

Table des matières

Sommaire	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des figures.....	ix
Remerciements	x
Introduction	1
Prévalence	2
Définition	3
Symptomatologie.....	4
Différences intersex	6
Effets à long terme des commotions cérébrales	8
Méthode d'investigation : Électrophysiologie	14
ERP et EFE.....	15
P1	15
N1	16
ERP et commotions cérébrales	17
Article scientifique. Effects of repeated concussions and sex on early processing of emotional facial expressions as revealed by electrophysiology	20
Abstract	22
Introduction	23
Methods.....	27
Participants	27
Emotional facial expression identification task	29

Procedure.....	31
Electrophysiological data acquisition	32
ERP analysis.....	32
Statistical analyses	33
Results.....	34
EFE task: Behavioral measures	34
EFE task: Electrophysiological measures	37
N1 component.....	38
Correlational analyses	40
Discussion	41
References	47
Discussion générale	55
Composante P1	56
Composante N1	58
Données comportementales.....	59
Limites de cette étude	60
Considérations futures.....	62
Conclusion générale.....	64
Références générales.....	66

Liste des tableaux

Liste des tableaux dans l'essai :

Tableau

- 1 Symptômes communs à la suite d'une commotion cérébrale..... 5

Liste des tableaux dans l'article scientifique :

Tableau

- 1 Demographic and clinical information across groups 30
- 2 Behavioral measures for angry, neutral and happy emotional facial expressions for each group and across sex 36
- 3 Correlations between clinical, behavioral, and electrophysiological measures in concussed male athletes, concussed female athletes, and concussed athletes as a group 42

Liste des figures

Figure

- 1 A) Representative example of a stimuli used in this study exhibiting angry, neutral and happy facial expressions B) Time course of trials with stimuli..... 31
- 2 Accuracy score for each group with the three expressions averaged together 35
- 3 Averaged P1 waveforms recorded at electrodes PO7 and PO8 with the three expressions averaged together in A) concussed and control males and B) concussed and control females. C) Back view of scalp topographies for each group. D) Bar graph representing averaged P1 amplitude recorded at electrodes PO7 and PO8 for each group with the three expressions averaged together 38
- 4 A) Averaged N1 waveforms recorded at electrode Fz and B) scalp topographies for each group with the three emotional facial expressions averaged together 40
- 5 Bar graph representing averaged N1 amplitude recorded at electrode Fz for each group with the three emotional facial expressions averaged together 40

Remerciements

J'aimerais d'abord remercier Louis De Beaumont, mon co-directeur de recherche. Merci infiniment pour ta disponibilité inconditionnelle et ton soutien sans limite, et ce, malgré tes nouveaux projets de carrière. Travailler sous ta supervision fût un honneur.

Merci à Annie Stipanivic, d'avoir généreusement accepté de reprendre le flambeau de la direction de mon essai. Merci pour ta disponibilité qui fût très précieuse.

Merci à Geneviève Boulard, qui m'a fait découvrir le merveilleux monde de la neuropsychologie clinique. Travailler sous ta supervision m'a permis de cultiver ma passion pour cette profession et le désir de toujours vouloir me surpasser.

Merci à Christelle Beaulieu pour ta générosité sans limite dès les premiers moments. Ton aide, ton écoute et ton amitié ont été, et sont encore, très précieuses. Je garde d'excellents souvenirs de nos séances de potinage quotidiennes qui ont animé l'ambiance au labo!

Je tiens également à remercier mes parents. Vous avez su me transmettre des valeurs telles que la persévérance, l'authenticité et le dépassement de soi, qui me permettent aujourd'hui d'accomplir ce que je croyais inaccessible.

Finalement, un merci tout spécial à Jean-Thomas, mon mari, qui a toujours cru en moi, qui m'a supporté dans cette aventure du début à la fin. Ton soutien, ton amour et, disons-le, ton humour, m'ont aidé à atteindre mes objectifs. Sans oublier Livia, notre bébé, qui s'est jointe à notre équipe au cours de cette aventure. Je vous aime. Tellement.

Clickours.com

Introduction

Les commotions cérébrales suscitent depuis quelques années l'intérêt de la communauté scientifique et sportive. Autrefois considérée comme une blessure banale, les recherches ont mis à jour des données alarmantes quant aux effets des commotions cérébrales et leur incidence.

Prévalence

Les commotions cérébrales représentent la forme la plus courante de traumatismes cranio-cérébraux (TCC) (Davis & D'Amato, 2010). Selon le centre de contrôle et de prévention des maladies des États-Unis, les commotions cérébrales affecteraient annuellement entre 1,6 et 3,8 millions d'adeptes de sports aux États-Unis seulement. Les commotions cérébrales représenteraient 9 % des blessures sportives survenues au niveau secondaire (Langlois, Rutland-Brown, & Wald, 2006).

Depuis quelques années, des augmentations importantes du nombre de commotions cérébrales sont rapportées dans les écoles primaires (Bakhos, Lockhart, Myers, & Linakis, 2010), secondaires (Lincoln et al., 2011) et collégiales (Hootman, Dick, & Agel, 2007), avec un taux d'augmentation estimé de 7 à 15 % chaque année. Diverses hypothèses sont émises pour expliquer cette importante hausse, dont une meilleure sensibilisation des commotions cérébrales auprès des athlètes et intervenants qui identifient davantage les signes de commotion cérébrale. Un meilleur accès aux activités sportives compétitives

pourrait également expliquer le risque accru de commotions cérébrales chez les athlètes (Bakhos et al., 2010).

Ces données sous-estiment toutefois le nombre réel de commotions cérébrales survenues dans une année puisque beaucoup de blessures ne sont pas rapportées par les athlètes. Lors d'une étude effectuée auprès d'athlètes de niveau secondaire, seulement 47 % des commotions cérébrales sont rapportées (McCrea, Hammeke, Olsen, Leo, & Guskiewicz, 2004). Dans la population universitaire, Delaney, Lacroix, Leclerc et Johnston (2002) rapportent que jusqu'à 70 % des athlètes ressentent des symptômes de commotion cérébrale au cours d'une saison. Toutefois, seulement 20 % de ces athlètes ont réalisé avoir subi une commotion cérébrale. Ces données sont alarmantes considérant les complications potentiellement importantes auxquelles l'athlète s'expose à poursuivre sa pratique sportive alors qu'il a subi une commotion cérébrale.

Définition

Selon la déclaration du consensus sur les commotions cérébrales dans le sport de Berlin (McCrory et al., 2017), une commotion cérébrale est un traumatisme cranio-cérébral (TCC) induit par des forces biomécaniques et comprend les critères suivants :

1. Une commotion cérébrale peut être causée par un impact direct ou indirect à la tête, au visage, au cou ou à un autre endroit au corps qui transmet une force impulsive à la tête;

2. Une commotion cérébrale entraîne généralement l'apparition rapide d'une altération de la conscience et des fonctions neurologiques, qui se résorbe spontanément. Toutefois, dans certains cas, cette altération peut se prolonger de quelques minutes à plusieurs heures;
3. Une commotion cérébrale peut entraîner des changements neuropathologiques bien que les signes et symptômes en phase aiguë reflètent en grande partie une perturbation fonctionnelle plutôt que structurelle. Les techniques de neuroimagerie structurelles standards ne permettent donc pas de détecter des anomalies sous-jacentes;
4. Une commotion cérébrale résulte en un ensemble de signes et symptômes cliniques pouvant impliquer ou non une perte de conscience. Les symptômes cliniques et cognitifs se résorbent graduellement. Toutefois, dans certains cas, la symptomatologie peut persister au-delà du délai attendu.

Symptomatologie

Les commotions cérébrales peuvent entraîner une variété de symptômes, tels que présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1

Symptômes communs à la suite d'une commotion cérébrale

Physique	Cognitif	Affectif	Troubles du sommeil
Céphalée / migraine	Se sentir au ralenti	Somnolence	Dormir plus qu'à l'habitude
Nausées	Se sentir dans le brouillard	Fatigue	Dormir moins qu'à l'habitude
Vomissements	Perte de mémoire	Irritabilité	Difficultés d'endormissement
Dysfonctions visuelles	Diminution de la concentration	Dépression	
Pertes d'équilibre		Anxiété	
Étourdissements			
Vertiges			
Photophobie			
Phonophobie			
Acouphènes			

Note. Adapté de : Ontario Neurotrauma Foundation. Guideline for Concussion / mTBI and Persistent Symptoms: Second edition. Septembre 2013.

Les présentations cliniques suite à une commotion cérébrale sont très variables et découlent des perturbations physiopathologiques ainsi que des atteintes physiques causées par la biomécanique de l'impact (Giza & Hovda, 2014; Leddy et al., 2015). Dans la majorité des cas, les symptômes disparaissent à l'intérieur de 10 à 14 jours (McCrory et al., 2017). La récupération neurométabolique pourrait toutefois excéder cette période et l'athlète demeure plus vulnérable aux commotions cérébrales durant cette période

(Vagnozzi et al., 2010; Wang et al., 2016). Une minorité d'athlètes éprouvent toutefois des symptômes pour une durée qui excède un mois et nécessitent des traitements spécifiques. Une récente revue systématique de la littérature suggère que certains facteurs sont associés à une mauvaise récupération suite à une commotion cérébrale (Iverson et al., 2017). Selon le groupe d'auteurs, la sévérité de la symptomatologie post-commotionnelle en phase aiguë et subaiguë constitue le meilleur prédicteur de rétablissement. De plus, l'apparition de maux de tête et d'affects dépressifs en phase subaiguë serait prédicteur d'une symptomatologie persistante au-delà d'un mois (Iverson et al., 2017; Zemek et al., 2016). Certaines populations sont davantage à risque d'éprouver une symptomatologie persistante, notamment les athlètes qui présentaient des antécédents de problématiques liées à la santé mentale au moment de subir leur commotion cérébrale (Eisenberg, Andrea, Meehan, & Mannix, 2013; Zemek et al., 2016). Les enfants, plus particulièrement les adolescents, semblent les plus vulnérables à une symptomatologie post-commotionnelle (Zemek et al., 2016). Ce risque est augmenté pour les filles qui sont également plus à risque de souffrir de symptômes post-commotionnels qui persistent au-delà d'un mois (Bock et al., 2015; Eisenberg et al., 2013; Miller et al., 2016; Zemek et al., 2016). Les professionnels de la santé et du sport doivent donc considérer ces facteurs dans la prise en charge des athlètes commotionnés.

Différences intersex

La participation féminine à des sports de contact a considérablement augmentée au cours des dernières années. Les athlètes féminines représentent aujourd'hui 42 % des

athlètes de niveau secondaire et collégial (Cheslock, 2007). Ce changement dans la population sportive a soulevé des questionnements quant à l'impact du sexe de l'athlète sur l'incidence et la récupération des commotions cérébrales.

Plusieurs études affirment que les athlètes féminines sont plus à risque de subir une commotion cérébrale que leurs homologues masculins (Hootman et al., 2007; Dick, Hootman, Agel, & Marshall, 2008; Gessel, Fields, Collins, Dick, & Comstock, 2007; Marar, McIlvain, Fields, & Comstock, 2012). Ces particularités pourraient s'expliquer notamment par des différences sur le plan physiologique, dont une force cervicale moindre que celle des hommes pour absorber les impacts à la tête (Garces, Medina, Milutinovic, Garavote, & Guerado, 2002; Tierney et al., 2005). Une plus petite circonvolution du cou chez les femmes en comparaison aux hommes contribuerait à l'accélération angulaire suite à un impact à la tête, augmentant le risque de subir une commotion cérébrale (Tierney et al., 2005).

Des études suggèrent que les athlètes féminines seraient également plus affectées suite à une commotion cérébrale puisqu'elles rapportent davantage de symptômes post-commotionnels et ont des performances moindres aux épreuves neuropsychologiques (Broshek & Freeman, 2005; Colvin et al., 2009; Dick, 2009; Farace & Alves, 2000; Fenton et al., 1993; Iverson et al., 2017). Elles seraient également plus à risque de ressentir des symptômes post-commotionnels qui perdurent au-delà d'un mois (Bock et al., 2015; Morgan et al., 2015; Zemek et al., 2016). Il est toutefois important de noter que les femmes

rapportent également davantage de symptômes s'apparentant à une commotion cérébrale que les hommes lors des évaluations présaison (Brown, Elsass, Miller, Reed & Reneker, 2015; Covassin et al., 2006). De telles différences sur le plan de la symptomatologie pourraient s'expliquer par d'autres facteurs que la commotion cérébrale, notamment les changements hormonaux en fonction du cycle menstruel chez la femme. Selon une étude récente, les femmes qui subissent une commotion cérébrale durant la phase lutéale de leur cycle menstruel, où le niveau de progestérone est le plus élevé, présentent davantage de symptômes post-commotionnels un mois après leur blessure que les femmes qui ont subi une commotion cérébrale durant la phase folliculaire, où le niveau de progestérone est plus faible (Wunderle, Hoeger, Wasserman, & Bazarian, 2014). Les changements hormonaux en fonction du cycle menstruel chez la femme pourraient donc affecter le rétablissement suite à une commotion cérébrale, et sont à considérer dans le traitement et la prise en charge d'une telle blessure.

Effets à long terme des commotions cérébrales

Autrefois considérées comme des blessures sportives bénignes, les séquelles à long terme des commotions cérébrales sont maintenant bien démontrées. D'une part, le fait de subir une commotion cérébrale augmente le risque de subir une commotion cérébrale subséquente ainsi que la sévérité des signes cliniques et de la symptomatologie (Collins et al., 2002; Broshek & Freeman, 2005; Guskiewicz et al., 2003). Les effets à long terme des commotions cérébrales multiples sont de plus en plus exposés dans la littérature scientifique. Une étude financée par la Ligne nationale de Football a révélé une prévalence

jusqu'à 20 fois plus élevée chez les athlètes professionnels en comparaison à la population générale de développer des troubles cognitifs, démences ou des troubles affectifs (Weir, Jackson, & Sonnega 2009).

