents chez les athlètes ayant subi un TCCL et aussi chez des adultes avec un TCC modéré ou sévère. La planification et la navigation sont deux aspects important dans le sport, comme par exemple pour éviter des adversaires, et pour ceux qui ont déjà eu un TCCL, pour éviter de se mettre dans des situations potentielles à risque d'autre blessure à la tête. Il est aussi possible que les altérations fonctionnelles soulevées puissent persister et être un facteur déterminant relié à de futures blessures potentielles et devraient être prises en compte lors de l'évaluation d'un possible retour aux activités quotidiennes ou au sport. Les résultats trouvés chez les athlètes ayant subi un TCCL sont très intéressants car ils nous ont permis de démontrer que malgré l'absence de symptômes post-commotionnels et le retour aux valeurs normales aux tests neuropsychologiques, les athlètes ont démontrés des altérations fonctionnelles comparativement au groupe contrôle, et ce plus de 30 jours suivant le trauma.

La dernière étude de cette thèse a été faite chez des enfants sains pratiquant le hockey sur glace. Nous avons voulu vérifier s'il est possible d'expérimenter directement dans un environnement écologique, tel que sur une patinoire de hockey sur glace. L'exécution d'un mouvement très spécialisé, comme le patinage en hockey sur glace, pendant l'évitement

d'un obstacle, tout en effectuant une tâche d'interférence demande une intégration rapide des informations et de grandes ressources attentionnelles.

Lorsqu'on augmente le nombre de tâches à effectuer, une diminution est normalement produite sur les performances physiques et cognitives chez les participants. Puisqu'au hockey chaque élément de performance est relativement dépendant de l'autre, on dénote une diminution de la capacité attentionnelle disponible pour chaque tâche (comme par exemple le maniement du bâton et la décision d'éviter un adversaire effectuée au même moment). Ceci pourrait être un facteur important pour des athlètes ayant subi un TCCL puisqu'il pourrait être plus difficile pour eux de gérer efficacement les ressources attentionnelles allouées à chaque tâche. Il est intéressant de voir que dans l'étude IV, même si le moyen de locomotion était différent (patinage au lieu de la marche), et que les enfants étaient sains, certains changements ont été mesurés lors de l'ajout de la tâche d'interférence.

Une différence observée entre les études avec la marche (I, II et III) et l'étude sur le patinage est que pour les enfants en patin, aucune différence ne fut trouvée par rapport aux côtés de l'évitement de l'obstacle, que ce soit au niveau de la vitesse de patinage ou de l'espace de dégagement dynamique. Lors de l'évitement de l'obstacle, la marge de dégagement dynamique a été augmentée pour les enfants qui patinaient lors de l'ajout d'une tâche d'interférence. Cette augmentation de la marge de dégagement pourrait indiquer que plus d'attention est requise lors de l'exécution de cette tâche.

## **7.2. Les forces et les faiblesses sur le plan méthodologique**

L'originalité des études composant cette thèse est certainement un point majeur et à souligner. En effet, le fait d'avoir démontré des altérations fonctionnelles chez des participants après leur trauma est une grande force de cette thèse. Ceci est particulièrement soulevé chez les athlètes ayant subi un TCCL depuis plus de trente jours et alors que les tests neuropsychologiques étaient revenus à leur valeur de base et qu'aucun symptôme n'était apparent. Ces résultats sont les premiers du genre dans le domaine des commotions

sportives. Une autre force est la quantité de données obtenues pour chacun des sujets permettant des conclusions basées sur de multiples variables en obtenant une bonne vue d'ensemble.

D'un autre côté, le petit nombre de participants aux diverses études, notamment dû aux critères de sélections très sévères est un point dont il faut tenir compte. Ceci nous amène donc à être prudents quant à la généralisation des propos tenus dans cette thèse. Il serait donc intéressant de refaire ces différentes études avec plus de participants ainsi qu'avec des enfants ayant subi un TCCL répliquant l'étude IV afin de pouvoir renforcer les résultats obtenus lors des études composant cette thèse.

### **7.3 Les retombées potentielles de l'étude et les pistes pour de futures recherches**

En comparant les performances locomotrices et cognitives séparément et de manière combinée avec une tâche d'interférence visuelle, il a été possible de souligner des altérations fonctionnelles chez plusieurs échantillons de population (adultes avec TCC, jeunes athlètes avec TCCL et enfants sains) en utilisant des données cliniques et de laboratoires combinées des quatre études composant cette thèse.



## Conclusion

Les travaux de cette thèse ont permis de démontrer que les personnes qui ont subi un TCC ont plus de difficulté à effectuer deux tâches ou plus simultanément, spécialement lorsque les tâches requises sont plus demandantes. Il semble aussi que les déficits des fonctions exécutives, plus particulièrement au niveau de la planification, sont évidents chez les athlètes ayant subi un TCCL ainsi que chez des adultes avec un TCC modéré ou sévère et ce, même si la capacité locomotrice est bien récupérée.

Cette thèse présente aussi une méthode novatrice qui pourrait se greffer à l'évaluation de la fonction locomotrice dans des environnements complexes et écologiques. De plus, cette méthodologie pourrait aussi aider les cliniciens à obtenir de l'information non-accessible avec les méthodes d'évaluation plus traditionnelles examinant les fonctions motrice et cognitive de manière indépendantes. Pour les personnes ayant subi un TCC modéré ou sévère et ayant des problèmes d'équilibre, un tel protocole pourrait être recommandé puisqu'il offre moins de contraintes au niveau de l'équilibre. D'autres parts, ce protocole pourrait aussi servir à déceler des déficits subtils chez des personnes ayant subi un TCCL.

Un tel protocole pourrait potentiellement être utilisé chez des jeunes athlètes ayant subi un TCCL afin d'en explorer les effets spécifiques dans leurs environnements spécifiques (patinoire, terrain de soccer, terrain de basketball, piste de course à pied ou autres). Les résultats des études de cette thèse suggèrent la nécessité du développement d'un protocole similaire servant à évaluer l'état intégré cognitif et moteur d'une personne avec un TCC avant de le retourner à ses activités de la vie quotidienne ou à son sport. Même sans des outils sophistiqués, une combinaison d'outils d'évaluation devraient être utilisés par les cliniciens afin d'avoir une décision éclairée afin de réduire les risques d'un TCC subséquent à court terme.

L'objectif à long terme de cette thèse pourrait orienter les recherches futures à développer un test axé sur la spécificité de la tâche qui introduit des aspects fonctionnels dans des environnements écologiques. Par exemple, comme pour l'étude IV, utiliser une patinoire pour des athlètes en hockey sur glace ou encore dans des environnements de travail spécifique pour des travailleurs ayant subi un TCC (par exemple un facteur ou un magasinier).

## Références

1. Maroon JC, Lovell MR, Norwig J, Podell K, Powell JW, Hartl R. Cerebral concussion in athletes: evaluation and neuropsychological testing. *Neurosurgery*. 2000 Septembre;47(3):659-669; discussion 669-672.
2. Shaw NA. The neurophysiology of concussion. *Progress in Neurobiology*. 2002 Juillet;67(4):281-344.
3. Gadoury M, Société de l'assurance automobile du Québec. Cadre de référence clinique pour l'élaboration de programmes de réadaptation pour la clientèle ayant subi un traumatisme crano-cérébral : adultes. 2 éd. Québec: Société de l'assurance automobile du Québec; 2001.
4. Gervais M, Dubé S. Étude exploratoire des besoins en services offerts à la clientèle traumatisée crano-cérébrale au Québec. Québec: Ministère de la santé et des services sociaux du Québec, le fonds de réadaptation de l'université Laval; 1999.
5. Teasdale G, Jennett B. Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet*. 1974 Juillet 13;2(7872):81-84.
6. Rimel RW, Giordani B, Barth JT, Boll TJ, Jane JA. Disability caused by minor head injury. *Neurosurgery*. 1981 Septembre;9(3):221-228.
7. Kushner D. Mild Traumatic Brain Injury: Toward Understanding Manifestations and Treatment. *Arch Intern Med*. 1998 Août 10;158(15):1617-1624.
8. van Balen HG, Mulder T, Keyser A. Towards a disability-oriented epidemiology of traumatic brain injury. *Disability and Rehabilitation*. 1996 Avril;18(4):181-190.
9. Palmer S, Bader MK, Qureshi A, Palmer J, Shaver T, Borzatta M, Stalcup C. The impact on outcomes in a community hospital setting of using the AANS traumatic brain injury guidelines. *American Association for Neurologic Surgeons. The Journal of Trauma*. 2001 Avril;50(4):657-664.
10. Kraus JF, McArthur DL, Silberman TA. Epidemiology of mild brain injury. *Seminars in Neurology*. 1994 Mars;14(1):1-7.
11. Hanlon RE, Demery JA, Martinovich Z, Kelly JP. Effects of acute injury characteristics on neuropsychological status and vocational outcome following mild traumatic brain injury. *Brain Injury: [BI]*. 1999 Novembre;13(11):873-887.
12. LeBlanc JM, Hayden ME, Paulman RG. A comparison of neuropsychological and situational assessment for predicting employability after closed head injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2000 Août;15(4):1022-1040.

13. Ghaffar O, McCullagh S, Ouchterlony D, Feinstein A. Randomized treatment trial in mild traumatic brain injury. *Journal of Psychosomatic Research*. 2006 Août;61(2):153-160.
14. Ruff RM, Iverson GL, Barth JT, Bush SS, Broshek DK. Recommendations for diagnosing a mild traumatic brain injury: a National Academy of Neuropsychology education paper. *Archives of Clinical Neuropsychology: The Official Journal of the National Academy of Neuropsychologists*. 2009 Février;24(1):3-10.
15. CDC - Injury - Traumatic Brain Injury. [Internet]. [cité 2010 Juillet 5]. Available from: <http://www.cdc.gov/traumaticbraininjury/>
16. Kibby MY, Long CJ. Minor head injury: attempts at clarifying the confusion. *Brain Injury*: [BI. 1996 Mars;10(3):159-186.
17. Solomon G, Johnston K, Lovell M. *The Heads-Up on Sport Concussion*. Human Kinetics. Champaign, Il; 2006.
18. Webbe FM. Definition, Physiology, and Severity of Cerebral Concussion. Dans: *Sports Neuropsychology: Assessment and Management of Traumatic Brain Injury*. Springer Publishing Company. New York: M. Horton and D. Wedding; 2007.
19. Moscato BS, Trevisan M, Willer BS. The prevalence of traumatic brain injury and co-occurring disabilities in a national household survey of adults. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*. 1994;6(2):134-142.
20. Feinstein A, Ouchterlony D, Somerville J, Jardine A. The effects of litigation on symptom expression: a prospective study following mild traumatic brain injury. *Medicine, Science, and the Law*. 2001 Avril;41(2):116-121.
21. Hoofien D, Gilboa A, Vakil E, Donovan PJ. Traumatic brain injury (TBI) 10-20 years later: a comprehensive outcome study of psychiatric symptomatology, cognitive abilities and psychosocial functioning. *Brain Injury*: [BI. 2001 Mars;15(3):189-209.
22. Johansson E, Rönkvist M, Fugl-Meyer AR. Traumatic brain injury in northern Sweden. Incidence and prevalence of long-standing impairments and disabilities. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*. 1991;23(4):179-185.
23. Kraus JF, Blander B, McArthur DL. Incidence, risk factors and prevention strategies for work-related assault injuries: a review of what is known, what needs to be known, and countermeasures for intervention. *Annual Review of Public Health*. 1995;16:355-379.
24. Kraus JF, Black MA, Hessol N, Ley P, Rokaw W, Sullivan C, Bowers S, Knowlton S, Marshall L. The incidence of acute brain injury and serious impairment in a defined population. *American Journal of Epidemiology*. 1984 Février;119(2):186-201.
25. Mazaux JM, Richer E. Rehabilitation after traumatic brain injury in adults. *Disability*

and Rehabilitation. 1998 Décembre;20(12):435-447.