Sur le plan cognitif, il a été largement démontré que les athlètes ayant subi de multiples commotions cérébrales s'exposent à un risque accru de subir des atteintes cognitives. En 2005, Guskiewicz et ses collègues rapportent un risque cinq fois plus élevé chez les athlètes retraités qui ont subi de multiples commotions cérébrales de développer un trouble cognitif léger en comparaison à leurs homologues qui n'ont jamais subi de commotion cérébrale. Un historique de TCC multiples est également considéré comme un facteur de risque majeur au développement de la maladie d'Alzheimer (Heyman et al., 1984; Sivanandam & Thakur, 2012). Certaines études rapportent également un risque plus élevé de souffrir de parkinsonisme et de maladies affectant le système moteur, notamment la sclérose latérale amyotrophique chez les individus ayant subi de multiples traumatismes cranio-cérébraux (Bower et al., 2003; Chen, Richard, Sandler, Umbach, & Kamel, 2007; Goldman et al., 2006).

Des atteintes permanentes des commotions cérébrales multiples sur le plan psychoaffectif sont également rapportées dans la littérature scientifique, la dépression étant le trouble affectif le plus étudié chez les athlètes commotionnés (Iverson et al., 2017). De nombreuses études rapportent un risque accru de développer des affects dépressifs chez les athlètes qui ont subi de multiples commotions cérébrales (Kerr, DeFreese, &

Marshall, 2014; Kerr et al., 2014; Montenegro et al., 2017). Cette vulnérabilité est également observée à long terme, chez les athlètes retraités. En 2007, Guskiewicz et collaborateurs rapportent que les athlètes retraités qui ont subi trois commotions cérébrales ou plus sont jusqu'à trois fois plus à risque de souffrir d'une dépression, alors que ceux qui ont subi jusqu'à deux commotions cérébrales sont 1,5 fois plus à risque de souffrir d'un tel trouble psychoaffectif. Ces atteintes persistantes sur le plan affectif sont également associées à des altérations des fonctions cognitives supérieures et corrélées à des anomalies des patrons d'activation cérébrale, notamment une hypo-activation du cortex préfrontal dorsolatéral et du striatum ainsi qu'une désactivation atténuée des régions temporales et frontomédiales (Chen, Johnston, Petrides, & Ptito, 2008). Ces anomalies corrélerent avec une perte de la matière grise dans ces régions.

Certaines études suggèrent que les athlètes qui subissent plusieurs impacts à la tête, sans signe clinique de commotion cérébrale, sont à risque d'en subir des déficits à long terme. Par exemple, selon une étude de Koerte et al. (2015) effectuée auprès d'athlètes de soccer retraités, les athlètes qui ont subi de nombreux impacts à la tête (sans signe clinique de commotion cérébrale) présentent un amincissement cortical plus important que les athlètes non exposés à de tels impacts. Ces différences sont observées principalement dans les régions temporale, occipitale et pariétale droite et seraient associées à des performances moindres en mémoire visuelle et une vitesse de traitement ralentie.

Le syndrome de l'encéphalopathie traumatique chronique (ETC) a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs au cours des dernières années. Décrite pour la première fois en 1928 dans une étude effectuée auprès de boxers professionnels, (Martland, 1928), ce syndrome, alors appelé « punch drunk », est caractérisé par une atrophie des hémisphères cérébraux et un élargissement des ventricules latéraux (Costanza et al., 2011; McKee et al., 2009). Cette pathologie du système nerveux provoque des enchevêtrements neurofibrillaires et une accumulation de protéines tau qui accélère le processus d'apoptose du neurone atteint dans les lobes temporal et frontal (Stern et al., 2011). Les manifestations cliniques incluent des problèmes en mémoire à court terme, des troubles dysexécutifs, des affects dépressifs ou de l'apathie, une instabilité émotionnelle, des problèmes d'inhibition, et un comportement suicidaire. Les manifestations cliniques tardives de l'ETC sont caractérisées par des problèmes graves en mémoire et sur le plan exécutif, des difficultés de langage, un comportement agressif et de l'irritabilité, de l'apathie, des troubles moteurs incluant du parkinsonisme et de la démence (Stern et al., 2011). L'ETC serait causée par les multiples impacts subis par le cerveau. D'autres études sont toutefois nécessaires pour établir une relation directe entre de tels dommages cérébraux et les commotions cérébrales.

L'habileté à identifier et à discriminer les expressions faciales émotionnelles (EFE) serait également affectée chez les patients ayant subi des traumatismes cranio-cérébraux, en phase aiguë (Green, Turner, & Thompson, 2004; Henry, Phillips, Crawford, Ietswaart, & Summers, 2006) ainsi qu'en phase chronique (Croker & McDonald, 2005; Ietswaart,

Milders, Crawford, Currie, & Scott, 2008; Léveillé, Guay, Blais, Scherzer, & De Beaumont, 2017). La reconnaissance des émotions négatives telles que la colère, le dégoût, la peur et la tristesse serait plus altérée que la reconnaissance des émotions positives, notamment la joie et la surprise (Callahan, Ueda, Sakata, Plamondon, & Murai, 2011; Croker & McDonald, 2005; Ietswaart et al., 2008; Williams & Wood, 2010).

Les déficits en reconnaissance des émotions suite à un TCC pourraient résulter d'atteintes des structures cérébrales impliquées dans le traitement des émotions. Les structures telles que l'amygdale, le cortex préfrontal, le cortex occipital, le cortex somatosensoriel droit, l'insula, les ganglions de la base, le thalamus, l'hypothalamus et le cervelet sont particulièrement impliquées dans la reconnaissance des émotions (Adolphs, 2002; Adolphs, Damasio, Tranel, & Damasio, 1996; Adolphs, Damasio, Tranel, Cooper, & Damasio, 2000; Adolphs & Tranel, 2003). Une atteinte de ces structures pourrait engendrer un déficit en reconnaissance des émotions (Adolphs, Baron-Cohen, & Tranel, 2002; Adolphs et al., 2000).

Certaines structures cérébrales impliquées dans le traitement des émotions sont particulièrement vulnérables aux effets des commotions cérébrales. Des atteintes neurométaboliques pourraient contribuer aux déficits en reconnaissance des émotions. Une concentration plus faible de N-acétylaspartate, un neurotransmetteur excitateur qui agit à titre de marqueur de l'intégrité neuronale, est observé au niveau des cortex préfrontal et moteur primaire suite à une commotion cérébrale (Henry, Tremblay, Boulanger,

Elleberg, & Lassonde, 2010; Henry et al., 2011; Vagnozzi et al., 2008, 2010). Dans la phase chronique, une augmentation marquée du taux de glutamate / glutamine est observée au sein du cortex préfrontal et moteur primaire (Chamard et al., 2013; Chamard, Henry, Boulanger, Lassonde, & Théoret, 2014).

Récemment, une étude a démontré des différences spécifiques au sexe de l'athlète dans le traitement des stimuli émotionnels suite à des commotions cérébrales (Léveillé et al., 2017). Selon cette étude, la capacité de reconnaissance des émotions serait préservée chez les athlètes féminines ayant subi de multiples commotions cérébrales. Chez les athlètes masculins toutefois, les athlètes commotionnés présenteraient une altération de la reconnaissance des émotions et nécessiteraient davantage d'intensité des stimuli pour identifier correctement les émotions que leurs coéquipiers n'ayant jamais subi de commotion cérébrale. Ces résultats suggèrent que le sexe module de manière significative les effets des commotions cérébrales sur la reconnaissance des EFE. D'autres études sont toutefois nécessaires pour identifier les fondements neurophysiologiques de ces différences spécifiques au sexe sur le traitement émotionnel de l'information visuelle suite à de multiples commotions cérébrales. Néanmoins, un déficit dans le traitement des émotions suite à une commotion cérébrale peut mener à des problématiques socioaffectives importantes puisque les EFE jouent un rôle crucial dans les interactions sociales (Carton, Kessler, & Pape, 1999).

Méthode d'investigation : Électrophysiologie

L'électrophysiologie est une méthode d'investigation qui s'est montrée sensible aux effets des commotions cérébrales (Gaetz, Goodman, & Weinberg, 2000). L'électroencéphalographie est une technique qui permet d'enregistrer la sommation de l'activité post-synaptique des neurones situés dans les couches les plus superficielles du cortex cérébral à l'aide d'électrodes placés sur le cuir chevelu (Coles & Ruggs, 1995; Luck, 2005).

Les potentiels évoqués liés à des événements (ERP) sont des potentiels électriques générés par les neurones qui sont reliés à des événements internes ou externes (par exemple, des stimuli ou des réponses) (Luck, 2012). Il s'agit d'une technique non-invasive qui permet de fournir des informations quant aux processus cognitifs et affectifs. Sa résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde permet de mesurer avec précision le moment où se déroule un événement cognitif (Picton et al., 2000). Les potentiels évoqués sont définis par leur polarité (P pour positive et N pour négative) et par leur latence (Luck, 2005; Zani & Proverbio, 2003). Les potentiels évoqués sont généralement mesurés en additionnant les essais au moment de l'apparition d'un stimulus ou encore au moment où le participant fournit une réponse. Les différentes composantes reflètent une étape du processus cognitif (Luck, 2005).

Selon Luck (2005), les potentiels évoqués présentent différents avantages en comparaison aux mesures comportementales. D'abord, ils permettent une mesure du

traitement entre l'apparition d'un stimulus et la réponse, permettant ainsi de déterminer les phases du traitement impliquées dans une manipulation expérimentale donnée. Cette technique d'investigation permet également la prise de mesure même lorsqu'aucune réponse comportementale ne doit être donnée. Certaines limites sont toutefois soulevées par l'auteur, dont la nécessité de recueillir un grand nombre d'essais expérimentaux pour assurer la validité de la mesure. De plus, il semble difficile d'associer une signification fonctionnelle à une composante ERP.

ERP et EFE

Les études sur les ERP ont permis d'approfondir notre compréhension des processus cognitifs impliqués dans le traitement des EFE selon l'évolution temporelle (Holmes, Vuilleumier, & Eimer, 2003). Ces études ont permis de confirmer le traitement précoce des stimuli émotionnels. Dès 1994, Halgren, Baudena, Heit, Clarke et Marinkovic suggèrent que les EFE génèrent une déflexion positive au niveau du lobe occipital dès 75 millisecondes. Les ERP impliqués dans les processus perceptifs précoces du traitement des EFE, notamment la P1 et la N1 ont particulièrement suscité l'intérêt des chercheurs au cours des dernières années.

P1

La composante P1 est la première déflexion positive qui apparaît dès 65 à 80 ms. Son amplitude maximale survient vers 100 à 130 ms suivant l'apparition d'un stimulus visuel au niveau des régions temporo-occipitales (Meeren, van Heijnsbergen, & de

Gelder, 2005). Plusieurs études confirment que cette composante est principalement générée par le cortex strié et extrastrié, au niveau des aires visuelles (Di Russo et al., 2005; Di Russo, Martínez, Sereno, Pitzalis, & Hillyard, 2002; Linkenkaer-Hansen et al., 1998). La P1 reflète une réponse sensorielle à un stimulus visuel (Meeren et al., 2005). Plusieurs études appuient son implication dans le traitement des EFE. La P1 serait modulée notamment par le contenu affectif des visages (Eger, Jedynak, Iwaki, & Skrandies, 2003; Halgren, Raij, Marinkovic, Jousmäki, & Hari, 2000; Pizzagalli et al., 2002) et pourrait refléter les premiers stades du traitement des visages (Batty & Taylor, 2003; Halit, de Haan, & Johnson, 2000; Itier & Taylor, 2002). Les études sur la composante P1 dans le traitement des visages ont également mis en évidence une asymétrie de l'activité cérébrale, avec une amplitude maximale de la P1 au niveau des régions pariétales et occipito-temporales droites (Batty & Taylor, 2003; Itier & Taylor, 2002, 2004; Pizzagalli et al., 2002; Proverbio, Brignone, Matarazzo, Del Zotto, & Zani, 2006; Rossion et al., 1999).

N1

La composante visuelle N1 est la première composante à déflexion négative. Son amplitude maximale survient entre 150 et 200 ms après l'apparition d'un stimulus. La composante N1 peut être détectée sur l'ensemble du scalp, dans les régions frontales, centrales, pariétales, occipitales et (Mangun & Hillyard, 1991). La littérature sur les EFE porte davantage sur l'implication de la composante N1 antérieure (Bar-Haim, Lamy, & Glickman, 2005; Holmes et al., 2003; Luo, Feng, He, Wang, & Luo, 2010). L'amplitude

de la composante N1 survient plus tôt au niveau du cortex antérieur (Ciesielski & French, 1989; Mangun & Hillyard, 1991). L'onde de la composante antérieure N1 est déclenchée lorsqu'un stimulus visuel est présenté à un endroit précis et attendu, particulièrement lors de tâches de discrimination (Haider, Spong, & Lindsley, 1964). L'influence du contenu affectif sur la composante N1 antérieure a été largement démontrée (Eimer & Holmes, 2002; Luck & Kappenman, 2011; Pizzagalli, Regard, & Lehmann, 1999; Sato, Kochiyama, Yoshikawa, & Matsumura, 2001). En effet, l'amplitude de la N1 antérieure est augmentée en présence de stimuli visuels aversifs ou agréables en comparaison aux stimuli neutres. Cet effet est toutefois supprimé lorsque les stimuli visuels sont présentés à l'extérieur du focus attentionnel, suggérant l'importante contribution des processus attentionnels dans le traitement des EFE (Holmes et al., 2003; Holmes, Winston, & Eimer, 2005).