26. Rice-Oxley M, Turner-Stokes L. Effectiveness of brain injury rehabilitation. *Clinical Rehabilitation*. 1999;13 Suppl 1:7-24.

27. Sample PL, Darragh AR. Perceptions of care access: the experience of rural and urban women following brain injury. *Brain Injury: [BI]*. 1998 Octobre;12(10):855-874.

28. Thurman D, Guerrero J. Trends in hospitalization associated with traumatic brain injury. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*. 1999 Septembre 8;282(10):954-957.

29. Vaughn SL, Frank RG, Leach LR, O'Neal G, Sylvester J. The public perception of head injury in Missouri. *Brain Injury: [BI]*. 1994 Mars;8(2):149-158.

30. Bourque C. Cadre de référence clinique pour l'élaboration de programmes de réadaptation pour la clientèle ayant subi un traumatisme cranio-cérébral : Volet enfants et adolescents. Québec: Société de l'assurance automobile du Québec; 1999.

31. Cassidy JD, Carroll LJ, Peloso PM, Borg J, von Holst H, Holm L, Kraus J, Coronado VG. Incidence, risk factors and prevention of mild traumatic brain injury: results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine: Official Journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2004 Février;(43 Suppl):28-60.

32. Holm L, Cassidy JD, Carroll LJ, Borg J. Summary of the WHO Collaborating Centre for Neurotrauma Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine: Official Journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2005 Mai;37(3):137-141.

33. Cassidy JD, Carroll LJ, Peloso PM, Borg J, von Holst H, Holm L, Kraus J, Coronado VG. Incidence, risk factors and prevention of mild traumatic brain injury: results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine: Official Journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2004 Février;(43 Suppl):28-60.

34. Ip RY, Dornan J, Schentag C. Traumatic brain injury: factors predicting return to work or school. *Brain Injury: [BI]*. 1995 Juillet;9(5):517-532.

35. Riley E. La régionalisation des services de réadaptation traumatologique : Travail d'analyse et de réflexion. 1993.

36. Brzuzy S, Speziale BA. Persons with traumatic brain injuries and their families: living arrangements and well-being post injury. *Social Work in Health Care*. 1997;26(1):77-88.

37. Jennett B. Epidemiology of head injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1996 Avril;60(4):362-369.

38. Alexander MP. Mild traumatic brain injury: pathophysiology, natural history, and clinical management. *Neurology*. 1995 Juillet;45(7):1253-60.
39. Kraus JF, Rock A, Hemyari P. Brain injuries among infants, children, adolescents, and young adults. *American Journal of Diseases of Children* (1960). 1990 Juin;144(6):684-691.
40. Greenspan AI. Functional recovery following head injury among children. *Current Problems in Pediatrics*. 1996 Juin;26(5):170-177.
41. Harrison-Felix C, Zafonte R, Mann N, Dijkers M, Englander J, Kreutzer J. Brain injury as a result of violence: preliminary findings from the traumatic brain injury model systems. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1998 Juillet;79(7):730-737.
42. Dawson DR, Chipman M. The disablement experienced by traumatically brain-injured adults living in the community. *Brain Injury: [BI]*. 1995 Juin;9(4):339-353.
43. Reynolds WE, Page SJ, Johnston MV. Coordinated and adequately funded state streams for rehabilitation of newly injured persons with tbi. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2001 Février;16(1):34-46.
44. Durgin CJ. Increasing community participation after brain injury: strategies for identifying and reducing the risks. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2000 Décembre;15(6):1195-1207.
45. Kreutzer JS, Wehman PH, Harris JA, Burns CT, Young HF. Substance abuse and crime patterns among persons with traumatic brain injury referred for supported employment. *Brain Injury: [BI]*. 1991 Juin;5(2):177-187.
46. Sarapata M, Herrmann D, Johnson T, Aycock R. The role of head injury in cognitive functioning, emotional adjustment and criminal behaviour. *Brain Injury: [BI]*. 1998 Octobre;12(10):821-842.
47. Barth J, Alves W, Ryan T, Macciocchi S, Rimel R, Jane J, Nelson W. Mild head injury in sports: Neuropsychological sequelae and recovery of function. Dans: *Mild head injury*. Oxford University Press US; 1989. p. 153-162.
48. Rimel RW, Giordani B, Barth JT, Boll TJ, Jane JA. Disability Caused by Minor Head Injury. *Neurosurgery* [Internet]. 1981;9(3). Available from: [http://journals.lww.com/neurosurgery/Fulltext/1981/09000/Disability\\_Caused\\_by\\_Minor\\_Head\\_Injury.1.aspx](http://journals.lww.com/neurosurgery/Fulltext/1981/09000/Disability_Caused_by_Minor_Head_Injury.1.aspx)
49. Barth JT, Macciocchi SN, Giordani B, Rimel R, Jane JA, Boll TJ. Neuropsychological sequelae of minor head injury. *Neurosurgery*. 1983 Novembre;13(5):529-533.
50. Macciocchi SN, Barth JT, Alves W, Rimel RW, Jane JA. Neuropsychological functioning and recovery after mild head injury in collegiate athletes. *Neurosurgery*. 1996

Septembre;39(3):510-514.

51. Lovell MR, Iverson GL, Collins MW, Podell K, Johnston KM, Pardini D, Pardini J, Norwig J, Maroon JC. Measurement of symptoms following sports-related concussion: reliability and normative data for the post-concussion scale. *Applied Neuropsychology*. 2006;13(3):166-174.
52. Moser RS, Schatz P, Jordan BD. Prolonged effects of concussion in high school athletes. *Neurosurgery*. 2005 Août;57(2):300-306; discussion 300-306.
53. Barth JT, Broshek D, Freeman JR. Sports: A new frontier for neuropsychology. Dans: *Sports neuropsychology: Assessment and management of traumatic brain injury*. Guilford. New York: R.J. Echemendia; 2006. p. 3-16.
54. Putukian M. Repeat mild traumatic brain injury: how to adjust return to play guidelines. *Current Sports Medicine Reports*. 2006 Février;5(1):15-22.
55. Cantu RC. Posttraumatic Retrograde and Anterograde Amnesia: Pathophysiology and Implications in Grading and Safe Return to Play. *Journal of Athletic Training*. 2001 Septembre;36(3):244-248.
56. Giza CC, Hovda DA. The Neurometabolic Cascade of Concussion. *Journal of Athletic Training*. 2001 Septembre;36(3):228-235.
57. Hovda DA, Lee SM, Smith ML, Von Stuck S, Bergsneider M, Kelly D, Shalmon E, Martin N, Caron M, Mazziotta J. The neurochemical and metabolic cascade following brain injury: moving from animal models to man. *Journal of Neurotrauma*. 1995 Octobre;12(5):903-906.
58. Hovda DA. Oxidative need and oxidative capacity following traumatic brain injury. *Critical Care Medicine*. 2007 Février;35(2):663-664.
59. Halbauer JD, Ashford JW, Zeitzer JM, Adamson MM, Lew HL, Yesavage JA. Neuropsychiatric diagnosis and management of chronic sequelae of war-related mild to moderate traumatic brain injury. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2009;46(6):757-796.
60. Chaput G, Giguère J, Chauny J, Denis R, Lavigne G. Relationship among subjective sleep complaints, headaches, and mood alterations following a mild traumatic brain injury. *Sleep Medicine*. 2009 Août;10(7):713-716.
61. Ashley MJ. *Traumatic Brain Injury: Rehabilitation, Treatment, and Case Management*. Taylor and Francis; 2009.
62. McCrory P, Meeuwisse W, Johnston K, Dvorak J, Aubry M, Molloy M, Cantu R. Consensus Statement on Concussion in Sport: the 3rd International Conference on Concussion in Sport held in Zurich, November 2008. *British Journal of Sports Medicine*.

2009 Mai;43 Suppl 1:i76-90.

63. Patel DR, Reddy V. Sport-related Concussion in Adolescents. *Pediatric Clinics of North America*. 2010 Juin;57(3):649-670.

64. Field M, Collins MW, Lovell MR, Maroon J. Does age play a role in recovery from sports-related concussion? A comparison of high school and collegiate athletes. *The Journal of Pediatrics*. 2003 Mai;142(5):546-553.

65. Van Kampen DA, Lovell MR, Pardini JE, Collins MW, Fu FH. The "value added" of neurocognitive testing after sports-related concussion. *The American Journal of Sports Medicine*. 2006 Octobre;34(10):1630-1635.

66. Echemendia RJ, Herring S, Bailes J. Who should conduct and interpret the neuropsychological assessment in sports-related concussion? *British Journal of Sports Medicine*. 2009 5;43(Suppl\_1):i32-i35.

67. Hillier SL, Sharpe MH, Metzger J. Outcomes 5 years post-traumatic brain injury (with further reference to neurophysical impairment and disability). *Brain Injury: [BI]*. 1997 Septembre;11(9):661-675.

68. Kushner D. Mild traumatic brain injury: toward understanding manifestations and treatment. *Archives of Internal Medicine*. 158(15):1617-24.

69. Capruso DX, Levin HS. Cognitive impairment following closed head injury. *Neurologic Clinics*. 1992 Novembre;10(4):879-893.

70. Cohen M, Oksenberg A, Snir D, Stern MJ, Groswasser Z. Temporally related changes of sleep complaints in traumatic brain injured patients. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1992 Avril;55(4):313-5.

71. Beetar JT, Guilmette TJ, Sparadeo FR. Sleep and pain complaints in symptomatic traumatic brain injury and neurologic populations. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1996 Décembre;77(12):1298-302.

72. Rao V, Rollings P. Sleep Disturbances Following Traumatic Brain Injury. *Current Treatment Options in Neurology*. 2002 Janvier;4(1):77-87.