ERP et commotions cérébrales

Les potentiels évoqués se sont également avérés utiles pour détecter les atteintes subtiles des processus cognitifs chez les athlètes asymptomatiques ayant subi de multiples commotions cérébrales (De Beaumont, Brisson, Lassonde, & Jolicoeur, 2007; Gaetz & Bernstein, 2001; Gosselin et al., 2010; Thériault, De Beaumont, Gosselin, Filipinni, & Lassonde, 2009). À ce jour, la majorité des études sur les effets des commotions cérébrales sur les ERP ont porté sur la modulation de la composante P3a et P3b, qui reflètent respectivement la redirection involontaire de l'attention vers un stimulus saillant ainsi que la quantité de ressources attentionnelles déployées dans la mise à jour de l'information en

mémoire de travail (Courchesne, Hillyard & Galambos, 1975; Polich & Criado 2006; Polich, 2007). Plusieurs études rapportent des altérations de la composante P3a et P3b chez les athlètes ayant subi une ou plusieurs commotions cérébrales en comparaison avec leurs coéquipiers du groupe contrôle (De Beaumont et al., 2007; Gaetz et al., 2000; Thériault et al., 2009). Ces altérations seraient amplifiées en fonction du nombre de commotions cérébrales subies (De Beaumont et al., 2007; Thériault et al., 2009). Des modulations des composantes P1 et N1 ont également été rapportées chez les athlètes commotionnés lors de tâches attentionnelles auditives et visuelles (Gosselin, Thériault, Leclerc, Montplaisir, & Lassonde, 2006; Moore, Broglio, & Hillman, 2014; Moore, Lepine, & Ellemberg, 2017). Ces récentes données suggèrent que les commotions cérébrales multiples pourraient affecter le fonctionnement cognitif dès les premiers stades du traitement de l'information visuelle. À notre connaissance, très peu d'études ont investigué les composantes ERP précoces impliquées dans le traitement des EFE auprès des athlètes commotionnés.

Le premier objectif de cette étude était d'investiguer les effets à long terme des commotions cérébrales multiples sur les composantes ERP précoces (P1, N1) du traitement des EFE auprès d'athlètes asymptomatiques ayant subi de multiples commotions cérébrales. Notre hypothèse était que les athlètes commotionnés présenteraient une altération des composantes P1 et N1.

Le second objectif de cette étude était d'examiner l'interaction entre le sexe et les effets des commotions cérébrales sur les composantes ERP précoces (P1, N1) impliquées dans le traitement des EFE chez des athlètes asymptomatiques ayant subi de multiples commotions cérébrales. Des différences sur la récupération des commotions cérébrales attribuables au sexe de l'athlète sont déjà bien démontrées à ce jour. De plus, des données émergentes suggèrent des différences liées à la reconnaissance des émotions chez les athlètes multi-commotionnés en fonction du sexe de l'athlète. Conformément à la littérature, nous avons émis l'hypothèse que les effets des commotions cérébrales sur les composantes P1 et N1 seraient significativement modulées par le sexe de l'athlète. Nous avons également émis l'hypothèse que les athlètes féminines commotionnées et du groupe contrôle auraient de meilleures performances en tâche de reconnaissance des émotions que leurs homologues masculins.

Article scientifique

Effects of repeated concussions and sex on early processing of emotional facial expressions as revealed by electrophysiology

Effects of repeated concussions and sex on early processing of emotional facial expressions as revealed by electrophysiology

Effects of repeated concussions and sex on early processing of emotional facial expressions as revealed by electrophysiology

Frédérique Carrier-Toutant¹, Samuel Guay^{2,3}, Christelle Beaulieu¹, Édith Léveillé^{2,4}, Alexandre Turcotte-Giroux¹, Samaël D. Papineau¹, Benoit Brisson¹, Fabien D'Hondt^{6,7,8} & Louis De Beaumont^{2,5}

¹ Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada

² Montreal Sacred Heart Hospital Research Centre Montreal, Québec, Canada

³ Department of Psychology, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

⁴ Department of Psychology, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

⁵ Department of Surgery, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

⁶ Centre de recherche du Centre Hospitalier Universitaire Sainte-Justine, Université de Montréal Montréal, Québec, Canada

⁷ SCALab UMR CNRS 9193, Sciences Cognitives et Sciences Affectives, Université de Lille Lille Cedex, France

⁸ Clinique de psychiatrie, CHU Lille Lille, France

Abstract

Objective: Concussions affect the processing of emotional stimuli. This study aimed to investigate how sex interacts with concussion effects on early event related brain potentials (ERP) measures (P1, N1) of emotional facial expressions (EFE) processing in asymptomatic, multi-concussion athletes during an EFE identification task. **Method:** Forty control athletes (20 females and 20 males) and 43 multi- concussed athletes (22 females and 21 males), recruited more than three months after their last concussion, were tested. Participants completed the Beck Depression Inventory II, the Beck Anxiety Inventory, the Post-Concussion Symptom Scale, and an Emotional Facial Expression Identification Task. Pictures of male and female faces expressing neutral, angry and happy emotions were randomly presented and the emotion depicted had to be identified as fast as possible during EEG acquisition. **Results:** Relative to controls, concussed athletes of both sex exhibited a significant suppression of P1 amplitude recorded from the dominant right hemisphere while performing the emotional face expression identification task. The present study also highlighted a sex-specific suppression of the N1 component amplitude after concussion which affected male athletes. **Conclusion:** These findings suggest that repeated concussions alter the typical pattern of right-hemisphere response dominance to EFE in early stages of EFE processing and that the neurophysiological mechanisms underlying the processing of emotional stimuli are distinctively affected across sex.

Keywords: Sports concussion; Long-term effects; Event-related potentials; Emotional facial expression; N1; P1; Electrophysiology; Sex Characteristics

Introduction

Sports-related concussions are a major public health concern as 1.6 to 3.8 million concussions are estimated to occur each year in the US only (Langlois, Rutland-Brown, & Wald, 2006). The Consensus Statement from the 4th International conference on concussion in sport defined a sports-related concussion as a complex pathophysiological process affecting the brain, induced by biomechanical forces applied either directly or indirectly (e.g. neck) to the brain (McCrory et al., 2013). Although the physical, emotional, and cognitive symptoms following a concussion usually resolve within 7 to 10 days (McCrory et al., 2005), the potentially serious and persistent sequelae to the brain following multiple concussions are now well documented (Bombardier et al., 2010; Chen, Johnston, Petrides, & Ptito, 2008; Guskiewicz et al., 2007). Among others, persistent depression after concussion is associated with higher-order cognitive function impairments (Chen et al., 2008; Mainwaring, Hutchison, Comper, Richards, & Trenerry, 2012). The sports-related concussion literature has highlighted sex differences in the recovery of athletes who sustained a concussion. In addition to the proportionately higher concussion rate in females in sports played by both sexes (Marar, McIlvain, Fields, & Comstock, 2012), recent reports suggest that concussed female athletes could be more likely than their male counterparts to experience persistent symptoms, including depression (Broshek et al., 2005; Dick, 2009; Farace & Alves, 2000; Fenton, McClelland, Montgomery, MacFlynn, & Rutherford, 1993).

In parallel, alterations of the ability to identify and discriminate emotional facial expressions (EFE) were found among people who sustained a traumatic brain injury tested either during the acute (< 3 months) or the chronic post-injury phase (> 3 months) (Green, Turner, & Thompson, 2004; Henry, Phillips, Crawford, Ietswaart, & Summers, 2006; Léveillé, Guay, Blais, Scherzer, & De Beaumont, 2016). EFEs are known to be particularly salient stimuli to humans as they are thought of as immediate indicators of affective dispositions in other people (Holmes, Kiss, &

Eimer, 2006). EFE processing alterations following a concussion can result in socioaffective impairments (Carton, Kessler, & Pape, 1999), affecting one's capacity to manage post-concussion symptoms. Post-concussion symptoms management is crucial for athletes as the latter represents a major obstacle keeping them from returning to competition (Moore, Terryberry-Spohr, & Hope, 2006; Soo, Tate, & Rapee, 2012). Furthermore, sex differences in EFE processing are abundantly documented, as females tend to be more accurate and faster in identifying EFEs than males (Hall & Matsumoto, 2004; Hampson, Vananders, & Mullin, 2006).

A recent study demonstrated significant sex-related differences on the processing of emotional stimuli after concussion (Léveillé et al., 2016). Whereas emotion recognition ability was equivalent in female athletes regardless of concussion history, male concussed athletes showed emotion recognition alterations and needed significantly more emotional intensity than unconcussed male counterparts to identify these emotions. To this day, however, very little is known about the neurophysiological underpinnings of this male-specific concussion effect on the processing of emotional stimuli.

Event-related brain potentials (ERPs) were particularly useful to deepen our understanding of the neurophysiological underpinnings of EFE processing. ERPs are changes in the brain electrical activity in response to an event, such as the appearance of a stimulus, or performing a manual response (Hajcak et al., 2012). ERP components are labelled after their polarity (P for positive and N for negative) and latency. Studies have shown that when faces are attended, emotional processing elicits a greater frontal positivity, starting about 100 ms after stimulus onset, suggesting that cortical circuits involved in the detection of emotionally significant events can be triggered rapidly by EFE (Halgren, Baudena, Heit, Clarke, & Marinkovic, 1994; Streit et al., 1999). Another study suggested that emotional stimuli are detected pre-attentively, and may capture attention automatically, irrespective of the current focus of spatial attention (Holmes,

Vuilleumier, & Eimer, 2003). It is therefore not surprising to note that ERP components related to early visual perception and attention were shown to be involved in EFE processing such as the P1 and the N1 waveform components, which are two attention-related components.

The P1 component is the first positive-going component peaking at around 100-130 ms after the onset of a visual stimulus over occipito-temporal sites (Meeren, van Heijnsbergen, & de Gelder, 2005). The P1 component is associated with the processing of low-level properties of any type of attended visual stimulus, namely visuospatial processing (Hopf & Mangun, 2000). This attentional component may index early stages of face processing as its amplitude is influenced by emotional stimuli (Batty & Taylor, 2003; Halit, de Haan, & Johnson, 2000; Itier & Taylor, 2002). This suggests that cortical circuits involved in the detection of configural aspects of emotional facial stimuli can be activated at an early stage of visual processing (Olivares, Iglesias, Saavedra, Trujillo-Barreto, & Valdes-Sosa, 2015). ERPs studies have also demonstrated asymmetries in EFE processing, with a maximal P1 amplitude peaking over the right parietal and occipito-temporal regions (Batty & Taylor, 2003; Itier & Taylor, 2002, 2004; Proverbio, Brignone, Matarazzo, Del Zotto, & Zani, 2006; Rossion et al., 1999).

The visual N1 component is the first negative-going deflection peaking at around 150-200 ms after stimulus onset. The anterior N1 waveform is elicited when visual stimuli are presented in attended locations, especially during a discrimination task. Most of the literature on ERPs and EFE has looked at the modulation of the anterior N1 response (Bar-Haim, Lamy, & Glickman, 2005; Holmes et al., 2003; Luo, Feng, He, Wang, & Luo, 2010). N1 amplitude is enhanced by emotional content of visual stimuli for both aversive and pleasant content, compared to neutral stimuli (Luck & Kappenman, 2011). However, ERP studies of emotional facial expression have demonstrated that this effect is suppressed when visual stimuli are presented

unexpectedly to participants, suggesting that attention plays an important role in emotional processing of facial expressions (Holmes et al., 2003; Holmes, Winston, & Eimer, 2005).

Event-related potentials (ERPs) were also shown to be highly sensitive to the long-term effects of concussion on cognition (De Beaumont, Brisson, Lassonde, & Jolicoeur, 2007; Gosselin et al., 2010; Gosselin, Thériault, Leclerc, Montplaisir, & Lassonde, 2006; Thériault, De Beaumont, Gosselin, Filipinni, & Lassonde, 2009). Persistent alterations of ERP waveforms such as the P3, the SPCN (sustained posterior contralateral negativity) and ERN (event-related negativity) were documented after concussion despite the resolution of post-concussion symptoms and normal performance on neuropsychological tests (Gaetz, Goodman, & Weinberg, 2000; Thériault et al., 2009; Theriault, De Beaumont, Tremblay, Lassonde, & Jolicoeur, 2011). Furthermore, ERPs have also been particularly useful in documenting the cumulative effects of recurrent concussions (i.e. concussion effects on ERP are accentuated as a function of the number of concussions sustained) (De Beaumont et al., 2007; Gaetz et al., 2000; Thériault et al., 2009). Moreover, a study conducted among elite symptomatic and asymptomatic athletes revealed that having sustained multiple concussions induces significant N1 amplitude reduction when performing an auditory attention task (Gosselin et al., 2006). More recently, two studies revealed a decrease in early sensory processing in concussed athletes. These studies highlighted a reduction in N1 as well as in P1 amplitude during a visual task relative to sub-concussed or control athletes (Moore, Broglio, & Hillman, 2014; Moore, Lepine, & Ellemberg, 2017). Taken together, these results suggest that concussions could affect early evoked potentials. To our knowledge, very few, if any, studies have investigated early electrophysiological components of visual perception and attention on EFE in concussed athletes.

Here, we investigated the cumulative and long-term effects of concussions on early ERP measures (P1 and N1) of EFE processing in asymptomatic, multi-concussed athletes during an

EFE identification task. We hypothesized that concussed athletes would show alterations in early ERP measures (P1 and N1). Another objective was to study sex differences on P1 and N1 components in an EFE identification task in multi-concussed and control athletes. Considering the known sex-related differences in concussion outcome and recovery coupled with emerging data on sex-related differences in emotion recognition in multi-concussed athletes, we hypothesized that concussion effects on P1 and N1 components would be significantly modulated by sex. We also hypothesized that females, whether concussed or not, would outperform males on emotional facial recognition accuracy.

Methods

Participants

All 83 participants were active male and female athletes from Canadian universities and collegiate sports organizations who were recruited with the collaboration of team coaches. Participants were included if they met all of the following criteria: no history of alcohol and/or substance abuse; no medical condition requiring daily medication; no previous history of psychiatric illness, affective disorder, learning disability, neurological history (brain tumor, seizure, central nervous system neoplasm), or traumatic brain injury unrelated to contact sports. None of them had suffered a concussion within the 3 months preceding testing and they were all asymptomatic on the Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS). The study was approved by the local ethics committee and all participants provided written informed consent prior to testing. Volunteers received a financial compensation of \$50 CDN for their participation.