73. Packard RC, Ham LP. Posttraumatic headache. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*. 1994;6(3):229-36.

74. Lane J, Arciniegas D. Post-traumatic Headache. *Current Treatment Options in Neurology*. 2002 Janvier;4(1):89-104.

75. Hurley R, Taber K. Emotional Disturbances Following Traumatic Brain Injury. *Current Treatment Options in Neurology*. 2002 Janvier;4(1):59-75.

76. Arciniegas, Topkoff, Silver. Neuropsychiatric Aspects of Traumatic Brain Injury. *Current Treatment Options in Neurology*. 2000 Mars;2(2):169-186.
77. Binder LM, Rohling ML, Larrabee GJ. A review of mild head trauma. Part I: Meta-analytic review of neuropsychological studies. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*. 1997 Juin;19(3):421-431.
78. Ponsford J, Willmott C, Rothwell A, Cameron P, Kelly AM, Nelms R, Curran C, Ng K. Factors influencing outcome following mild traumatic brain injury in adults. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*. 2000 Juillet;6(5):568-79.
79. Gasquoin PG. Postconcussion symptoms. *Neuropsychology Review*. 1997 Juin;7(2):77-85.
80. Acimovic M, Lemmon J, Keatley M. The importance of qualitative indicators in the assessment of mild brain injury. *J Cognitive Rehabil*. 1993:8-14.
81. Arciniegas D, Held K, Wagner P. Cognitive Impairment Following Traumatic Brain Injury. *Current Treatment Options in Neurology*. 2002 Janvier;4(1):43-57.
82. Mitrushina M, Boone K, Razani J, D'Elia L. Mitrushina, M., *Handbook of Normative Data for Neuropsychological Assessment*. Oxford University Press. New York: 2nd edition; 2005.
83. Dikmen S, Machamer J, Temkin N. Mild head injury: facts and artifacts. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*. 2001 Décembre;23(6):729-738.
84. Stuss DT, Floden D, Alexander MP, Levine B, Katz D. Stroop performance in focal lesion patients: dissociation of processes and frontal lobe lesion location. *Neuropsychologia*. 2001;39(8):771-86.
85. Bohnen N, Twijnstra A, Jolles J. Performance in the Stroop color word test in relationship to the persistence of symptoms following mild head injury. *Acta Neurologica Scandinavica*. 1992 Février;85(2):116-21.
86. Osimani A, Alon A, Berger A, Abarbanel JM. Use of the Stroop phenomenon as a diagnostic tool for malingering. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1997 Juin;62(6):617-21.
87. Gentilini M, Nichelli P, Schoenhuber R, Bortolotti P, Tonelli L, Falasca A, Merli GA. Neuropsychological evaluation of mild head injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1985 Février;48(2):137-40.
88. Leininger BE, Gramling SE, Farrell AD, Kreutzer JS, Peck EA. Neuropsychological deficits in symptomatic minor head injury patients after concussion and mild concussion. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1990 Avril;53(4):293-6.



89. Bernstein DM. Recovery from mild head injury. *Brain Injury: [BI]*. 1999 Mars;13(3):151-172.
90. Dikmen SS, Levin HS. Methodological issues in the study of mild head injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation [Internet]*. 1993;8(3). Available from: [http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1993/09000/Methodological\\_issues\\_in\\_the\\_study\\_of\\_mild\\_head.5.aspx](http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1993/09000/Methodological_issues_in_the_study_of_mild_head.5.aspx)
91. Gronwall D. Minor Head Injury. *Neuropsychology*. 1991 Octobre;5(4):253-265.
92. Kolb B. Mechanisms underlying recovery from cortical injury: reflections on progress and directions for the future. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 1992;325:169-186.
93. Roof RL, Hall ED. Estrogen-related gender difference in survival rate and cortical blood flow after impact-acceleration head injury in rats. *Journal of Neurotrauma*. 2000 Décembre;17(12):1155-1169.
94. Ruff RM, Levin HS, Marshall LF. Neurobehavioral methods of assessment and the study of outcome in minor head injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation [Internet]*. 1986;1(2). Available from: [http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1986/06000/Neurobehavioral\\_methods\\_of\\_assessment\\_and\\_the.8.aspx](http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1986/06000/Neurobehavioral_methods_of_assessment_and_the.8.aspx)
95. Gronwall D, Wrightson P. Delayed recovery of intellectual function after minor head injury. *Lancet*. 1974 Septembre 14;2(7881):605-609.
96. Hernandez TD, Heninger C, Wilson MA, Gallager DW. Relationship of agonist efficacy to changes in GABA sensitivity and anticonvulsant tolerance following chronic benzodiazepine ligand exposure. *European Journal of Pharmacology*. 1989 Novembre 7;170(3):145-155.
97. Phillips JP, Devier DJ, Feeney DM. Rehabilitation pharmacology: bridging laboratory work to clinical application. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2003 Août;18(4):342-356.
98. Vuadens P. [Role of drugs in recovery from brain damage]. *Revue Médicale De La Suisse Romande*. 2000 Septembre;120(9):717-724.
99. Ewing-Cobbs L, Fletcher JM, Levin HS, Francis DJ, Davidson K, Miner ME. Longitudinal neuropsychological outcome in infants and preschoolers with traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*. 1997 Novembre;3(6):581-591.
100. Anderson VA, Catroppa C, Rosenfeld J, Haritou F, Morse SA. Recovery of memory function following traumatic brain injury in pre-school children. *Brain Injury: [BI]*. 2000 Août;14(8):679-692.

101. Witte OW. Lesion-induced plasticity as a potential mechanism for recovery and rehabilitative training. *Current Opinion in Neurology*. 1998 Décembre;11(6):655-662.
102. Demeurisse G. Mechanisms of functional restoration after brain injury. *Acta Neurologica Belgica*. 2000 Juin;100(2):77-83.
103. Mattson MP, Scheff SW. Endogenous neuroprotection factors and traumatic brain injury: mechanisms of action and implications for therapy. *Journal of Neurotrauma*. 1994 Février;11(1):3-33.
104. Ghirnikar RS, Lee YL, Eng LF. Inflammation in traumatic brain injury: role of cytokines and chemokines. *Neurochemical Research*. 1998 Mars;23(3):329-340.
105. Raivich G, Bohatschek M, Kloss CU, Werner A, Jones LL, Kreutzberg GW. Neuroglial activation repertoire in the injured brain: graded response, molecular mechanisms and cues to physiological function. *Brain Research. Brain Research Reviews*. 1999 Juillet;30(1):77-105.
106. Koshinaga M, Katayama Y, Fukushima M, Oshima H, Suma T, Takahata T. Rapid and widespread microglial activation induced by traumatic brain injury in rat brain slices. *Journal of Neurotrauma*. 2000 Mars;17(3):185-192.
107. Clark RS, Kochanek PM, Chen M, Watkins SC, Marion DW, Chen J, Hamilton RL, Loeffert JE, Graham SH. Increases in Bcl-2 and cleavage of caspase-1 and caspase-3 in human brain after head injury. *The FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*. 1999 Mai;13(8):813-821.
108. Graham SH, Chen J, Clark RS. Bcl-2 family gene products in cerebral ischemia and traumatic brain injury. *Journal of Neurotrauma*. 2000 Octobre;17(10):831-841.
109. Zipfel GJ, Babcock DJ, Lee JM, Choi DW. Neuronal apoptosis after CNS injury: the roles of glutamate and calcium. *Journal of Neurotrauma*. 2000 Octobre;17(10):857-869.
110. Ridet JL, Malhotra SK, Privat A, Gage FH. Reactive astrocytes: cellular and molecular cues to biological function. *Trends in Neurosciences*. 1997 Décembre;20(12):570-577.
111. Bush TG, Puvanachandra N, Horner CH, Polito A, Ostefeld T, Svendsen CN, Mucke L, Johnson MH, Sofroniew MV. Leukocyte infiltration, neuronal degeneration, and neurite outgrowth after ablation of scar-forming, reactive astrocytes in adult transgenic mice. *Neuron*. 1999 Juin;23(2):297-308.
112. Fawcett JW, Asher RA. The glial scar and central nervous system repair. *Brain Research Bulletin*. 1999 Août;49(6):377-391.
113. Duff D. Review article: altered states of consciousness, theories of recovery, and

assessment following a severe traumatic brain injury. *Axone* (Dartmouth, N.S.). 2001 Septembre;23(1):18-23.

114. Christensen A, Uzzell BP. *International handbook of neuropsychological rehabilitation*. Springer; 2000.

115. Bach-y-Rita P. Theoretical basis for brain plasticity after a TBI. *Brain Injury: [BI]*. 2003 Août;17(8):643-651.

116. Katz DI, Alexander MP. Traumatic brain injury. Predicting course of recovery and outcome for patients admitted to rehabilitation. *Archives of Neurology*. 1994 Juillet;51(7):661-670.

117. Katz DI, White DK, Alexander MP, Klein RB. Recovery of ambulation after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2004 Juin;85(6):865-869.

118. Swaine BR, Sullivan SJ. Longitudinal profile of early motor recovery following severe traumatic brain injury. *Brain Injury: [BI]*. 1996 Mai;10(5):347-366.

119. Vallée M, McFadyen BJ, Swaine B, Doyon J, Cantin J, Dumas D. Effects of environmental demands on locomotion after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2006 Juin;87(6):806-13.

120. Stuss DT, Buckle L. Traumatic brain injury: Neuropsychological deficits and evaluation at different stages of recovery and in different pathologic subtypes. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation [Internet]*. 1992;7(2). Available from: [http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1992/06000/Traumatic\\_brain\\_injury\\_\\_Neuropsychological.7.aspx](http://journals.lww.com/headtraumarehab/Fulltext/1992/06000/Traumatic_brain_injury__Neuropsychological.7.aspx)

121. Dikmen SS, Corrigan JD, Levin HS, Machamer J, Stiers W, Weisskopf MG. Cognitive outcome following traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2009 Décembre;24(6):430-438.

122. Dikmen SS, Machamer JE, Powell JM, Temkin NR. Outcome 3 to 5 years after moderate to severe traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003 Octobre;84(10):1449-1457.

123. Bredin J, Kerlirzin Y, Israël I. Path integration: is there a difference between athletes and non-athletes? *Experimental Brain Research*. 2005 Décembre 1;167(4):670-674.

124. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley and Sons; 2009.

125. Donelan JM, Kram R, Kuo AD. Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of the metabolic cost of human walking. *J Exp Biol*. 2002 Décembre 1;205(23):3717-3727.