The two concussion groups included 22 female and 21 male athletes who reported having sustained at least two sports-related concussions that occurred at least 3 months prior to testing. The number of reported concussions sustained ranged from 2 to 8 ($M = 3.04$ and $SD = 1.29$).

Information on concussions was self-reported, using a standardized concussion history questionnaire (Hecht & Kent, 2005). Concussion classification was based on the definition provided by the Consensus Statement of the 4th International Conference on concussion in sport (McCrory et al., 2013). All brain injuries were classified as “mild” on the Glasgow Coma Scale (GCS; scores ranging from 13 to 15). At the time of testing, concussed athletes were asymptomatic, reporting few (if any) symptoms on the PCSS. The control groups consisted of 20 male and 20 female athletes who presented with no prior history of head injury, sports-related or otherwise.

Table 1 shows demographic as well as clinical information on the four groups included in the present study. Two-way independent ANOVAs with Group (concussed or not) and Sex (male or female) as between-groups factors were conducted to verify potential differences on demographic variables. There was a statistically significant Group * Sex interaction for age ($F(1, 79) = 4.00$, $p = .05$, $\eta^2 = .048$) and post hoc analyses revealed that concussed female athletes were significantly older than female control athletes ($p = .02$) and male control athletes ($p = .05$). There was no statistically significant interaction for Education level ($F(1, 79) = 4.00$, $p = .09$), but we found a significant main effect of sex ($F(1, 79) = 4.28$, $p = .04$, $\eta^2 = .051$), indicating a higher level of education in females ($M = 14.79$, $SD = 2.44$) than males ($M = 13.80$, $SD = 1.72$). As for the BDI scores, there was no statistically significant interaction ($F(1, 79) = 0.84$, $p = .36$), but we found a significant main effect of Group ($F(1, 79) = 12.56$, $p = .001$, $\eta^2 = .137$), where concussed athletes reported more depressive symptoms ($M = 6.09$, $SD = 4.95$) than control athletes ($M = 2.98$, $SD = 2.57$). Finally, there was a statistically significant interaction for the BAI, ($F(1, 79) = 6.48$, $p = .01$, $\eta^2 = .076$) and post hoc tests revealed that control male athletes scored significantly lower than either concussed male athletes ($p = .005$) or control female athletes ($p = .01$). Independent t- tests computed on clinical variables revealed that concussed

females sustained more concussions on average than concussed males ($t(41) = -2.22, p = .03, d = .68$), but did not differ both in terms of the time elapsed since the last concussion ($t(41) = 0.15, p = .88$) and on the PCSS ($t(41) = 0.69, p = .49$).

Emotional facial expression identification task

A computerized identification task was used to assess EFE recognition. The stimuli used in this study were taken from recently published work from our group (D'Hondt et al., 2017). EFE stimuli consisted in photographs of 10 female and 10 male faces (angry, neutral, and happy).

All photographs were selected from the NimStim Set of Facial Expressions (Rigoulot, D'Hondt, Honoré, & Sequeira, 2012; Tottenham et al., 2009), which is a standardized database of photographs of professional actors portraying various emotional expressions. Extrafacial characteristics were retained but were standardized so that all three facial expressions portrayed by the same face differed only in terms of the emotion displayed, thus giving us more naturalistic stimuli (Refer to D'Hondt et al. (2017) for a detailed description of the stimuli).

Table 1

Demographic and clinical information across groups

	Male concussed (<i>n</i> = 21)	Male controls (<i>n</i> = 20)	Female concussed (<i>n</i> = 22)	Female controls (<i>n</i> = 20)
Age	20.47 (2.02)	20.12 (1.83)	21.98 (2.96)	19.77 (1.20)
Education level	13.67 (1.71)	13.95 (1.76)	15.41 (2.56)	14.10 (2.15)
BDI	6.38 (5.39)	2.45 (2.16)	5.82 (4.61)	3.50 (2.88)
BAI	6.67 (4.75)	2.95 (3.03)	5.32 (4.53)	6.45 (4.74)
Number of concussions	2.62 (0.81)	0.00 (0.00)	3.45 (1.54)	0.00 (0.00)
Time since the last concussion (months)	23.75 (12.65)	-	25.00 (5.33)	-
PCSS	12.81 (9.51)	-	10.95 (8.10)	-

During each trial, a central fixation cross was presented for a random duration of 500 to 1500 ms, alerting the participant of the imminent presentation of the picture, which was projected for 500 ms. To control for habituation effects, the interval between two successive stimuli varied randomly between 1.5 and 2.5 seconds. The task included 5 blocks of 60 images (20 angry, 20 neutral, and 20 happy) that were always presented centrally in pseudo-random order so that no more than three successive pictures with the same emotion could be displayed (see Figure 1).

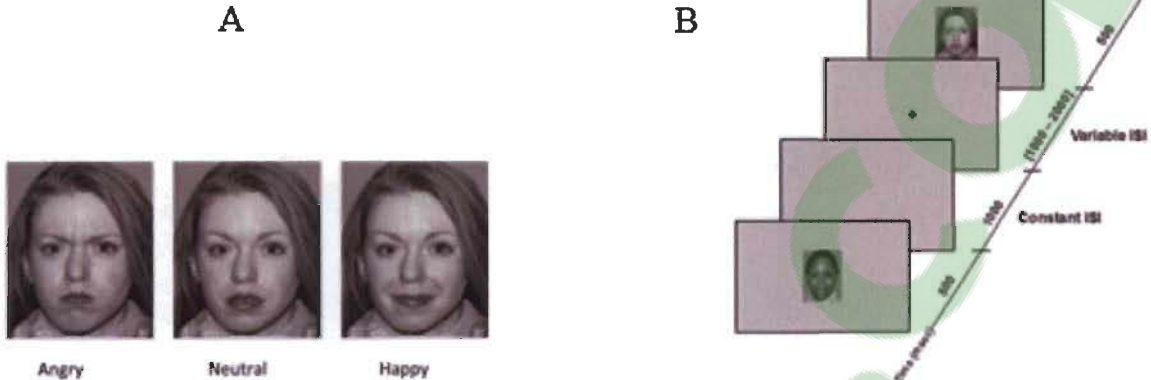


Figure 1. A) Representative example of a stimuli used in this study exhibiting angry, neutral and happy facial expressions B) Time course of trials with stimuli.

Credit: "Development of the MacBrain Face Stimulus Set was overseen by Nim Tottenham and supported by the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation Research Network on Early Experience and Brain Development. Please contact Nim Tottenham at tott0006@tc.umn.edu for more information concerning the stimulus set."

Participants were asked to respond as fast as possible to the EFE depicted by the image by pressing a corresponding right-hand key with the EFE shown (for angry, for neutral, for happy). Reaction time (RT) was defined as the time interval between stimulus onset and the corresponding key press. Two main behavior measures were collected: Reaction times, which were only computed for correctly identified stimulus, and accuracy scores.

Procedure

The experiment consisted of a single 2.5-hour testing session and included the administration of a general health questionnaire, a concussion history questionnaire, the PCSS, the Beck Depression Inventory (BDI-II), the Beck Anxiety Inventory (BAI), and the computerized EFE identification task. Participants were sitting on a straight back chair and performed the EFE identification task running with Presentation V13 (Neurobehavioral Systems) while EEG was recorded from 64 electrodes.

Electrophysiological data acquisition

The EEG was recorded from 64 active Ag/AgCl electrodes (ActiCAP, Brain Products) positioned according to the standard 10–10 system, with the exception of electrodes TP9 and TP10, which were replaced by reference electrodes placed at the mastoids. EEG data were re-referenced offline to the algebraic average of the left and right mastoids (Handy, 2005; Luck, 2005). Additional cutaneous electrodes were used to monitor electrooculographic activity; two placed on external canthi to record the horizontal electrooculogram (HEOG), and two placed on infra/supraorbital regions to record the vertical electrooculogram (VEOG). All electrode impedances were kept below 15 k Ω . The EEG was digitized at 500 Hz, high-pass filtered at 0.01 Hz and low-pass filtered at 225 Hz during the recording.

ERP analysis

Using the software BrainVision Analyzer 2.0 (Brain Products, Germany), EEG signals were high-pass filtered at 0.1 Hz and low-passed at 20 Hz offline. Trials with eye blinks (VEOG > 100 μ V), large horizontal eye movements (HEOG > 35 μ V), and/or artefacts (> 80 μ V) at one of the 62 recording electrodes (64 electrodes with the exception of the two reference electrodes) were excluded from further analyses using an automated screening procedure. The EEG was segmented relative to the emotion expressed by the faces and the onset of the stimulus in each task to create stimulus-locked epochs of 1200 ms that included a 200 ms pre-stimulus period. Epochs were baseline corrected relative to the mean signal amplitude between -200 and 0 ms prior to stimulus presentation. Separate averaged waveforms were computed for each correctly identified EFE (neutral, happy, and angry).

Early components (P1 and N1) were measured at electrodes where brain activity was maximal in each hemisphere, as determined with the use of grand-averaged waveforms and scalp

topographies distribution of brain activity for each of these components. As recommended in international ERP guidelines, latencies were taken at the electrode where the amplitude was maximal over each hemisphere, and the amplitude was measured at the determined latency on other electrodes over that hemisphere (Picton et al., 2000). P1 was quantified as the mean amplitude recorded at lateral posterior electrodes PO7 and PO8, between 85 and 120 ms post-stimulus onset. N1 was measured at Fz between 85 and 95 ms post-stimulus onset. These time windows and electrodes for each waveform component of interest were consistent with those reported in the literature (Bar-Haim et al., 2005; Itier & Taylor, 2002; Stekelenburg & de Gelder, 2004; Utama, Takemoto, Koike, & Nakamura, 2009).

Statistical analyses

Statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0 (IBM, United States). Given the statistically significant differences in BDI and BAI scores and its potential effects on the results and their interpretation, mixed factorial ANCOVAs were conducted on behavioral data (reaction times and accuracy) and EEG data (P1 and N1 components) for all three types of EFE (neutral, happy, angry) as within-subject factor, with Sex (male or female) and Group (concussed or not) as between-groups factors, and BDI and BAI as covariates. Given that both anxiety and depressive symptoms have been found to modulate responses to EFE-like stimuli (Demenescu, Kortekaas, den Boer, & Aleman, 2010), we included these variables as covariates in the proposed ANCOVA model. It is important, however, to bear in mind that mean BDI and BAI scores for each group were far from reaching the established clinical thresholds (i.e.; Mean score of 6.09 in concussed as opposed to 2.98 in controls for the BDI scores, where the clinical threshold for moderate depression is 19; as for the BAI, clinical threshold for moderate anxiety is 16 and only male controls had significantly lower score

($M = 2.95$) compared to other groups ($M \approx 6.15$) (Beck, Epstein, Brown, & Steer, 1988; Beck & Steer, 1993). Given that Age and Level of education differences were minimal (≤ 1.5 year) and that the latter were unlikely to modulate EFE processing at such a young age, we did not include them as covariates. Two-tailed Pearson correlations were computed between relevant clinical variables (BAI, BDI, number of concussions, PCCS, and time since last concussion) and electrophysiological measures of EFE processing (P1 and N1 components), and behavioral measures. We used Greenhouse-Geisser correction whenever sphericity assumption was violated when computing ANCOVAs. Statistical significance was set at $p < 0.05$ and the false discovery rate (FDR) procedure was used when multiple comparisons corrections were needed.

Results

EFE task: Behavioral measures

Descriptive data of reaction times and accuracy scores across groups can be found in Table 2. We first conducted a mixed factorial ANCOVA on reaction times with EFE (neutral, happy, angry) as within- subject factor and Sex (male or female) and Group (concussed or not) as between-groups factors. None of the interaction or main effects were found to reach statistical significance [Interactions of EFE * Sex * Group, $F(2, 152) = 0.03, p = .97$; EFE * Sex, $F(2, 152) = 0.42, p = .66$; EFE * Group, $F(2, 152) = 0.15, p = .86$; EFE * BDI, $F(2, 152) = 0.42, p = .24$; EFE * BAI, $F(2, 152) = 0.11, p = .89$; Group * Sex, $F(1, 76) = 0.37, p = .55$; and main effects of EFE, $F(2, 152) = 0.14, p = .87$; Group, $F(1, 76) = 0.77, p = .38$; Sex, $F(1, 76) = 0.09, p = .77$; BDI, $F(1, 76) = 0.19, p = .66$; BAI, $F(1, 76) = 1.29, p = .26$].

We then computed an ANCOVA with the same factors but this time, on accuracy scores. Figure 2 shows mean accuracy scores across groups. Only a main effect of Sex reached statistical significance, $F(1, 78) = 15.31, p < .001, \eta^2 = .168$, indicating that females were more accurate

($M = 91.88$, $SD = 4.72$) than males ($M = 86.23$, $SD = 11.61$) (see Figure 2). All the remaining effects were not statistically significant [Interactions of EFE * Sex * Group, $F(1.48, 112.62) = 1.69$, $p = .20$; EFE * Sex, $F(1.48, 112.62) = 0.19$, $p = .76$; EFE * Group, $F(1.48, 112.62) = 0.25$, $p = .71$; EFE * BDI, $F(1.48, 112.62) = 0.14$, $p = .81$; EFE * BAI, $F(1.48, 112.62) = 0.98$, $p = .36$; Group * Sex, $F(1, 76) = 3.01$, $p = .09$; and main effects of EFE, $F(1.48, 112.62) = 0.74$, $p = .44$; Group, $F(1, 76) = 0.08$, $p = .78$; BDI, $F(1, 76) = 0.11$, $p = .74$; BAI, $F(1, 76) = 0.29$, $p = .59$].