126. Shik ML, Orlovsky GN. Neurophysiology of locomotor automatism. *Physiological Reviews*. 1976 Juillet;56(3):465-501.
127. Grillner S, Perret C, Zangger P. Central generation of locomotion in the spinal dogfish. *Brain Research*. 1976 Juin 11;109(2):255-69.
128. Pearson K. The control of walking. *Scientific American*. 1976 Décembre;235(6):72-4, 79-82, 83-6.
129. Grillner S, Zangger P. On the central generation of locomotion in the low spinal cat. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 1979 Janvier 15;34(2):241-261.
130. Bradford McFadyen, Bélanger M. Neuromechanical concepts for the assessment of the control of human gait. Dans: *Three-dimensional analysis of locomotion*. John Wiley and Sons. Toronto: Allard, P., Cappozzo Lundberg, A., and Vaughan, C; 1997. p. 49-66.
131. Zehr EP, Stein RB. What functions do reflexes serve during human locomotion? *Progress in Neurobiology*. 1999 Juin;58(2):185-205.
132. Gibson JJ. The relation between visual and postural determinants of the phenomenal vertical. *Psychological Review*. 1952 Septembre;59(5):370-375.
133. Gibson JJ. Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*. 1958 Août;49(3):182-194.
134. Lee DN, Young DS. Gearing action to the environment. *Generation and modulation of action patterns*. 1986:217-230.
135. Lackner JR, DiZio P. Visual stimulation affects the perception of voluntary leg movements during walking. *Perception*. 1988;17(1):71 - 80.
136. Pailhous J, Ferrandez A, Flückiger M, Baumberger B. Unintentional modulations of human gait by optical flow. *Behavioural Brain Research*. 1990 Mai 28;38(3):275-281.
137. Warren WH, Kay BA, Zosh WD, Duchon AP, Sahuc S. Optic flow is used to control human walking. *Nat Neurosci*. 2001 Février;4(2):213-216.
138. Bent L, Inglis J, McFadyen B. Vestibular contributions across the execution of a voluntary forward step. *Experimental Brain Research*. 2002 Mars 1;143(1):100-105.
139. Patla AE, Prentice SD, Robinson C, Neufeld J. Visual Control of Locomotion: Strategies for Changing Direction and for Going Over Obstacles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1991 Août;17(3):603-634.
140. Basford JR, Chou L, Kaufman KR, Brey RH, Walker A, Malec JF, Moessner AM, Brown AW. An assessment of gait and balance deficits after traumatic brain injury.

Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2003 Mars;84(3):343-9.

141. McFadyen BJ, Swaine B, Dumas D, Durand A. Residual effects of a traumatic brain injury on locomotor capacity: a first study of spatiotemporal patterns during unobstructed and obstructed walking. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2003;18(6):512-25.

142. Chou L, Kaufman KR, Walker-Rabatin AE, Brey RH, Basford JR. Dynamic instability during obstacle crossing following traumatic brain injury. *Gait & Posture*. 2004 Décembre;20(3):245-54.

143. Ochi F, Esquenazi A, Hirai B, Talaty M. Temporal-spatial feature of gait after traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 1999 Avril;14(2):105-115.

144. Ebersbach G, Dimitrijevic MR, Poewe W. Influence of concurrent tasks on gait: a dual-task approach. *Perceptual and Motor Skills*. 1995 Août;81(1):107-113.

145. Parker TM, Osternig LR, VAN Donkelaar P, Chou L. Gait stability following concussion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2006 Juin;38(6):1032-40.

146. Patla AE. Understanding the roles of vision in the control of human locomotion. *Gait & Posture*. 1997 Février;5(1):54-69.

147. Grasso R, Glasauer S, Takei Y, Berthoz A. The predictive brain: anticipatory control of head direction for the steering of locomotion. *Neuroreport*. 1996 Avril 26;7(6):1170-1174.

148. Pozzo T, Berthoz A, Lefort L. Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 1990;82(1):97-106.

149. Pozzo T, Berthoz A, Lefort L, Vitte E. Head stabilization during various locomotor tasks in humans. II. Patients with bilateral peripheral vestibular deficits. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 1991;85(1):208-217.

150. Hollands MA, Patla AE, Vickers JN. "Look where you're going!": gaze behaviour associated with maintaining and changing the direction of locomotion. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 2002 Mars;143(2):221-230.

151. Vallis LA, McFadyen BJ. Locomotor adjustments for circumvention of an obstacle in the travel path. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 2003 Octobre;152(3):409-14.

152. Gérin-Lajoie M, Richards CL, McFadyen BJ. The negotiation of stationary and moving obstructions during walking: anticipatory locomotor adaptations and preservation

of personal space. *Motor Control*. 2005 Juillet;9(3):242-69.

153. Gérin-Lajoie M, Richards CL, Fung J, McFadyen BJ. Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments. *Gait & Posture*. 2008 Février;27(2):239-47.

154. Gérin-Lajoie M, Ronsky JL, Loitz-Ramage B, Robu I, Richards CL, McFadyen BJ. Navigational strategies during fast walking: a comparison between trained athletes and non-athletes. *Gait & Posture*. 2007 Octobre;26(4):539-45.

155. Gérin-Lajoie M, Richards CL, McFadyen BJ. The circumvention of obstacles during walking in different environmental contexts: a comparison between older and younger adults. *Gait & Posture*. 2006 Novembre;24(3):364-9.

156. Catena RD, van Donkelaar P, Chou L. Altered balance control following concussion is better detected with an attention test during gait. *Gait & Posture*. 2007 Mars;25(3):406-11.

157. Geurts AC, Ribbers GM, Knoop JA, van Limbeek J. Identification of static and dynamic postural instability following traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1996 Juillet;77(7):639-44.

158. Geurts AC, Knoop JA, van Limbeek J. Is postural control associated with mental functioning in the persistent postconcussion syndrome? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1999 Février;80(2):144-9.

159. Guskiewicz KM, Perrin DH, Gansneder BM. Effect of Mild Head Injury on Postural Stability in Athletes. *Journal of Athletic Training*. 1996 10;31(4):300-306.

160. Ingersoll CD, Armstrong CW. The effects of closed-head injury on postural sway. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1992 Juillet;24(7):739-43.

161. Lahat E, Barr J, Klin B, Dvir Z, Bistrizer T, Eshel G. Postural stability by computerized posturography in minor head trauma. *Pediatric Neurology*. 1996 Novembre;15(4):299-301.

162. Lehmann JF, Boswell S, Price R, Burleigh A, deLateur BJ, Jaffe KM, Hertling D. Quantitative evaluation of sway as an indicator of functional balance in post-traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1990 Novembre;71(12):955-62.

163. Rubin AM, Woolley SM, Dailey VM, Goebel JA. Postural stability following mild head or whiplash injuries. *The American Journal of Otology*. 1995 Mars;16(2):216-21.

164. Wade LD, Canning CG, Fowler V, Felmingham KL, Baguley IJ. Changes in postural sway and performance of functional tasks during rehabilitation after traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1997 Octobre;78(10):1107-11.

165. Wöber C, Oder W, Kollegger H, Prayer L, Baumgartner C, Wöber-Bingöl C, Wimberger D, Binder H, Deecke L. Posturographic measurement of body sway in survivors of severe closed head injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1993 Novembre;74(11):1151-6.
166. Guskiewicz KM, Ross SE, Marshall SW. Postural Stability and Neuropsychological Deficits After Concussion in Collegiate Athletes. *Journal of Athletic Training*. 2001;36(3):263-273.
167. Lajoie Y, Teasdale N, Bard C, Fleury M. Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*. *Experimentelle Hirnforschung*. *Expérimentation Cérébrale*. 1993;97(1):139-144.
168. Weerdesteyn V, Schillings AM, van Galen GP, Duysens J. Distraction affects the performance of obstacle avoidance during walking. *Journal of Motor Behavior*. 2003 Mars;35(1):53-63.
169. Siu K, Catena RD, Chou L, van Donkelaar P, Woollacott MH. Effects of a secondary task on obstacle avoidance in healthy young adults. *Experimental Brain Research*. *Experimentelle Hirnforschung*. *Expérimentation Cérébrale*. 2008 Janvier;184(1):115-20.
170. Fait P, McFadyen BJ, Swaine B, Cantin JF. Alterations to locomotor navigation in a complex environment at 7 and 30 days following a concussion in an elite athlete. *Brain Injury*. 2009 Avril;23(4):362-369.
171. Styles EA. *The psychology of attention*. Psychology Press; 1997.
172. Posner MI. Attention: the mechanisms of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1994 Août 2;91(16):7398-7403.
173. Posner MI, Petersen SE. The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*. 1990;13:25-42.
174. Pashler HE. *Attention*. Psychology Press; 1998.
175. Woollacott M, Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & Posture*. 2002 Août;16(1):1-14.
176. Willis WG. Neurological models of cognitive processing. *Learning and Individual Differences*. 1989;1(4):371-383.
177. Lezak MD. *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press US; 2004.
178. Bardy BG, Laurent M. Visual cues and attention demand in locomotor positioning. *Perceptual and Motor Skills*. 1991 Juin;72(3 Pt 1):915-926.
179. Yogev G, Plotnik M, Peretz C, Giladi N, Hausdorff JM. Gait asymmetry in patients

- with Parkinson's disease and elderly fallers: when does the bilateral coordination of gait require attention? *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 2007 Mars;177(3):336-346.
180. Chen HC, Schultz AB, Ashton-Miller JA, Giordani B, Alexander NB, Guire KE. Stepping over obstacles: dividing attention impairs performance of old more than young adults. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*. 1996 Mai;51(3):M116-122.
181. Kurosawa K. Effects of various walking speeds on probe reaction time during treadmill walking. *Perceptual and Motor Skills*. 1994 Juin;78(3 Pt 1):768-770.
182. Chen J, Johnston KM, Petrides M, Ptito A. Recovery from mild head injury in sports: evidence from serial functional magnetic resonance imaging studies in male athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 2008 Mai;18(3):241-7.
183. Williams G, Robertson V, Greenwood K. Measuring high-level mobility after traumatic brain injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation / Association of Academic Physiatrists*. 2004 Décembre;83(12):910-920.
184. Tappan RS. Rehabilitation for balance and ambulation in a patient with attention impairment due to intracranial hemorrhage. *Physical Therapy*. 2002 Mai;82(5):473-484.
185. Quinn B, Sullivan SJ. The identification by physiotherapists of the physical problems resulting from a mild traumatic brain injury. *Brain Injury: [BI]*. 2000 Décembre;14(12):1063-1076.
186. Levin HS, Grossman RG, Rose JE, Teasdale G. Long-term neuropsychological outcome of closed head injury. *Journal of Neurosurgery*. 1979 Avril;50(4):412-422.
187. Halterman CI, Langan J, Drew A, Rodriguez E, Osternig LR, Chou L, van Donkelaar P. Tracking the recovery of visuospatial attention deficits in mild traumatic brain injury. *Brain: A Journal of Neurology*. 2006 Mars;129(Pt 3):747-53.
188. van Donkelaar P, Langan J, Rodriguez E, Drew A, Halterman C, Osternig LR, Chou L. Attentional deficits in concussion. *Brain Injury: [BI]*. 2005 Novembre;19(12):1031-9.
189. van Donkelaar P, Osternig L, Chou L. Attentional and biomechanical deficits interact after mild traumatic brain injury. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2006 Avril;34(2):77-82.
190. Golden C. *The Stroop Color and Word Test*. Stoelting Company. Chicago, IL; 1978.
191. Williams G, Galna B, Morris ME, Olver J. Spatiotemporal Deficits and Kinematic Classification of Gait Following a Traumatic Brain Injury: A Systematic Review. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2010 Février 4.