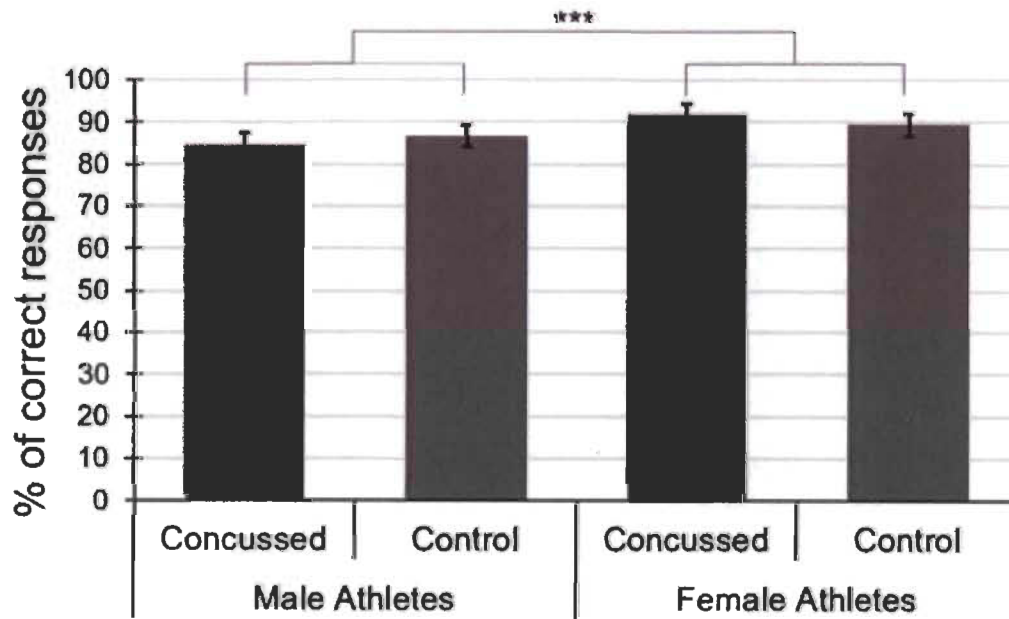


Figure 2. Accuracy score for each group with the three expressions averaged together.

Table 2

Behavioral measures for angry, neutral and happy emotional facial expressions for each group and across sex

		Male concussed (<i>n</i> = 21)	Male controls (<i>n</i> = 20)	Female concussed (<i>n</i> = 22)	Female controls (<i>n</i> = 20)
Neutral	Reaction time (ms)	875.85 ± 170.09	835.58 ± 141.30	850.30 ± 105.99	826.60 ± 127.40
	Accuracy (%)	82.45 ± 10.67	87.65 ± 7.69	92.27 ± 4.20	88.20 ± 7.61
Joy	Reaction time (ms)	852.13 ± 164.60	812.93 ± 121.35	836.71 ± 98.55	817.26 ± 147.42
	Accuracy (%)	85.75 ± 9.10	86.85 ± 9.52	91.27 ± 5.96	88.90 ± 8.58
Angry	Reaction time (ms)	857.06 ± 162.35	828.98 ± 129.56	833.72 ± 105.86	816.86 ± 129.54
	Accuracy (%)	86.40 ± 9.66	86.05 ± 13.54	93.00 ± 4.13	90.65 ± 5.11
Combined	Reaction time (ms)	861.68 ± 160.41	825.83 ± 125.10	840.24 ± 98.36	820.24 ± 129.89
	Accuracy (%)	84.87 ± 6.44	86.85 ± 7.33	92.18 ± 3.13	89.25 ± 4.80

EFE task: Electrophysiological measures

P1 component. First, we computed a mixed factorial ANCOVA with EFE (neutral, happy, angry) and Laterality (PO7, PO8) as within-subject factors, Sex and Group as between-group factors, and BDI and BAI as covariates to verify if we could detect the lateralization effect observed in healthy controls (Batty & Taylor, 2003; Proverbio et al., 2006). Figure 3 depicts averaged P1 waveforms and scalp topographies recorded at electrodes PO7 and PO8 for each group. We found a statistically significant Group * Laterality interaction, $F(1, 72) = 9.11$, $p = .004$, $\eta^2 = .112$. Post hoc analyses revealed that the amplitude of the P1 waveform component of controls, including both males and females, was significantly larger at PO8 ($M = 6.69$, $SD = 4.43$) relative to PO7 ($M = 4.77$, $SD = 4.19$) when the three EFE types (neutral, happy, angry) were combined $t(37) = 3.37$, $p = .002$, $d = 0.45$. Indeed, concussed athletes did not show the expected right-hemisphere lateralization of electrophysiological activity to EFE stimuli [Right: PO8 ($M = 4.75$, $SD = 4.18$) compared to Left: PO7 ($M = 4.88$, $SD = 3.42$), $t(39) = -0.21$, $p = .89$]. More importantly, we wanted to verify whether the P1 component differed across groups at PO8 as it was previously shown to be the electrode recording maximal P1 response to EFE processing (Proverbio et al., 2006). We found a significant between-group difference on P1 amplitude recorded at PO8 ($t(76) = 2.00$, $p = .05$, $d = 0.45$), such that the P1 amplitude was significantly suppressed in concussed relative to control athletes. P1 amplitude recorded at PO7 did not differ across groups $t(76) = -.12$, $p = .90$. The ANCOVA also revealed a significant main effect of Sex ($F(1, 72) = 3.87$, $p = .05$, $\eta^2 = .051$), such that males ($M = 4.48$, $SD = 3.61$) exhibited significantly smaller P1 responses to EFE stimuli than females ($M = 6.10$, $SD = 3.62$). All other statistics of the ANCOVA on P1 amplitude were not statistically significant, F-ratios ranging from the $F(2, 144) = 2.63$, $p = .08$) for the EFE * Group interaction to $F(2, 144) = .19$, $p = .83$ for the Laterality * EFE * Group * Sex interaction. This first analysis result suggests that

control athletes exhibited the expected right hemisphere dominance of the P1 amplitude, whereas concussed athletes did not, in addition to showing significantly suppressed right posterior activity relative to controls, irrespective of Sex, Type of EFE, BAI and BDI scores (see Figure 3).

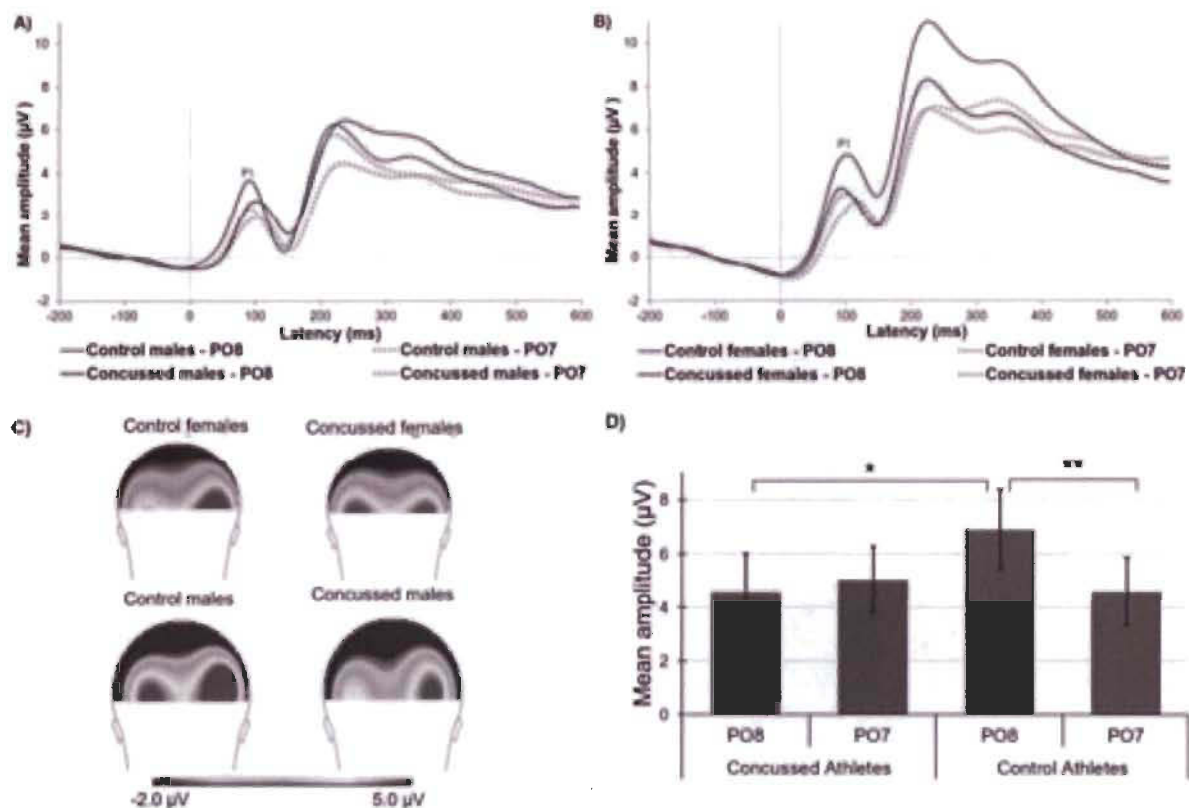


Figure 3. Averaged P1 waveforms recorded at electrodes PO7 and PO8 with the three expressions averaged together in A) concussed and control males and B) concussed and control females. C) Back view of scalp topographies for each group. D) Bar graph representing averaged P1 amplitude recorded at electrodes PO7 and PO8 for each group with the three expressions averaged together. ** $p < .01$ and * $p < .05$

N1 component. Figure 4 depicts averaged N1 waveforms and scalp topographies recorded at Fz for each group. We conducted another mixed factorial ANCOVA with EFE (neutral, happy, angry) as within-subject factor, Sex and Group as between-group factors, and BDI and BAI as covariates on the N1 ERP component recorded at Fz. We found a statistically significant Group * Sex interaction ($F(1,77) = 4.06$; $p = 0.05$, $\eta^2 = .051$). Post hoc tests revealed that the concussed

male athletes group ($M = -3.56$, $SD = 2.57$) exhibited a N1 waveform component of significantly smaller amplitude than concussed females ($M = -6.57$, $SD = 3.31$), ($t(41) = -3.32$, $p = .01$, $d = 1.02$), and control males ($M = -5.85$, $SD = 2.93$), ($t(39) = -2.67$, $p = .03$, $d = .83$), but only a trend toward significance when compared to control females ($M = -5.69$, $SD = 3.84$), ($t(39) = -2.10$, $p = .08$). Differences were not statistically significant between control females and concussed females ($t(40) = 0.79$, $p = .56$) or control males ($t(38) = 0.15$, $p = .88$), and between concussed females and control males ($t(40) = -0.74$, $p = .56$) (see Figure 5). As expected from previous studies, we also found a significant main effect of Sex ($F(1,77) = 4.17$; $p = 0.05$, $\eta^2 = .050$), suggesting that females athletes ($M = -6.15$, $SD = 3.25$) exhibited a greater N1 component amplitude relative to males ($M = -4.69$, $SD = 3.24$). Taken together, these results suggest that the significant N1 amplitude reduction found in male concussed athletes is driving the Group X Sex interaction. No other interaction or main effects were found to reach statistical significance [Interactions of EFE * Sex * Group, $F(2, 154) = 0.67$, $p = .51$; EFE * Sex, $F(2, 154) = 0.05$, $p = .95$; EFE * Group, $F(2, 154) = 1.95$, $p = .15$; EFE * BDI, $F(2, 154) = 0.24$, $p = .79$; EFE * BAI, $F(2, 154) = 0.03$, $p = .97$; and main effects of EFE, $F(2, 154) = 1.01$, $p = .37$; Group, $F(1,77) = .56$; $p = .46$; BDI, $F(1,77) = .08$; $p = .78$; BAI, $F(1,77) = .06$; $p = .81$].

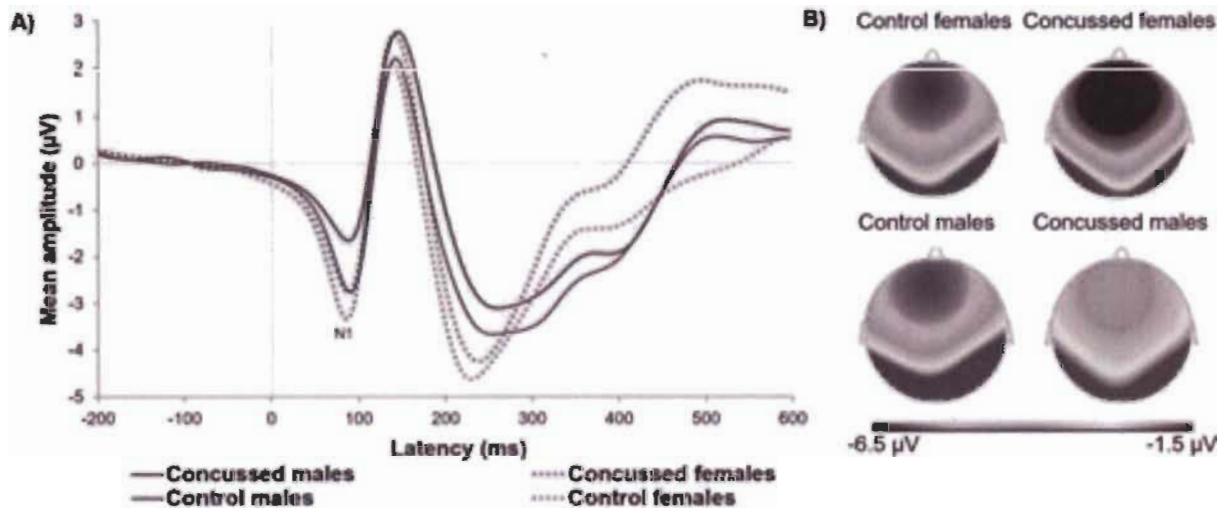


Figure 4. A) Averaged N1 waveforms recorded at electrode Fz and B) scalp topographies for each group with the three emotional facial expressions averaged together.

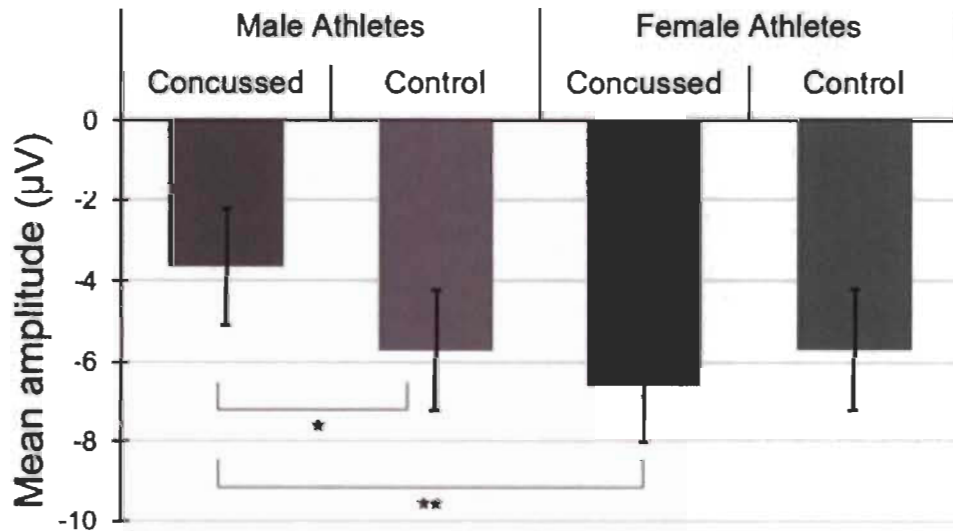


Figure 5. Bar graph representing averaged N1 amplitude recorded at electrode Fz for each group with the three emotional facial expressions averaged together.

Correlational analyses

All two-tailed Pearson correlations computed in concussed athletes between relevant clinical variables (Number of concussions, PCCS, Time since last concussion, BDI, and BAI) and

electrophysiological measures of EFE processing (P1 at PO8 and N1 at Fz), and behavioral measures (Accuracy and Response time) did not reach statistical significance. However, when computing correlations in concussed males and females separately, we found that accuracy score was negatively correlated with the number of post-concussion symptoms in females ($r(21) = -.44, p = .05$). In males, we found a positive association between the time elapsed since the last concussion and accuracy scores ($r(19) = .51, p = .03$ (see Table 3).

Discussion

The present study investigated the effects of sports-related concussions on the early neurophysiological substrates of EFE processing in asymptomatic and multi-concussed male and female athletes tested more than 3 months post-injury.

Results from this study reveal that multi-concussed male and female athletes exhibit a significant suppression of the P1 waveform component over P08, the right-hemisphere electrode site recording maximal P1 amplitude. These findings suggest that multiple concussions alter the dominant right-hemisphere response to early EFE processing (Batty & Taylor, 2003; Eimer & Holmes, 2007; Halit et al., 2000; Itier & Taylor, 2002). This right-hemisphere dominance suppression in early stages of EFE processing found in multi-concussed athletes could contribute to the known persistent alterations of the ability to identify and discriminate emotions in multi-concussion athletes (Léveillé et al., 2016).

Table 3

Correlations between clinical, behavioral, and electrophysiological measures in concussed male athletes, concussed female athletes, and concussed athletes as a group

		Response time	Accuracy score	P1 amplitude at PO8	N1 amplitude at Fz
Concussed male athletes	Number of concussions	.38 (.11)	.01 (.98)	-.08 (.76)	.12 (.63)
	PCSS	.23 (.35)	.02 (.93)	.18 (.47)	-.18 (.45)
	Time since last concussion	.12 (.62)	.51* (.03)	.06 (.82)	-.21 (.39)
	BAI	-.23 (.34)	.11 (.67)	-.06 (.80)	-.21 (.39)
	BDI	-.13 (.60)	.22 (.36)	.02 (.95)	-.03 (.92)
	Number of concussions	-.15 (.53)	-.15 (.52)	-.31 (.18)	.07 (.77)
Concussed female athletes	PCSS	-.086 (.71)	-.44* (.05)	-.39 (.08)	-.15 (.51)
	Time since last concussion	.289 (.20)	.24 (.30)	.25 (.28)	-.01 (.97)
	BAI	-.124 (.59)	-.33 (.15)	-.23 (.32)	.14 (.54)
	BDI	.018 (.94)	-.38 (.09)	.06 (.81)	-.08 (.74)
	Number of concussions	.03 (.86)	.19 (.24)	-.19 (.23)	-.11 (.51)
	PCSS	.12 (.45)	-.19 (.24)	-.13 (.41)	-.07 (.67)
Concussed athletes	Time since last concussion	.18 (.26)	.23 (.15)	.20 (.23)	-.06 (.72)
	BAI	-.16 (.32)	-.17 (.30)	-.16 (.32)	.09 (.58)
	BDI	-.06 (.72)	-.06 (.73)	.03 (.86)	.01 (.95)

Note. *p*-values are presented in parentheses. * = significant correlation at the 0.05 level.

PCSS = Post-Concussion Symptom Score

The lateralized brain activity pattern to EFE found in control athletes is consistent with previous evidence highlighting a right-hemisphere dominance in emotional processing (Batty & Taylor, 2003; Itier & Taylor, 2004; Proverbio et al., 2006; Rossion et al., 1999). According to the right-hemisphere hypothesis, the right side of the brain specializes in perception, expression and experience of emotions, regardless of valence (Borod et al., 1998; Tucker, 1981). ERP studies have provided robust evidence to this hypothesis as right-hemisphere electrophysiological response to EFE is disproportionately elevated relative to that of the left hemisphere (Kestenbaum & Nelson, 1992; Laurian, Bader, Lanares, & Oros, 1991; Münte et al., 1998). This right-hemisphere specialization to EFE processing is consistent with influential studies on the predominant role of the right superior temporal sulcus in EFE (Adolphs, 2002; Adolphs, Damasio, Tranel, & Damasio, 1996; Narumoto, Okada, Sadato, Fukui, & Yonekura, 2001). Further support to the right-hemisphere hypothesis comes from lesion studies reporting a relative sparing of facial expression recognition in patients with lesions of the left hemisphere relative to severe facial expression recognition impairments in patients with right hemisphere brain damage (Adolphs et al., 1996; Borod et al., 1998; Cicone, Wapner, & Gardner, 1980).

Interestingly, a similar pattern of right posterior activity suppression during EFE processing is found in depression (Heller, Nitschke, & Miller, 1998). In depression, compromised right-hemisphere dominance was associated with alterations of right-hemisphere function (Heller et al., 1998). Knowing that multi-concussed athletes are particularly at risk of presenting with post-concussion symptoms including depressive symptoms (Fenton et al., 1993; Guskiewicz et al., 2007), the current study findings raise the intriguing possibility that the observed suppression of electrophysiological mechanisms of EFE perceptual processing might contribute to the known increased risk of depression symptoms in multi-concussed athletes (Chen et al., 2008;

Guskiewicz et al., 2007). Future concussion studies should investigate both the functional as well as the structural connectivity of the right-hemisphere in relation with EFE processing.

As expected, we found a main effect of sex on behavioral data. Indeed, female athletes, whether concussed or not, were more accurate than their male counterparts to identify EFEs. This finding is consistent with previous evidence suggesting that females tend to outperform males in EFE identification (Chen et al., 2008; Hall & Matsumoto, 2004; Hampson et al., 2006; Léveillé et al., 2016). The absence of a Group by Sex interaction on EFE identification accuracy contrasts with recent findings from our group suggesting that concussed males, and not females, were significantly impaired in recognizing negative emotions compared to same-sex controls (Léveillé et al., 2016). It is important to note, however, that the observed EFE identification alterations were obtained when performing a morphed emotion recognition task known for its sensitivity to detect subtle changes of EFE processing in which pictures of a male face expressing basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) were morphed with another emotion. In the current study, however, the EFE identification task was adapted to allow optimal ERP recordings while not modulating task difficulty as a function of the degree of morph between two emotional facial expressions. Indeed, a marked ceiling effect was found on accuracy scores across groups and emotion types, which hampered the sensitivity of the proposed EFE identification task to potential concussion effects. Future studies adapting the morphed emotion recognition task to an ERP protocol would allow to investigate potential associations between P1 amplitude alterations found herein and EFE identification in concussed athletes.

In addition, our results reveal that male concussed athletes show a suppressed N1 component in comparison with all three other groups, across emotion types, whereas no significant N1 component difference was found in female concussed athletes relative to same-sex controls. This indicates that the effects of having sustained multiple concussions more than three months prior

to testing on the anterior N1 component during an EFE identification task, which is thought to reflect early discrimination of emotional content, is specific to male athletes.

Interestingly, the observed amplitude reduction of the N1 component found in concussed male athletes is in line with previous studies reporting reduced N1 component amplitude in depressed patients (Burkhart & Thomas, 1993; Dai & Feng, 2011). Further studies including concussed male and female athletes reaching the clinical threshold for depressive disorders are needed to validate the relationship between the size of the N1 component evoked by an EFE identification task and depression symptoms. In addition, future longitudinal studies could investigate the potential functional effects of these sex specific N1 alterations pattern found in concussed athletes (Guskiewicz et al., 2007).

Finally, findings from this study are in line with previous evidence of durable concussion effects on P1 and N1 components elicited by classic attentional tasks stimuli (Gosselin et al., 2006; Moore et al., 2014, 2017). On the other hand, P1 and N1 components elicited by emotional stimuli in this study generated a distinct pattern of right-hemisphere dominance for the P1 component as well as a significant N1 deflection over anterior electrode sites. The latter pattern of maximal brain activity for emotional stimuli contrasts sharply with maximal activity recorded centrally and posteriorly for the P1 and N1 components, respectively, when concussed athletes were presented with non-emotional stimuli (Gosselin et al., 2006; Moore et al., 2014, 2017), therefore supporting the novelty of current study findings.

One of the main limitations of this study is having to rely on concussion history self-reports as opposed to medical records to address consequences of a sports concussion that occurred months or even years prior to testing. The impact of this methodological limitation was attenuated by excluding participants who reported being uncertain about their concussion history. Prospective studies conducted with young male and female athletes are needed to validate the

residual effects of concussions on electrophysiological markers of EFE processing. Finally, larger-scale studies including a more heterogeneous sample of concussed athletes, including single-concussed athletes tested at different time points after their concussion, would be necessary if we are to validate findings from the current study. Nonetheless, this study provides new evidence that multiple concussions induce long-term changes to early perceptual and processing stages of EFE processing in asymptomatic athletes and that the neurophysiological mechanisms underlying the processing of emotional stimuli are distinctively affected across sex.

Acknowledgments

The authors declare no conflict of interests. This work was supported by the UQTR Research Chair on the Neurobiology of traumatic brain injury awarded to LDB.

References

- Adolphs, R. (2002). Recognizing emotion from facial expressions: Psychological and neurological mechanisms. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, *1*(1), 21-62.
- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1996). Cortical systems for the recognition of emotion in facial expressions. *The Journal of Neuroscience*, *16*(23), 7678-7687.
- Bar-Haim, Y., Lamy, D., & Glickman, S. (2005). Attentional bias in anxiety: A behavioral and ERP study. *Brain Cognition*, *59*(1), 11-22. doi: 10.1016/j.bandc.2005.03.005
- Batty, M., & Taylor, M. J. (2003). Early processing of the six basic facial emotional expressions. *Cognitive Brain Research*, *17*(3), 613-620. doi: 10.1016/s0926-6410(03)00174-5
- Beck, A. T., Epstein, N., Brown, G., & Steer, R. A. (1988). An inventory for measuring clinical anxiety: Psychometric properties. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, *56*, 893-897.
- Beck, A. T., & Steer, R. A. (1993). *Beck Anxiety Inventory Manual*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Bombardier, C. H., Fann, J. R., Temkin, N. R., Esselman, P. C., Barber, J., & Dikmen, S. S. (2010). Rates of major depressive disorder and clinical outcomes following traumatic brain injury. *Jama*, *303*(19), 1938-1945.
- Borod, J. C., Cicero, B. A., Obler, L. K., Welkowitz, J., Erhan, H. M., Santschi, C., ... Whalen, J. R. (1998). Right hemisphere emotional perception: Evidence across multiple channels. *Neuropsychology*, *12*(3), 446.
- Broshek, D. K., Kaushik, T., Freeman, J. R., Erlanger, D., Webbe, F., & Barth, J. T. (2005). Sex differences in outcome following sports-related concussion. *Journal of Neurosurgery*, *102*(5), 856-863.

- Burkhardt, M., & Thomas, D. G. (1993). Event-related potential measures of attention in moderately depressed subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 88(1), 42-50.
- Carton, J. S., Kessler, E. A., & Pape, C. L. (1999). Nonverbal decoding skills and relationship well-being in adults. *Journal of Nonverbal Behavior*, 23(1), 91-100.
- Chen, J.-K., Johnston, K. M., Petrides, M., & Ptito, A. (2008). Neural substrates of symptoms of depression following concussion in male athletes with persisting postconcussion symptoms. *Archives of General Psychiatry*, 65(1), 81-89.
- Cicone, M., Wapner, W., & Gardner, H. (1980). Sensitivity to emotional expressions and situations in organic patients. *Cortex*, 16(1), 145-158.
- Dai, Q., & Feng, Z. (2011). Deficient interference inhibition for negative stimuli in depression: An event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 122(1), 52-61.
- De Beaumont, L., Brisson, B., Lassonde, M., & Jolicoeur, P. (2007). Long-term electrophysiological changes in athletes with a history of multiple concussions. *Brain Injury*, 21(6), 631-644. doi: 10.1080/02699050701426931
- Demeneacu, L. R., Kortekaas, R., den Boer, J. A., & Aleman, A. (2010). Impaired attribution of emotion to facial expressions in anxiety and major depression. *Plos ONE* 5(12), e15058.
- D'Hondt, F., Lassonde, M., Thebault-Dagher, F., Bernier, A., Gravel, J., Vannasing, P., & Beauchamp, M. H. (2017). Electrophysiological correlates of emotional face processing after mild traumatic brain injury in preschool children. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 17(1), 124-142.
- Dick, R. (2009). Is there a gender difference in concussion incidence and outcomes? *British Journal of Sports Medicine*, 43(Suppl 1), i46-i50.