192. Whiteneck GG, Gerhart KA, Cusick CP. Identifying environmental factors that influence the outcomes of people with traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2004 Jun;19(3):191-204.
193. McFadyen BJ, Cantin J, Swaine B, Duchesneau G, Doyon J, Dumas D, Fait P. Modality-specific, multitask locomotor deficits persist despite good recovery after a traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2009 Septembre;90(9):1596-1606.
194. Springer BA, Marin R, Cyhan T, Roberts H, Gill NW. Normative values for the unipedal stance test with eyes open and closed. *Journal of Geriatric Physical Therapy* (2001). 2007;30(1):8-15.
195. Hill KD, Bernhardt J, McGann A, Maltese D, Berkovits D. A New Test of Dynamic Standing Balance for Stroke Patients: Reliability, Validity and Comparison with Healthy Elderly. *Physiotherapy Canada*. 1996 Janvier 1;48(4):257-262.
196. Dite W, Temple VA. A clinical test of stepping and change of direction to identify multiple falling older adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2002 Novembre;83(11):1566-1571.
197. Shumway-Cook A, Baldwin M, Polissar NL, Gruber W. Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults. *Physical Therapy*. 1997 Août;77(8):812-819.
198. Hill KD, Branch APAV, Group APANS. Manual for clinical outcome measurement in adult neurological physiotherapy. Australian Physiotherapy Association Neurology Special Group (Victoria); 2001.
199. Wechsler D. Wechsler Memory Scale. 3 éd. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 1997.
200. Smith A. Symbol Digit Modalities Test Manual. Western Psychological Services. Los Angeles, CA; 1982.
201. Delis DC, Kramer JH, Kaplan E, Holdnack J. Reliability and validity of the Delis-Kaplan Executive Function System: an update. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*. 2004 Mars;10(2):301-3.
202. Robertson I, Ward T, Ridgeway V, Nimmo-Smith I. The Test of Everyday Attention. Thames Valley Test Company. Bury St Edmunds; 1994.
203. Miller E. CalCAP: California Computerized Assessment Package (manual). Los Angeles: Norland Software; 2002.
204. Niemann H, Ruff RM, Kramer JH. An attempt towards differentiating attentional deficits in traumatic brain injury. *Neuropsychology Review*. 1996 Mars;6(1):11-46.

205. van Reekum R, Cohen T, Wong J. Can traumatic brain injury cause psychiatric disorders? *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*. 2000;12(3):316-327.
206. Yardley L, Redfern MS. Psychological factors influencing recovery from balance disorders. *Journal of Anxiety Disorders*. 2001 Avril;15(1-2):107-119.
207. Standaert CJ, Herring SA, Cantu RC. Expert opinion and controversies in sports and musculoskeletal medicine: concussion in the young athlete. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2007 Août;88(8):1077-9.
208. Notebaert AJ, Guskiewicz KM. Current trends in athletic training practice for concussion assessment and management. *Journal of Athletic Training*. 2005 Décembre;40(4):320-325.
209. Belanger HG, Vanderploeg RD. The neuropsychological impact of sports-related concussion: a meta-analysis. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*. 2005 Juillet;11(4):345-57.
210. Echemendia R, Putukian M, Mackin RS, Julian L, Shoss N. Neuropsychological test performance prior to and following sports-related mild traumatic brain injury. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 2001 Janvier;11(1):23-31.
211. McCrea M, Guskiewicz KM, Marshall SW, Barr W, Randolph C, Cantu RC, Onate JA, Yang J, Kelly JP. Acute effects and recovery time following concussion in collegiate football players: the NCAA Concussion Study. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*. 2003 Novembre 19;290(19):2556-63.
212. McCrea M, Barr WB, Guskiewicz K, Randolph C, Marshall SW, Cantu R, Onate JA, Kelly JP. Standard regression-based methods for measuring recovery after sport-related concussion. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*. 2005 Janvier;11(1):58-69.
213. Green P, Iverson GL. Validation of the computerized assessment of response bias in litigating patients with head injuries. *The Clinical Neuropsychologist*. 2001 Décembre;15(4):492-497.
214. De Beaumont L, Brisson B, Lassonde M, Jolicoeur P. Long-term electrophysiological changes in athletes with a history of multiple concussions. *Brain Injury: [BI]*. 2007 Juin;21(6):631-44.
215. Guskiewicz KM, McCrea M, Marshall SW, Cantu RC, Randolph C, Barr W, Onate JA, Kelly JP. Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players: the NCAA Concussion Study. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*. 2003;290(19):2549-55.

216. Bleiberg J, Cernich AN, Cameron K, Sun W, Peck K, Ecklund PJ, Reeves D, Uhorchak J, Sparling MB, Warden DL. Duration of cognitive impairment after sports concussion. *Neurosurgery*. 2004 Mai;54(5):1073-78; discussion 1078-80.
217. Collie A, Makdissi M, Maruff P, Bennell K, McCrory P. Cognition in the days following concussion: comparison of symptomatic versus asymptomatic athletes. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 2006 Février;77(2):241-5.
218. Peterson CL, Ferrara MS, Mrazik M, Piland S, Elliott R. Evaluation of neuropsychological domain scores and postural stability following cerebral concussion in sports. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 2003 Juillet;13(4):230-7.
219. Johnston KM, McCrory P, Mohtadi NG, Meeuwisse W. Evidence-Based review of sport-related concussion: clinical science. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 2001 Juillet;11(3):150-9.
220. Wojtys EM, Hovda D, Landry G, Boland A, Lovell M, McCrea M, Minkoff J. Current concepts. Concussion in sports. *The American Journal of Sports Medicine*. 1999 Octobre;27(5):676-687.
221. Guskiewicz KM. Postural stability assessment following concussion: one piece of the puzzle. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*. 2001 Juillet;11(3):182-9.
222. Parker TM, Osternig LR, Lee H, Donkelaar PV, Chou L. The effect of divided attention on gait stability following concussion. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*. 2005 Mai;20(4):389-95.
223. Riemann B, Guskiewicz K, Shields E. Relationship between clinical and forceplate measures of postural stability. *J Sport Rehabil*. 1999;8:71-82.
224. Wechsler D. *Wechsler Adult Intelligence Scale: Administration and scoring manual*. 3 éd. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 1997.
225. Brown J. Some tests of the decay theory of immediate memory. *Quarterly journal of experimental psychology*. 1958;10:12-21.
226. Gronwall DM. Paced auditory serial-addition task: a measure of recovery from concussion. *Perceptual and Motor Skills*. 1977 Avril;44(2):367-373.
227. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971 Mars;9(1):97-113.
228. Wai-Hang JL. Are You Left-handed? Footedness Questionnaire. *The world of handedness [Internet]*. 2002 [cité 2008 Septembre]

- 12]. Available from: [www.jackielam.net/handedness/test\\_foot.htm](http://www.jackielam.net/handedness/test_foot.htm)
229. Keatley MA. Symptom Questionnaire. 2000.
230. Thompson JW. EEG Changes and Balance Deficits Following Concussion: One Piece of the Puzzle. Dans: *Foundations of Sport-Related Brain Injuries.* ; 2006. p. 341-374. Available from: [http://dx.doi.org/10.1007/0-387-32565-4\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/0-387-32565-4_15)
231. Hugenholtz H, Stuss DT, Stethem LL, Richard MT. How long does it take to recover from a mild concussion? *Neurosurgery.* 1988 Mai;22(5):853-858.
232. Heitger MH, Anderson TJ, Jones RD, Dalrymple-Alford JC, Frampton CM, Ardagh MW. Eye movement and visuomotor arm movement deficits following mild closed head injury. *Brain: A Journal of Neurology.* 2004 Mars;127(Pt 3):575-590.
233. Heitger MH, Jones RD, Dalrymple-Alford JC, Frampton CM, Ardagh MW, Anderson TJ. Motor deficits and recovery during the first year following mild closed head injury. *Brain Injury: [BI.* 2006 Juillet;20(8):807-824.
234. Slobounov SM, Sebastianelli WJ. *Foundations of Sport-Related Brain Injuries.* 1er éd. Springer; 2006.
235. Randolph C. Implementation of Neuropsychological Testing Models for the High School, Collegiate, and Professional Sport Settings. *Journal of Athletic Training.* 2001 Septembre;36(3):288-296.
236. Covassin T, Swanik CB, Sachs ML. Epidemiological considerations of concussions among intercollegiate athletes. *Applied Neuropsychology.* 2003;10(1):12-22.
237. From the Centers for Disease Control and Prevention. Sports-related recurrent brain injuries--United States. *JAMA: The Journal of the American Medical Association.* 1997 Avril 16;277(15):1190-1.
238. McCrory P, Johnston K, Meeuwisse W, Aubry M, Cantu R, Dvorak J, Graf-Baumann T, Kelly J, Lovell M, Schamasch P. Summary and agreement statement of the 2nd International Conference on Concussion in Sport, Prague 2004. *British Journal of Sports Medicine.* 2005;39(4):196-204.
239. Guskiewicz KM, Weaver NL, Padua DA, Garrett WE. Epidemiology of concussion in collegiate and high school football players. *The American Journal of Sports Medicine.* 2000;28(5):643-50.
240. Wojtys EM, Hovda D, Landry G, Boland A, Lovell M, McCrea M, Minkoff J. Current concepts. Concussion in sports. *The American Journal of Sports Medicine.* 27(5):676-87.
241. Levin HS, Mattis S, Ruff RM, Eisenberg HM, Marshall LF, Tabaddor K, High WM, Frankowski RF. Neurobehavioral outcome following minor head injury: a three-center

study. *Journal of Neurosurgery*. 1987 Février;66(2):234-43.

242. Collins MW, Grindel SH, Lovell MR, Dede DE, Moser DJ, Phalin BR, Nogle S, Wasik M, Cordry D, Daugherty KM, et al. Relationship between concussion and neuropsychological performance in college football players. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*. 1999 Septembre 8;282(10):964-70.

243. Leavitt JL. Cognitive demands of skating and stickhandling in ice hockey. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien Des Sciences Appliquées Au Sport*. 1979 Mars;4(1):46-55.

244. Abernethy B. Dual-task methodology and motor skills research: some applications and methodological constraints. *Journal of Human Movement Studies*. 1988;14:101-132.

245. McCulloch K. Attention and dual-task conditions: physical therapy implications for individuals with acquired brain injury. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT*. 2007 Septembre;31(3):104-118.

246. Stroop J. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*. 1935;18:643-662.

247. Björklund A, Gage FH. Grafts of fetal septal cholinergic neurons to the hippocampal formation in aged or fimbria-fornix lesioned rats. *Progress in Brain Research*. 1987;72:333-342.