- Eimer, M., & Holmes, A. (2007). Event-related brain potential correlates of emotional face processing. *Neuropsychologia*, *45*(1), 15-31. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.022
- Farace, E., & Alves, W. M. (2000). Do women fare worse? A metaanalysis of gender differences in outcome after traumatic brain injury. *Neurosurgical Focus*, *8*(1), 1-8.
- Fenton, G., McClelland, R., Montgomery, A., MacFlynn, G., & Rutherford, W. (1993). The postconcussional syndrome: Social antecedents and psychological sequelae. *The British Journal of Psychiatry*, *162*(4), 493-497.
- Gaetz, M., Goodman, D., & Weinberg, H. (2000). Electrophysiological evidence for the cumulative effects of concussion. *Brain Injury*, *14*(12), 1077-1088.
- Gosselin, N., Saluja, R., Chen, J., Bottari, C., Johnston, K., & Ptito, A. (2010). Brain functions after sports-related concussion: Insights from event-related potentials and functional MRI. *The Physician and Sports Medicine Journal*, *38*, 27-37.
- Gosselin, N., Thériault, M., Leclerc, S., Montplaisir, J., & Lassonde, M. (2006). Neurophysiological anomalies in symptomatic and asymptomatic concussed athletes. *Neurosurgery*, *58*(6), 1151- 1161.
- Green, R. E., Turner, G. R., & Thompson, W. F. (2004). Deficits in facial emotion perception in adults with recent traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, *42*(2), 133-141.
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Harding, H. P., Matthews, A., ... Cantu, R. C. (2007). Recurrent concussion and risk of depression in retired professional football players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(6), 903-909.
- Hajcak, G., Weinberg, A., MacNamara, A., Foti, D., Luck, S., & Kappenman, E. (2012). *Oxford handbook of event-related potential components*. Oxford, Royaume-Uni: Oxford University Press.

- Halgren, E., Baudena, P., Heit, G., Clarke, M., & Marinkovic, K. (1994). Spatio-temporal stages in face and word processing. 1. Depth recorded potentials in the human occipital and parietal lobes. *Journal of Physiology-Paris*, *88*(1), 1-50.
- Halit, H., de Haan, M., & Johnson, M. H. (2000). Modulation of event-related potentials by prototypical and atypical faces. *Neuroreport*, *11*(9), 1871-1875.
- Hall, J. A., & Matsumoto, D. (2004). Gender differences in judgments of multiple emotions from facial expressions. *Emotion*, *4*(2), 201-206. doi: 10.1037/1528-3542.4.2.201
- Hampson, E., Vananders, S., & Mullin, L. (2006). A female advantage in the recognition of emotional facial expressions: Test of an evolutionary hypothesis. *Evolution and Human Behavior*, *27*(6), 401-416. doi: 10.1016/j.evolhumbehav.2006.05.002
- Handy, T. C. (2005). *Event-related potentials: A methods handbook*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hecht, S., & Kent, M. (2005). Concussion self-report history versus clinically documented history in collegiate football players. *Clinical Journal of Sports Medicine*, *15*(4), 281-283.
- Heller, W., Nitschke, J. B., & Miller, G. A. (1998). Lateralization in emotion and emotional disorders. *Current Directions in Psychological Science*, *7*(1), 26-32.
- Henry, J. D., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Ietswaart, M., & Summers, F. (2006). Theory of mind following traumatic brain injury: The role of emotion recognition and executive dysfunction. *Neuropsychologia*, *44*(10), 1623-1628. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.03.020
- Holmes, A., Kiss, M., & Eimer, M. (2006). Attention modulates the processing of emotional expression triggered by foveal faces. *Neuroscience Letters*, *394*(1), 48-52.

- Holmes, A., Vuilleumier, P., & Eimer, M. (2003). The processing of emotional facial expression is gated by spatial attention: Evidence from event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, *16*(2), 174-184. doi: 10.1016/s0926-6410(02)00268-9
- Holmes, A., Winston, J. S., & Eimer, M. (2005). The role of spatial frequency information for ERP components sensitive to faces and emotional facial expression. *Cognitive Brain Research*, *25*(2), 508-520.
- Hopf, J. M., & Mangun, G. R. (2000). Shifting visual attention in space: An electrophysiological analysis using high spatial resolution mapping. *Clinical Neurophysiology*, *111*(7), 1241-1257.
- Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2002). Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: A repetition study using ERPs. *Neuroimage*, *15*(2), 353-372. doi: 10.1006/nimg.2001.0982
- Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2004). Effects of repetition learning on upright, inverted and contrast-reversed face processing using ERPs. *Neuroimage*, *21*(4), 1518-1532.
- Kestenbaum, R., & Nelson, C. A. (1992). Neural and behavioral correlates of emotion recognition in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *54*(1), 1-18.
- Langlois, J. A., Rutland-Brown, W., & Wald, M. M. (2006). The epidemiology and impact of traumatic brain injury: A brief overview. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *21*(5), 375-378.
- Laurian, S., Bader, M., Lanares, J., & Oros, L. (1991). Topography of event-related potentials elicited by visual emotional stimuli. *International Journal of Psychophysiology*, *10*(3), 231-238.

- Léveillé, E., Guay, S., Blais, C., Scherzer, P., & De Beaumont, L. (2016). Sex-related differences in emotion recognition in multi-concussed athletes. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 22, 1-13.
- Luck, S. J. (2005). *Event-related potentials: A methods handbook*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (2011). *The Oxford handbook of event-related potential components*. Oxford, Royaume-Uni: Oxford University Press.
- Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N.-Y., & Luo, Y.-J. (2010). Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial visual presentation. *Neuroimage*, 49(2), 1857-1867.
- Mainwaring, L., Hutchison, M., Comper, P., Richards, D., & Trenerry, M. (2012). Examining emotional sequelae of sport concussion. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 6(3), 247-274.
- Marar, M., McIlvain, N. M., Fields, S. K., & Comstock, R. D. (2012). Epidemiology of concussions among United States high school athletes in 20 sports. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(4), 747-755.
- McCrory, P., Johnston, K., Meeuwisse, W., Aubry, M., Cantu, R., Dvorak, J., ... Schamasch, P. (2005). Summary and agreement statement of the 2nd International Conference on Concussion in Sport, Prague 2004. *British Journal of Sports Medicine*, 39(4), 196-204.
- McCrory, P., Meeuwisse, W. H., Aubry, M., Cantu, B., Dvořák, J., Echemendia, R. J., ... Raftery, M. (2013). Consensus statement on concussion in sport: The 4th International Conference on Concussion in Sport held in Zurich, November 2012. *British Journal of Sports Medicine*, 47(5), 250-258.
- Meeren, H. K., van Heijnsbergen, C. C., & de Gelder, B. (2005). Rapid perceptual integration of facial expression and emotional body language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(45), 16518-16523.
- doi: 10.1073/pnas.0507650102

- Moore, E. L., Terryberry-Spohr, L., & Hope, D. A. (2006). Mild traumatic brain injury and anxiety sequelae: A review of the literature. *Brain Injury, 20*(2), 117-132.
- Moore, R. D., Broglio, S. P., & Hillman, C. H. (2014). Sport-related concussion and sensory function in young adults. *Journal of Athletic Training, 49*(1), 36-41.
- Moore, R. D., Lepine, J., & Ellemborg, D. (2017). The independent influence of concussive and sub-concussive impacts on soccer players' neurophysiological and neuropsychological function. *International Journal of Psychophysiology, 112*, 22-30.
- Münste, T. F., Brack, M., Grootheer, O., Wieringa, B. M., Matzke, M., & Johannes, S. (1998). Brain potentials reveal the timing of face identity and expression judgments. *Neuroscience Research, 30*(1), 25-34.
- Narumoto, J., Okada, T., Sadato, N., Fukui, K., & Yonekura, Y. (2001). Attention to emotion modulates fMRI activity in human right superior temporal sulcus. *Cognitive Brain Research, 12*(2), 225-231.
- Olivares, E. I., Iglesias, J., Saavedra, C., Trujillo-Barreto, N. J., & Valdes-Sosa, M. (2015). Brain signals of face processing as revealed by event-related potentials. *Behavior Neurology, 1*-16.
- Picton, T., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S., Johnson, R., ... Rugg, M. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology, 37*(2), 127-152.
- Proverbio, A. M., Brignone, V., Matarazzo, S., Del Zotto, M., & Zani, A. (2006). Gender differences in hemispheric asymmetry for face processing. *Bmc Neuroscience, 7*(1), 44.
- Rigoulot, S., D'Hondt, F., Honoré, J., & Sequeira, H. (2012). Implicit emotional processing in peripheral vision: Behavioral and neural evidence. *Neuropsychologia, 50*(12), 2887-2896.

- Rossion, B., Delvenne, J.-F., Debatisse, D., Goffaux, V., Bruyer, R., Crommelinck, M., & Guérit, J.-M. (1999). Spatio-temporal localization of the face inversion effect: An event-related potentials study. *Biological Psychology*, *50*, 173-189.
- Soo, C., Tate, R., & Rapee, R. (2012). *Social anxiety and its treatment in children and adolescents with acquired brain injury*. New York, NY: Guilford Press.
- Stekelenburg, J. J., & de Gelder, B. (2004). The neural correlates of perceiving human bodies: An ERP study on the body-inversion effect. *Neuroreport*, *15*(5), 777-780.
- Streit, M., Ioannides, A., Liu, L., Wölwer, W., Dammers, J., Gross, J., ... Müller-Gärtner, H.-W. (1999). Neurophysiological correlates of the recognition of facial expressions of emotion as revealed by magnetoencephalography. *Cognitive Brain Research*, *7*(4), 481-491.
- Thériault, M., De Beaumont, L., Gosselin, N., Filipinni, M., & Lassonde, M. (2009). Electrophysiological abnormalities in well functioning multiple concussed athletes. *Brain Injury*, *23*(11), 899-906.
- Therriault, M., De Beaumont, L., Tremblay, S., Lassonde, M., & Jolicoeur, P. (2011). Cumulative effects of concussions in athletes revealed by electrophysiological abnormalities on visual working memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *33*(1), 30-41. doi: 10.1080/13803391003772873
- Tottenham, N., Tanaka, J. W., Leon, A. C., McCarry, T., Nurse, M., Hare, T. A., ... Nelson, C. (2009). The NimStim set of facial expressions: Judgments from untrained research participants. *Psychiatry Research*, *168*(3), 242-249.
- Tucker, D. M. (1981). Lateral brain function, emotion, and conceptualization. *Psychological Bulletin*, *89*(1), 19-46.
- Utama, N. P., Takemoto, A., Koike, Y., & Nakamura, K. (2009). Phased processing of facial emotion: an ERP study. *Neuroscience Research*, *64*(1), 30-40.

Discussion générale

L'objectif de la présente étude était d'examiner les effets des commotions cérébrales multiples et le sexe sur les substrats neurophysiologiques précoces du traitement des EFE. Pour ce faire, des athlètes féminines et masculins ayant subi des commotions cérébrales d'origine sportive ou n'ayant jamais subi de commotion cérébrale ont complété une tâche d'identification des émotions pendant laquelle des mesures électrophysiologiques et comportementales ont été enregistrées, plus de trois mois après leur dernière commotion cérébrale.

Composante P1

Les résultats de cette étude montrent une suppression significative de la composante P1 à l'électrode PO8, soit au niveau de l'hémisphère droit, à l'amplitude maximale de la composante P1 chez les athlètes multi-commotionnés féminins et masculins. Chez les athlètes du groupe contrôle toutefois, un patron d'activation de latéralisation inter-hémisphérique avec une activité cérébrale accrue à l'hémisphère droit est observé. Ces résultats sont cohérents avec de nombreuses études qui supportent l'hypothèse de spécialisation inter-hémisphérique droite dans le traitement des émotions (Batty & Taylor, 2003; Itier & Taylor, 2004; Proverbio et al., 2006; Rossion et al., 1999). L'hémisphère droit serait particulièrement impliqué dans la perception, l'expression et l'expérience des émotions, peu importe leur valence (Borod et al., 1998; Tucker, 1981). Cette hypothèse est également supportée par de nombreuses études ERP, qui rapportent une activation

cérébrale significativement plus élevée à l'hémisphère droit en comparaison avec l'hémisphère gauche (Kestenbaum & Nelson, 1992; Laurian, Bader, Lanares, & Oros, 1991; Münte et al., 1998). De plus, l'implication du gyrus temporal supérieur droit dans la reconnaissance des émotions est une évidence supplémentaire à l'hypothèse de l'hémisphère droit dans le traitement des EFE (Adolphs, 2002; Adolphs et al., 1996; Narumoto, Okada, Sadato, Fukui, & Yonekura, 2001).

Cette hypothèse est également appuyée par les études portant sur les lésions cérébrales. Dès 1980, DeKosky, Heilman, Bowers et Valemstein ont identifié que des dommages à l'hémisphère droit semblent affecter le traitement des EFE. D'autres études ont appuyé ces résultats et suggèrent que des lésions aux cortex temporal et pariétal droits conduisent à un déficit dans l'expérience émotionnelle, la valence émotionnelle ainsi que l'imagerie mentale des émotions (Blonder, Bowers, & Heilman, 1991; Heller, 1993). Finalement, des études comparant des patients avec une lésion à l'hémisphère droit et des patients avec une lésion à l'hémisphère gauche supportent l'hypothèse de spécialisation hémisphérique droite. Dans ces études, des déficits sévères en reconnaissance des émotions chez les patients aux prises avec une lésion cérébrale à l'hémisphère droit sont observés, alors que les habiletés de reconnaissance des émotions sont relativement épargnées chez les patients ayant une lésion à l'hémisphère gauche.

Les résultats obtenus chez les athlètes commotionnés suggèrent que les commotions cérébrales multiples affectent le patron d'activation caractérisé par une spécialisation

hémisphérique droite dans le traitement des EFE. Cette suppression de l'activité cérébrale à droite lors d'une tâche d'identification des EFE est également observée chez les individus déprimés (Deldin, Keller, Gergen, & Miller, 2000; Heller, Nitschke, & Miller, 1998). Considérant le risque accru de développer une dépression chez les athlètes commotionnés (Fenton et al., 1993; Guskiewics et al., 2007), les résultats de la présente étude soulèvent la possibilité que la suppression des mécanismes électrophysiologiques liés au traitement perceptuel des EFE contribue à l'augmentation du risque de développer des symptômes dépressifs suite à de multiples commotions cérébrales.