248. Guttentag RE. Processing relational and item-specific information: effects of aging and division of attention. *Canadian Journal of Psychology*. 1988 Décembre;42(4):414-423.

249. Irwin-Chase H, Burns B. Developmental Changes in Children's Abilities to Share and Allocate Attention in a Dual Task, *Journal of Experimental Child Psychology*. 2000 Septembre;77(1):61-85.

250. Karatekin C. Development of attentional allocation in the dual task paradigm. *International Journal of Psychophysiology*. 2004 Mars;52(1):7-21.

251. Miller PH, Seier WL, Probert JS, Aloise PA. Age differences in the capacity demands of a strategy among spontaneously strategic children. *Journal of Experimental Child Psychology*. 1991 Octobre;52(2):149-165.

252. Schaefer S, Krampe RT, Lindenberger U, Baltes PB. Age differences between children and young adults in the dynamics of dual-task prioritization: body (balance) versus mind (memory). *Developmental Psychology*. 2008 Mai;44(3):747-757.

253. Huang H, Mercer VS, Thorpe DE. Effects of different concurrent cognitive tasks on temporal-distance gait variables in children. *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association*. 2003;15(2):105-113.

254. Laufer Y, Ashkenazi T, Josman N. The effects of a concurrent cognitive task on the postural control of young children with and without developmental coordination disorder. *Gait & Posture*. 2008 Février;27(2):347-351.
255. Smith MD, Chamberlin CJ. Effect of adding cognitively demanding tasks on soccer skill performance. *Perceptual and Motor Skills*. 1992 Décembre;75(3 Pt 1):955-961.
256. Siu K, Catena RD, Chou L, van Donkelaar P, Woollacott MH. Effects of a secondary task on obstacle avoidance in healthy young adults. *Experimental Brain Research*. *Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*. 2008 Janvier;184(1):115-120.
257. Hollman JH, Kovash FM, Kubik JJ, Linbo RA. Age-related differences in spatiotemporal markers of gait stability during dual task walking. *Gait & Posture*. 2007 Juin;26(1):113-119.
258. Francis DJ, Fletcher JM, Rourke BP. Discriminant validity of lateral sensorimotor tests in children. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*. 1988 Décembre;10(6):779-799.
259. Rourke B, Strang J. Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Motor, psychomotor, and tactile-perceptual abilities. *Journal of Pediatric Psychology*. 1978;3:62-66.
260. Rourke B, Telegdy G. Lateralizing significance of WISC verbal-performance discrepancies for older children with learning disabilities. *Perceptual and Motor Skills*. 1971;33:875-883.
261. Parker TM, Osternig LR, van Donkelaar P, Chou L. Recovery of cognitive and dynamic motor function following concussion. *British Journal of Sports Medicine*. 2007 Décembre;41(12):868-73; discussion 873.

**Annexe 1**  
**Certificats d'éthique**



## CERTIFICAT D'ÉTHIQUE

Québec, le 30 novembre 2009

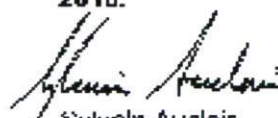
À la lumière des informations qui nous ont été transmises, les membres du comité d'éthique de la recherche de l'Institut de réadaptation en déficience physique de Québec vous autorisent à poursuivre le projet de recherche #2006-86 « Effets d'une division d'attention pendant le contournement d'obstacles fixes et mobiles chez des sujets ayant subi un traumatisme craniocérébral (commotion cérébrale sportive) ».

**Soumis par : Philippe Fait, M. Sc., étudiant au doctorat  
Bradford J. McFadyen, Ph. D.**

Les membres du comité d'éthique de la recherche sont :

- Sylvain Auclair (spécialiste en éthique)
- Thérèse Brousseau (représentante des gestionnaires cliniques)
- Marlène Cadorello (spécialiste en droit)
- Lucie D'Anjou (représentante d'usagers)
- Claude Lépine (représentant des usagers)
- Stéphanie Poltro (représentant des usagers)
- March Truchon (personne ayant une vaste connaissance des méthodes ou des domaines de recherche)
- Jacques Yachon (personne ayant une vaste connaissance des méthodes ou des domaines de recherche)

Nous certifions que cette recherche est conforme aux exigences du comité d'éthique de la recherche et qu'elle est renouvelée **Jusqu'au 3 novembre 2010.**

  
Sylvain Auclair  
Président  
Comité d'éthique de la recherche





University of Toronto  
Office of the Vice-President, Research

Office of Research Ethics

PROTOCOL REFERENCE #20747, #21527, #22458, #22819

June 10, 2008

Dr. Michelle Keightley  
Occupational Therapy  
Rehabilitation Sciences Bldg.  
500 University Ave.  
University of Toronto  
Toronto M5G 1V7

Dear Dr. Keightley:

Re: Your research protocol entitled "An Investigation of the Clinical Implications of Sports-Related Concussion in Children and Youth" (Amendment application received May 14, 2008, revisions received June 10, 2008) by Dr. M. Keightley

We are writing to advise you that a member of the Health Sciences Research Ethics Board has granted approval to an amendment to the above referenced research study under the REB's expedited review process. *This amendment will allow for the additional of another functional assessment involving several tasks that will measure skating and navigational skills; subjects will be videotaped while completing these tasks, and completion of these tasks will add one hour in addition to the one hour FAST test, for a total of 2 hours on-ice functional assessment. This will be pilot tested on approximately 6 – 7 participants of the same age.*

The following consent documents (revised versions received June 10, 2008) have been approved for use in this study: Consent Form (App K) and Assent Form (App L).

**Any changes to the approved protocol or consent materials must be reviewed and approved through the amendment process prior to its implementation. Any adverse or unanticipated events should be reported to the Office of Research Ethics as soon as possible.**

Best wishes for the successful completion of your project.

Yours sincerely,

Marianna Richardson  
Research Ethics Coordinator

## **Annexe 2**

### **Formulaire d'information et de consentement**



## Feuille d'information

**N° DU PROJET :** 2006-86 (réservé à l'administration)

### TITRE DU PROJET :

Effets d'une division d'attention pendant le contournement d'obstacles fixes et mobiles chez des sujets ayant subi un traumatisme craniocérébral.

### RESPONSABLE(S) :

- Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), Étudiant responsable: 529-9141 poste 6930  
Étudiant au doctorat, Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et en intégration sociale (CIRRIIS), IRDPQ
- Brad McFadyen, Ph.D., Chercheur responsable. tél.: 529-9141 poste 6584  
Chercheur régulier, Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et en intégration sociale (CIRRIIS), IRDPQ.

### ORGANISME DE SUBVENTION :

Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC)

### INTRODUCTION :

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche sur les effets d'une division d'attention (2<sup>ième</sup> tâche cognitive) lors de diverses tâches locomotrices et cognitives chez des sujets ayant subi un traumatisme craniocérébral. Ce projet est présentement en cours au Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale (CIRRIIS), à l'Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec (IRDPQ).

Les conditions motrices spécifiques, c'est-à-dire comment contourner l'obstacle ou non, vous seront expliquées à l'avance et vous devrez les approuver par le formulaire de consentement. Les méthodologies de base sont expliquées dans la section suivante. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Le formulaire d'information et de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles à l'étudiant-chercheur ou au chercheur responsable du projet et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

### NATURE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE :

Comparer les capacités locomotrices et cognitives lors du contournement d'obstacles fixe et mobile avec une division d'attention (2<sup>ième</sup> tâche cognitive visuelle) entre des sujets ayant subi un TCC et des sujets sains.

#### DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE :

Si vous acceptez, vous passerez quelques tests physiques, d'une durée d'environ une heure, ainsi qu'une évaluation neuropsychologique, d'une durée d'environ une heure et demie. Ces deux évaluations peuvent être combinées en une seule visite ou séparées en deux visites, selon votre préférence et se dérouleront au département des traumatismes craniocérébraux de l'IRDPQ.

Ensuite, vous participerez à une session d'expérimentation d'environ 3 heures en laboratoire.

La tâche sera de la marche avec et sans obstacle (statique ou mobile) à contourner ainsi qu'avec ou sans une deuxième tâche cognitive. Des électrodes à lumière infrarouge seront collées sur divers parties de votre corps pour enregistrer vos mouvements par un système de caméras infrarouges, ainsi que par une caméra vidéo. Vous aurez aussi un casque d'écoute pendant toute la durée de l'expérimentation qui émettra un son masquant les bruits ambiants du laboratoire. Lors de la même séance, nous prendrons votre poids, votre taille et les dimensions de différents segments corporels. Nous vérifierons aussi votre vision à l'aide d'une charte. Vous devrez marcher à votre vitesse naturelle sur un parcours comprenant un obstacle ou non. L'obstacle sera accroché à un rail perpendiculaire à votre trajectoire et pourra être immobile ou mobile, selon les différents essais.

#### RISQUES POTENTIELS ET AVANTAGES

##### POSSIBLES :

Une légère fatigue pourrait survenir lors de l'expérimentation. Vous pourrez vous reposer entre les essais, ou encore n'importe quand, à votre demande. Votre sécurité sera assurée par le responsable du projet, qui restera au laboratoire pendant toute la durée de l'expérience. L'expérimentation pourrait entraîner une réaction émotionnelle de votre part suite aux résultats obtenus aux différents essais en laboratoire.

Vous ne retirerez aucun bénéfice personnel de votre participation à ce projet de recherche. Toutefois, les résultats obtenus contribueront à l'avancement des connaissances scientifiques dans ce domaine.

#### DROITS DU PARTICIPANT :

Votre participation est volontaire et vous avez le droit de vous retirer du projet à tout moment sans justification de votre part et sans que cela ne vous porte préjudice. Si vous décidez de ne plus participer à l'étude, vous n'aurez qu'à aviser les responsables du projet par téléphone.

#### QUESTIONS AU SUJET DE L'ÉTUDE :

Pour toute question concernant cette étude ou encore pour un changement inhabituel de votre condition (blessures, effets secondaires, etc.) vous pouvez contacter:

- Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), étudiant au doctorat, responsable du projet.  
(418) 529-9141 poste 6930
- Brad McFadyen, Ph.D., chercheur, responsable du projet.  
(418) 529-9141 poste 6584
- Guy St-Vincent, M.Sc., coordonateur du laboratoire.  
(418) 529-9141 poste 6116

Pour toute question d'ordre éthique, veuillez contacter :

- Johanne Trahan  
(418) 529-9141 poste 6036

#### COMPENSATION :

Si vous avez des frais encourus (ex. : déplacement, stationnement), une compensation (15\$) vous sera accordée par visite à l'IRD PQ.

#### CONFIDENTIALITÉ ET UTILISATION DES RÉSULTATS :

La confidentialité des informations recueillies sera assurée et respectée. Votre nom sera remplacé par un système de codes numériques et seul ce système de codes sera utilisé pour les présentations scientifiques.

Si vous acceptez de participer à l'étude, en signant un formulaire de consentement à cet effet, vos données et les informations vous concernant seront conservées dans une banque de données permanente. La banque de donnée sera disponible, à la discrétion du Dr Brad McFadyen, pour des fins d'analyses futures. Tous les dossiers contenant des renseignements personnels et des images des participants seront conservés sous clé. Toutes les images vidéo enregistrées au laboratoire seront conservées par le responsable scientifique et serviront uniquement à la vérification du comportement moteur. Ils ne feront l'objet d'aucune référence extérieure au projet de recherche sans votre autorisation écrite, et le cas échéant, de votre tuteur légal. Les noms, les images et bandes vidéographiques seront effacées après une priode de 5 ans suivant la collecte de données.



## Formulaire de consentement

**N° de projet :** 2006-86

**Titre du projet :** Effets d'une division d'attention pendant le contournement d'obstacles fixes et mobiles chez des sujets ayant subi un traumatisme craniocérébral.

**Responsable(s) du projet :** Philippe Fait, M.Sc., CAT(C), étudiant au doctorat.  
Brad McFadyen, Ph.D., superviseur et chercheur.

- 1) Le(la) responsable m'a informé(e) de la nature et des buts de ce projet de recherche ainsi que de son déroulement;
- 2) Le(la) responsable m'a informé(e) des risques et inconvénients associés à ma participation;
- 3) Ma participation à cette étude est volontaire et je peux me retirer en tout temps sans préjudice;
- 4) Les données de cette étude seront traitées en toute confidentialité et elles ne seront utilisées qu'aux fins scientifiques et par les partenaires identifiés au formulaire d'information;
- 5) J'ai pu poser toutes les questions voulues concernant ce projet et j'ai obtenu des réponses satisfaisantes;
- 6) Ma décision de participer à cette étude ne libère ni les chercheurs, ni l'établissement hôte de leurs obligations envers moi;
- 7) Je sais qu'aucune rémunération n'est rattachée à ma participation;
- 8) Le(la) responsable m'a remis un exemplaire du feuillet d'information et du formulaire de consentement;
- 9) J'ai lu le présent formulaire et je consens volontairement à participer à cette étude;
- 10) Je désire recevoir une copie des résultats de l'étude  oui  non

\_\_\_\_\_  
**Nom et prénom du sujet**

\_\_\_\_\_  
**Date de naissance**

\_\_\_\_\_  
**Numéro de téléphone**

\_\_\_\_\_  
Signature du sujet \*

\_\_\_\_\_  
Date

\_\_\_\_\_  
Nom du chercheur

\_\_\_\_\_  
Date

\_\_\_\_\_  
Signature

\_\_\_\_\_  
Assentiment du mineur

\_\_\_\_\_  
Date

\_\_\_\_\_  
Signature

\* Dans le cas de personnes mineures ou inaptes, remplacer la signature du sujet par celle du parent ou du tuteur

**J'accepte que les données collectées soient conservées dans une banque de données permanente. Je sais que les données seront dénominalisées, c'est-à-dire qu'elles seront identifiées par un code numérique. De plus, les images vidéo et mon nom devront être effacés après une période de cinq ans suivant la fin de l'étude.**

oui

non

**Je consens à ce que les données brutes de mes test neuropsychologiques antérieurs soient transmis au neuropsychologue de ce projet de recherche.**

oui

non

**J'accepte que mon nom ainsi que mes coordonnées soient conservés dans la possibilité d'être contacté ultérieurement afin de participer à une autre étude du Dr McFadyen.**

oui

non

\_\_\_\_\_

Nom et prénom du sujet

\_\_\_\_\_

Date

\_\_\_\_\_

Signature

\_\_\_\_\_

Assentiment du mineur

\_\_\_\_\_

Date

\_\_\_\_\_

Signature

\_\_\_\_\_

Nom du chercheur

\_\_\_\_\_

Date

\_\_\_\_\_

Signature

\_\_\_\_\_

Nom du témoin

\_\_\_\_\_

Date

\_\_\_\_\_

Signature

### **Annexe 3**

#### **Placement des marqueurs et listes des points sondés**



### Placement des marqueurs et listes des points sondés

SEGMENT	Marqueurs réels		
	GAUCHE		DROITE
PIED	1	Pointe extG/intD	4
Triade a/n	2	Pointe milieu	5
calcaneum	3	Pointe intG/extD	6
TRONC	7	Pointe gauche	
Triade a/n T7	8	Pointe milieu	8
		Pointe droite	9
Tête	10	Pointe gauche	
Triade a/n de l'os pariétal	11	Pointe milieu	11
		Pointe droite	12
Obstacle	13		
Triade a/n du bord supérieur	14		
	15		
<b>POINT ANATOMIQUE</b>	<b>Points sondés</b>		
	GAUCHE		DROITE
PIED	16 (1)	Phalangette du 1er orteil	19 (4)
	17 (2)	Tête 5 <sup>e</sup> métatarse	20 (5)
	18 (3)	Calcaneum	21 (6)
TRONC	22(7)	Art. glénohumérale	23 (8)
	24 (9)	Fourchette sternale	24(9)
Tête	25 (10)	Oreille	26(11)
Obstacle	27(12)	Tige centrale	27(12)

## **Annexe 4**

### **Questionnaires et formulaires**



## Questionnaire sur les commotions cérébrales

Prénom: \_\_\_\_\_

Sport : \_\_\_\_\_

Âge : \_\_\_\_\_

Nom : \_\_\_\_\_

Équipe : \_\_\_\_\_

Position : \_\_\_\_\_

1. Depuis combien de temps faites-vous du sport de compétition (en nombre de saisons)? \_\_\_\_\_

2. Avez-vous un problème de vision, d'audition ou un autre handicap?

Non  Oui

Si oui, décrivez ce problème: \_\_\_\_\_

3. Souffrez-vous d'une de ces conditions chroniques (présent avant une commotion cérébrale) :

- Migraines Non  Oui
- Maux de têtes fréquents Non  Oui
- Convulsions Non  Oui
- Diabète Non  Oui
- Tumeur au cerveau Non  Oui
- Autre : \_\_\_\_\_ Non  Oui

4. Avez-vous déjà subi un accident de la route ayant pour résultat une consultation médicale? Si oui : date de l'accident & diagnostique médical :

\_\_\_\_\_ Non  Oui

5. Dans les 24 dernières heures, avez-vous consommé une ou des substances pouvant altérer le contrôle locomoteur (ex : alcool, médicaments, etc.)

Non  Oui

6. Avez-vous subi une anesthésie générale au cours des trois derniers mois?

Non  Oui

6. Avez-vous subi déjà subi une commotion cérébrale?

Non  Oui

Si oui, veuillez répondre ci-dessous.

Comment avez-vous déterminé qu'il s'agissait d'une commotion cérébrale?

- Par un professionnel de la santé (médecin/neuropsychologue/thérapeute du sport/etc.)
- Par un des entraîneurs de mon équipe
- Par ma famille, coéquipiers ou amis
- Par moi-même
- Autre (décrivez)

8. Avez-vous déjà subi plus d'une commotion cérébrale (perte de conscience ou non) ?

Non  Oui

Si oui, combien de commotions cérébrales au total avez-vous subies? \_\_\_\_\_

Quelles sont les dates de ces commotions cérébrales (en ordre chronologique)?

1. \_\_\_\_\_ 2. \_\_\_\_\_ 3. \_\_\_\_\_ 4. \_\_\_\_\_ 5. \_\_\_\_\_

9. En ce qui concerne la présente commotion cérébrale, êtes-vous actuellement de retour au jeu? Non   
Oui

Si oui, indiquez la date de retour au jeu : \_\_\_\_\_

10. Sentez-vous que, depuis votre retour au jeu, votre performance durant les entraînements ou les parties est affectée?

Non  Oui

Si oui, dans quelle mesure (vitesse d'exécution, attention, symptômes, etc.)?

---

---

---

---

---

---

---

---

## Questionnaire sur les symptômes

Mary Ann Keatley, Ph.D., (2000) ©

Lisez ce questionnaire (il peut aussi vous être lu) et indiquez quels sont les problèmes que vous ressentez. Notez vos problèmes selon cette échelle:

**Presque jamais, occasionnellement, Quelquefois, Fréquemment, Presque toujours.**

<b>Mémoire</b>	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Perdez-vous souvent des objets?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Oubliez-vous ce que les gens vous disent?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Oubliez-vous où vous avez stationné votre véhicule?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Oubliez-vous ce que vous venez de lire?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Avez-vous de la difficulté à vous souvenir des événements du passé?	_____	_____	_____	_____	_____
 <b>Attention et Concentration</b>	 <b>Presque jamais</b>	 <b>Occasionnellement</b>	 <b>Quelquefois</b>	 <b>Fréquemment</b>	 <b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous de la difficulté à vous concentrer?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Avez-vous de la difficulté à vous concentrer dans des environnements bruyants?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Avez-vous de la difficulté à vous concentrer sur plus d'une chose à la fois?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Avez-vous de la difficulté à vous concentrer quand vous lisez ou regardez la télévision?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Avez-vous de la difficulté à vous concentrer lorsque vous conduisez?	_____	_____	_____	_____	_____
 <b>Langage et Communication</b>	 <b>Presque jamais</b>	 <b>Occasionnellement</b>	 <b>Quelquefois</b>	 <b>Fréquemment</b>	 <b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous de la difficulté à comprendre les autres ou à suivre une conversation?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Avez-vous de la difficulté à trouver vos mots?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Avez-vous de la difficulté à vous exprimer par écrit?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Avez-vous de la difficulté à vous exprimer verbalement (ex: est-ce que les gens vous demandent souvent de vous répéter ?)	_____	_____	_____	_____	_____
5. Avez-vous de la difficulté à épeler des mots?	_____	_____	_____	_____	_____

**Équilibre/Coordination/Fonctions sensorielles**

	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous de la difficulté à écrire, frapper une balle, faire du vélo ou encore faire quelque chose que vous aviez l'habitude de faire?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Avez-vous des problèmes d'équilibre ou de coordination?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Ressentez-vous souvent de la fatigue?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Ressentez-vous une diminution au niveau du goût?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Ressentez-vous une diminution ou une perte de l'odorat?	_____	_____	_____	_____	_____
6. Ressentez-vous de la douleur physique?	_____	_____	_____	_____	_____
7. Avez-vous de la difficulté à dormir?	_____	_____	_____	_____	_____

**Perception visuelle**

	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Êtes-vous plus sensibles à la lumière?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Les objets vous semblent-ils plus près ou plus loin qu'ils ne le sont actuellement?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Lorsque vous lisez, est-ce que les lettres semblent changer de position ou encore voyez-vous 2 choses quand il n'y en a qu'une?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Avez-vous de la difficulté à fixer des objets?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Êtes-vous étourdis ou ayant des nausées?	_____	_____	_____	_____	_____

**Fonctions Exécutives**

	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous de la difficulté à planifier des activités?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Avez-vous des problèmes à fixer des objectifs et des priorités?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Avez-vous de la difficulté à débiter de nouvelles tâches?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Avez-vous de la difficulté à contrôler et corriger vos erreurs?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Avez-vous de la difficulté à changer d'une tâche à l'autre?	_____	_____	_____	_____	_____

**Fonctionnement Émotionnel**

	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous remarqué des changements d'humeur?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Perdez-vous patience plus rapidement qu'auparavant?	_____	_____	_____	_____	_____
3. Ressentez-vous de la nervosité ou de l'anxiété?	_____	_____	_____	_____	_____
4. Est-ce que vos amis ou famille vous font des commentaires sur vos changements d'humeur?	_____	_____	_____	_____	_____
5. Êtes-vous irritable plus facilement?	_____	_____	_____	_____	_____

**Organisation**

	<b>Presque jamais</b>	<b>Occasionnellement</b>	<b>Quelquefois</b>	<b>Fréquemment</b>	<b>Presque toujours</b>
1. Avez-vous de la difficulté à faire plus d'une chose à la fois?	_____	_____	_____	_____	_____
2. Avez-vous de la difficulté à gérer efficacement votre temps?	_____	_____	_____	_____	_____

NUMÉRO D'IDENTIFICATION : \_\_\_\_\_

DATE DE L'ÉVALUATION (JOUR/MOIS/ANNÉE) : \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

### Edinburgh Handedness Inventory

Indiquez votre préférence à utiliser la main gauche ou la main droite pour accomplir les activités suivantes en inscrivant une ou deux croix (+ ou ++) dans la colonne appropriée. Lorsque, pour une activité donnée, vous n'avez pas de préférence et que vous utilisez autant la main gauche que la main droite, placez une croix (+) dans chacune des colonnes. Par contre, si vous avez une préférence marquée pour une main et que vous n'utiliserez jamais l'autre main à moins d'y être forcé. Inscrivez deux croix (++) dans la colonne appropriée.

Certaines de ces activités requièrent l'usage des deux mains. Dans ces cas, l'identification de la main concernée par la question est écrite entre parenthèses.

Efforcez-vous de répondre à toutes les questions; toutefois, si vous n'avez aucune expérience de l'objet ou de la tâche évoqués dans une question, vous pouvez vous abstenir d'y répondre.

	GAUCHE	DROITE
1. ÉCRIRE	_____	_____
2. DESSINER	_____	_____
3. LANCER	_____	_____
4. CISEAUX (MAIN QUI COUPE)	_____	_____
5. BROSSE À DENT	_____	_____
6. COUTEAU	_____	_____
7. CUILLÈRE	_____	_____
8. BALAI (MAIN SUPÉRIEURE)	_____	_____
9. FROTTER UNE ALLUMETTE	_____	_____
10. OUVRIR UNE BOÎTE (COUVERCLE)	_____	_____
<b>TOTAL</b>	_____	_____

Pour calculer le quotient de latéralité, appliquez la formule suivante :

$$QL = \frac{Md - Mg}{Md + Mg}$$

Md représente le nombre de croix de la colonne main droite  
Mg représente le nombre de croix de la colonne main gauche



NUMÉRO D'IDENTIFICATION : \_\_\_\_\_

DATE DE L'ÉVALUATION (JOUR/MOIS/ANNÉE) : \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

### Wai-Hang Footedness Inventory

Tiré et adapté de Wai-Hang Jackie Lam (2006)  
<http://handedness.mainpage.net>, page last updated: 11/26/2006

Indiquez votre préférence à utiliser la jambe gauche ou la jambe droite pour accomplir les activités suivantes en inscrivant une croix (+) dans la colonne appropriée. Lorsque, pour une activité donnée, vous n'avez pas de préférence et que vous utilisez autant la jambe gauche que la jambe droite, placez une croix (+) dans la colonne du centre.

Efforcez-vous de répondre à toutes les questions; toutefois, si vous n'avez aucune expérience de l'objet ou de la tâche évoqués dans une question, vous pouvez vous abstenir d'y répondre.

	<b>GAUCHE (1)</b>	<b>PEU IMPORTE (2)</b>	<b>DROIT (3)</b>
<b>1. AVEC QUEL PIED DONNERIEZ-VOUS UN COUP DE PIED POUR VISER UNE CIBLE?</b>	_____	_____	_____
<b>2. SI VOUS VOULIEZ RAMASSER UN PETIT CAILLOU AVEC VOS ORTEILS, QUEL PIED UTILISERIEZ-VOUS?</b>	_____	_____	_____
<b>3. QUEL PIED UTILISERIEZ-VOUS POUR TUER UN INSECTE?</b>	_____	_____	_____
<b>4. POUR MONTER SUR UNE CHAISE, QUEL PIED PLACERIEZ-VOUS SUR LA CHAISE EN PREMIER?</b>	_____	_____	_____
<b>TOTAL</b>	_____	_____	_____

Interprétation (basée sur les résultats):

9-12 = droitier

8 = Ambi

4-7 = gaucher

**Annexe 5**  
**Protocole technique**

PROTOCOLE TECHNIQUE

Participant : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

1.  Signature des formulaires d'information et de consentement avant le début des tests. Date : \_\_\_\_\_
2.  Administration des tests neuropsychologiques et du questionnaire < 3 semaines avant la session de laboratoire. Date : \_\_\_\_\_
3.  Administration des tests physiques < 3 semaines avant la session de labo. Date : \_\_\_\_\_
4.  Obtenir la copie des tests neuropsychologiques des athlètes si disponibles (Baseline) Date : \_\_\_\_\_
5.  Joindre une copie des formulaires d'évaluation et des rapports médicaux au dossier patient Date : \_\_\_\_\_

Session de laboratoireAvant l'arrivée du participant :

- Faire le montage du rail & de l'obstacle
- Calibrer l'obstacle sur ses positions (1-2-3)
- Installer le câble OptoTrack sur le rail
- Positionner la caméra vidéo
- Allumer et vérifier les projecteurs
- Ajuster son des écouteurs
- Vérifier les paramètres du stimulus visuel

Paramètres du logiciel pour le Stroop visuel**1. Bruit** (case silence non cochée)

- Calibration du bruit rose (1000hz, 80db)
  - Bruit rose à 0

**2. Nombre d'items adjacents permis**

- Calibration des stimuli visuels

Suite max de 1 item et premier stimulus incongruent suivi du 2<sup>ième</sup> stimulus congruent pour la condition visuelle

**3. Temps d'apparition des stimuli**

Temps d'apparition des stimuli visuels (0,5 seconde)

#### **4. Séquence d'apparition des stimuli**

- Séquence d'apparition de 0,5 seconde

#### **5. Nombre de stimuli visuels confondants pour la condition visuelle (9)**

- Vérifier que les 9 stimuli initiaux soient en Arial 84 (vertical à 3570), centrés, couleur adéquate, cotation congruent/incongruent.

#### Arrivée du participant

- Accueil du participant et explications générales du déroulement
- Consentement libre et éclairé
- Apposer la pancarte sur la porte
- Habillement du participant
- Mesure du poids, de la taille, de la longueur et de la largeur du tronc
- Test d'acuité visuelle
- Positionnement des marqueurs infrarouges + électrodes EOG
- Positionnement du casque pour les marqueurs, casque d'écoute et du micro
- Vérifier les marqueurs
- Calibration OptoTrak en position debout
- Sonder les points en position debout
- Mise à zéro de l'EOG en position debout
- Calibration EOG en position debout: (4m & 8m): C - GC - C - DC - C - GL - C - DL - C
- Administration du Stroop visuel en position debout (1/2 entre l'obstacle et le départ)

### Essais de marche

\*\*\*\*bruit dans tous les essais, guider pour vitesse de marche naturelle\*\*\*

\*\*\*\*pour obtenir le bruit, utiliser le programme Générateur de bruits\*\*\*\*

- Positionnement de départ du sujet les talons sur la ligne verte du rectangle près du mur

Consigne: Marcher à une vitesse confortable, sans arrêter, en utilisant le plus court chemin pour arriver à la colonne du fond, tout en nommant le plus rapidement possible la couleur des mots affichés sur les écrans, lorsqu'il y en aura.

### Conditions:

1. Ø obs, Ø Stroop (5X)
2. Ø obs, Stroop visuel (5X)
3. Obs immobile centre, passe G, Ø Stroop (5X)
4. Obs immobile centre, passe G, Stroop visuel (5X)
5. Obs immobile centre, passe D, Ø Stroop (5X)
6. Obs immobile centre, passe D, Stroop visuel (5X)
7. Obs semi-mobile, départ Gauche, Ø Stroop (5X)
8. Obs semi-mobile, départ Gauche, Stroop visuel (5X)
9. Obs semi-mobile, départ Droite, Ø Stroop (5X)
10. Obs semi-mobile, départ Droite, Stroop visuel (5X)
11. Obs mobile, départ Gauche, Ø Stroop (5X)
12. Obs mobile, départ Gauche, Stroop visuel (5X)
13. Obs mobile, départ Droite, Ø Stroop (5X)
14. Obs mobile, départ Droite, Stroop visuel (5X)

Total : 70 essais

Durant tous les essais de marche:

- Rappeler brièvement les consignes et les conditions au participant
- Au premier essai de chaque bloc, mesurer le temps d'un cycle
- Regarder à chaque essai si les marqueurs sont bien en place
- Faire pivoter le participant vers la droite en fin de parcours
- S'assurer que les écouteurs fonctionnent bien



8	D-G		x						
9	-								
10	G-D								
11	D-G		x						
12	-								
13	G-C								
14	O	D							
15	-		x						
16	G-C								
17	G-D		x						
18	O	G	x						
19	-								
20	G-D								
21	O	D							
22	D-C								
23	D-C		x						
Sujet No. :					Date :				
<u>No. essai</u>	<u>Condition</u>	<u>Passage</u>	<u>Stroop</u>	<u>Notes et commentaires</u>					
24	O	G	x						
25	G-C		x						
26	G-D								
27	D-G		x						
28	O	D	x						
29	O	D							
30	D-C								
31	O	D	x						
32	G-C		x						
33	D-C		x						
34	D-C		x						
35	O	G	x						
36	D-C		x						
37	O	D	x						
38	O	G							
39	O	G							
40	G-D		x						
41	D-C								
42	G-D		x						

	43	G-C							
	44	O	D	x					
	45	D-G							
	46	G-C							
	47	G-D							
	48	D-G							
	49	-		x					
	50	O	G						
	51	-							
	52	G-C		x					
	53	-		x					
	54	D-G							
	55	-		x					
	56	O	G						
	57	G-C		x					
	58	-							
	59	O	G	x					
	60	G-D		x					
	61	D-G							
	62	D-C							
	63	O	G						
	64	D-C		x					
	65	D-G		x					
	66	D-G							
	67	G-C		x					
	68	G-D		x					
	69	G-C							
	70	O	D						