Composante N1

Les résultats de la présente étude suggèrent également une réduction de l'amplitude de la composante antérieure N1 pour toutes les émotions chez les athlètes commotionnés masculins en comparaison avec les autres groupes à l'étude. Cette altération de l'activité cérébrale n'est toutefois pas observée chez les athlètes féminines commotionnées. Ce résultat suggère que les effets à long terme des commotions cérébrales multiples sur la composante antérieure N1 seraient spécifiques aux athlètes masculins.

Par ailleurs, une réduction de l'amplitude de la composante antérieure N1 est également observée chez les individus souffrant de dépression (Burkhart & Thomas, 1993; Dai & Feng, 2011). L'étude actuelle ne permet toutefois pas d'étudier l'interaction entre des symptômes dépressifs et une réduction de la composante N1 chez les athlètes commotionnés puisque les athlètes étaient tous asymptotiques au moment de l'étude.

Il serait toutefois intéressant d'investiguer cette association auprès d'athlètes commotionnés qui souffrent de symptômes dépressifs lors d'une tâche d'identification des EFE.

Données comportementales

Une autre mesure de cette étude consistait à la comparaison des données comportementales, notamment les temps de réaction et la justesse des réponses. Tel que prévu, les résultats montrent un effet principal de sexe, où les athlètes féminines, commotionnées ou non, sont significativement plus précises pour identifier les EFE que les athlètes masculins. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études qui suggèrent que les femmes sont significativement meilleures que les hommes pour identifier les EFE (Hall & Matsumoto, 2004; Hampson, van Anders, & Mullin, 2006; Léveillé et al., 2017).

L'interaction groupe X sexe ne s'est toutefois pas avérée significative et s'oppose aux résultats d'une récente étude qui suggère que la capacité de reconnaissance des émotions négatives est affectée chez les athlètes masculins commotionnés mais pas chez les athlètes féminines commotionnées (Léveillé et al., 2017). Il est toutefois important de noter que les stimuli utilisés dans cette dernière étude sont des visages morphés, c'est-à-dire que le visage présenté véhicule une émotion de base (colère, dégoût, peur, joie, tristesse, surprise) superposé à une autre émotion. Ce type de tâche est reconnu pour sa sensibilité à détecter les altérations subtiles dans le traitement des EFE (Bishop, Aguirre, Nunez-Elizalde, & Toker, 2015; Harmer, Grayson, & Goodwin, 2002; Humphreys, Minshew,

Leonard, & Behrmann, 2007). Dans le cadre de la présente étude, il est possible que le degré de difficulté ne soit pas assez élevé pour détecter une différence dans la justesse des réponses entre les différents échantillons. Un effet plafond a probablement réduit la sensibilité de la tâche d'identification des émotions pour identifier les effets potentiels des commotions cérébrales sur des composantes comportementales. Éventuellement, des études adaptant une tâche de reconnaissance d'émotions morphés à un protocole ERP seraient pertinentes afin d'investiguer les associations potentielles entre des altérations des composantes P1 et N1 aux données comportementales.

Limites de cette étude

Cette étude comporte certaines limites qui doivent être prises en considération dans l'interprétation des résultats. D'abord, les participants ont été classés en fonction du nombre de commotion(s) cérébrale(s) auto-rapportées, diagnostiquées par un médecin ou encore en fonction des symptômes probants plutôt qu'en fonction d'informations figurant dans leur dossier médical. Il est possible que l'exactitude des informations auto-rapportées soit biaisée par le passage du temps, surtout que les athlètes ont été testés plusieurs mois, voire plusieurs années après leur dernière commotion cérébrale. Le nombre de commotion(s) cérébrale(s) subies par les athlètes pourrait avoir été être sous-estimé. Ce phénomène est d'ailleurs rapporté dans plusieurs études effectuées auprès d'athlètes de niveau secondaire, collégial et universitaire, où environ 50 % des commotions cérébrales subies sont rapportées seulement (Delaney et al., 2002; McCrea et al., 2004). L'impact de

cette lacune méthodologique a été minimisée en excluant tous les athlètes qui présentaient certains doutes quant à leur historique de commotion cérébrale.

De plus, cette étude, de nature rétrospective, ne permet pas de comparer les athlètes en fonction de leurs propres données de base, soit avant de subir une commotion cérébrale. Des études prospectives auprès de jeunes athlètes féminines et masculins et incluant des données de bases sont nécessaires pour valider les effets à long terme des commotions cérébrales multiples sur les substrats neurophysiologiques précoces impliqués dans le traitement des EFE.

Une autre limite de la présente étude concerne le cycle menstruel ainsi que les taux des hormones au moment de tester les athlètes féminines, qui n'ont pas été considérés. Or, les effets des changements hormonaux en fonction du cycle menstruel sur la symptomatologie rapportée par les athlètes féminines sont bien démontrés (Brown et al., 2015). De plus, une étude récente suggère que les femmes qui subissent une commotion cérébrale durant la phase lutéale de leur cycle menstruel, où le niveau de progestérone est le plus élevé, présentent davantage de symptômes post-commotionnels un mois après leur blessure que les femmes qui ont subi une commotion cérébrale durant la phase folliculaire, où le niveau de progestérone est plus faible (Wunderle et al., 2014). Les changements hormonaux en fonction du cycle menstruel chez la femme ont donc un réel impact sur la récupération post-commotionnelle.

Finalement, des études à plus grande échelle et incluant un échantillon plus hétérogène des athlètes commotionnés, incluant notamment les athlètes ayant subi une commotion cérébrale unique, sont nécessaires afin de valider les résultats de la présente étude. Il serait également intéressant d'investiguer le traitement des EFE chez la population générale afin de déterminer si les résultats obtenus dans la présente étude sont généralisables à la population générale.

Considérations futures

Le but de la présente étude était d'investiguer les effets des commotions cérébrales multiples sur les substrats neurophysiologiques précoces du traitement des EFE chez les athlètes masculins et féminines de niveau collégial et universitaire. Il serait pertinent d'approfondir davantage notre compréhension de ces atteintes en conduisant des études avec des méthodes de neuroimagerie avancée qui permettraient d'investiguer les atteintes des structures impliquées dans le traitement des EFE. De plus, des études portant sur les athlètes masculins et athlètes féminines à différents âges (enfance, adolescence, âge adulte et chez les retraités) permettraient d'approfondir notre compréhension des effets des commotions cérébrales en fonction de l'âge et du sexe spécifiquement au traitement des EFE. Finalement, les effets à long terme des commotions cérébrales sont déjà bien décrits dans la littérature scientifique sur le plan cognitif et affectif (Bower et al., 2003; Chen et al., 2007; De Beaumont et al., 2009; Guskiewicz et al., 2007). Il serait toutefois intéressant d'approfondir notre compréhension des effets délétères des commotions cérébrales

spécifiques au traitement des émotions auprès des athlètes retraités ainsi que l'impact sur le plan affectif.

Conclusion générale

Le but de cet essai était d'examiner les effets des commotions cérébrales multiples et le sexe sur les substrats neurophysiologiques précoces du traitement des EFE. En somme, le présent essai fournit de nouvelles évidences des effets à long terme des commotions cérébrales sur les substrats neurophysiologiques impliqués dans le traitement des EFE, dès les premières étapes du traitement des EFE chez des athlètes asymptomatiques. Ces altérations dans le traitement des stimuli émotionnels s'apparentent aux anomalies observées chez les individus dépressifs et pourraient contribuer à d'éventuels troubles affectifs chez les athlètes multi-commotionnés. De plus, le présent essai démontre que les atteintes des mécanismes sous-jacents au traitement des stimuli émotionnels sont affectées par le sexe de l'athlète. Ces résultats supportent le besoin de considérer le sexe de l'athlète dans la prise en charge des commotions cérébrales.

Finalement, cette étude souligne également la sensibilité des ERP comme technique d'investigation pour détecter des anomalies de l'activation cérébrale impliquée dans le traitement des EFE suite à des commotions cérébrales chez des adultes.

Références générales

- Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(2), 169-177.
- Adolphs, R., Baron-Cohen, S., & Tranel, D. (2002). Impaired recognition of social emotions following amygdala damage. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(8), 1264-1274.
- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D., Cooper, G., & Damasio, A. R. (2000). A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping. *Journal of Neuroscience*, *20*(7), 2683-2690.
- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1996). Cortical systems for the recognition of emotion in facial expressions. *Journal of Neuroscience*, *16*(23), 7678-7687.
- Adolphs, R., & Tranel, D. (2003). Amygdala damage impairs emotion recognition from scenes only when they contain facial expressions. *Neuropsychologia*, *41*(10), 1281-1289.
- Bakhos, L. L., Lockhart, G. R., Myers, R., & Linakis, J. G. (2010). Emergency department visits for concussion in young child athletes. *Pediatrics*, *126*(3).
- Bar-Haim, Y., Lamy, D., & Glickman, S. (2005). Attentional bias in anxiety: A behavioral and ERP study. *Brain and Cognition*, *59*(1), 11-22.
- Batty, M., & Taylor, M. J. (2003). Early processing of the six basic facial emotional expressions. *Cognitive Brain Research*, *17*(3), 613-620.
- Bishop, S. J., Aguirre, G. K., Nunez-Elizalde, A. O., & Toker, D. (2015). Seeing the world through non rose-colored glasses: anxiety and the amygdala response to blended expressions. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 152.
- Blonder, L. X., Bowers, D., & Heilman, K. M. (1991). The role of the right hemisphere in emotional communication. *Brain*, *114*(3), 1115-1127.
- Bock, S., Grim, R., Barron, T. F., Wagenheim, A., Hu, Y. E., Hendell, M., ... Deibert, E. (2015). Factors associated with delayed recovery in athletes with concussion treated at a pediatric neurology concussion clinic. *Child's Nervous System*, *31*(11), 2111-2116.

- Borod, J. C., Cicero, B. A., Obler, L. K., Welkowitz, J., Erhan, H. M., Santschi, C., ... Whalen, J. R. (1998). Right hemisphere emotional perception: evidence across multiple channels. *Neuropsychology, 12*(3), 446.
- Bower, J. H., Maraganore, D. M., Peterson, B. J., McDonnell, S. K., Ahlskog, J. E., & Rocca, W. A. (2003). Head trauma preceding PD: A case-control study. *Neurology, 60*(10), 1610-1615.
- Broshek, D. K., & Freeman, J. R. (2005). Psychiatric and neuropsychological issues in sport medicine. *Clinics in Sports Medicine, 24*(3), 663-679.
- Brown, D. A., Elsass, J. A., Miller, A. J., Reed, L. E., & Reneker, J. C. (2015). Differences in symptom reporting between males and females at baseline and after a sports-related concussion: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine, 45*(7), 1027-1040.
- Burkhart, M. A., & Thomas, D. G. (1993). Event-related potential measures of attention in moderately depressed subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 88*(1), 42-50.
- Callahan, B. L., Ueda, K., Sakata, D., Plamondon, A., & Murai, T. (2011). Liberal bias mediates emotion recognition deficits in frontal traumatic brain injury. *Brain and Cognition, 77*(3), 412-418.
- Carton, J. S., Kessler, E. A., & Pape, C. L. (1999). Nonverbal decoding skills and relationship well-being in adults. *Journal of Nonverbal Behavior, 23*(1), 91-100.
- Chamard, E., Henry, L., Boulanger, Y., Lassonde, M., & Théoret, H. (2014). A follow-up study of neurometabolic alterations in female concussed athletes. *Journal of Neurotrauma, 31*(4), 339-345.
- Chamard, E., Lassonde, M., Henry, L., Tremblay, J., Boulanger, Y., De Beaumont, L., & Théoret, H. (2013). Neurometabolic and microstructural alterations following a sports-related concussion in female athletes. *Brain Injury, 27*(9), 1038-1046.
- Chen, J. K., Johnston, K. M., Petrides, M., & Ptito, A. (2008). Neural substrates of symptoms of depression following concussion in male athletes with persisting postconcussion symptoms. *Archives of General Psychiatry, 65*(1), 81-89.
- Chen, H., Richard, M., Sandler, D. P., Umbach, D. M., & Kamel, F. (2007). Head injury and amyotrophic lateral sclerosis. *American Journal of Epidemiology, 166*(7), 810-816.

- Cheslock, J. (2007). *Who's playing college sports? Trends in participation*. East Meadow, NY: Women's Sports Foundation.
- Ciesielski, K. T., & French, C. N. (1989). Event-related potentials before and after training: Chronometry and lateralization of visual N1 and N2. *Biological Psychology*, 28(3), 227-238.
- Coles, M. G., & Rugg, M. D. (1995). *Event-related brain potentials: An introduction*. Oxford, Royaume-Uni: Oxford University Press.
- Collins, M. W., Lovell, M. R., Iverson, G. L., Cantu, R. C., Maroon, J. C., & Field, M. (2002). Cumulative effects of concussion in high school athletes. *Neurosurgery*, 51(5), 1175-1181.
- Colvin, A. C., Mullen, J., Lovell, M. R., Vereeke West, R., Collins, M. W., & Groh, M. (2009). The role of concussion history and gender in recovery from soccer-related concussion. *The American Journal of Sports Medicine*, 37(9), 1699-1704.
- Costanza, A., Weber, K., Gandy, S., Bouras, C., Hof, P. R., Giannakopoulos, P., & Canuto, A. (2011). Contact sport-related chronic traumatic encephalopathy in the elderly: Clinical expression and structural substrates. *Neuropathology and Applied Neurobiology*, 37(6), 570-584.
- Courchesne, E., Hillyard, S. A., & Galambos, R. (1975). Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 39(2), 131-143.
- Covassin, T., Swanik, C. B., Sachs, M., Kendrick, Z., Schatz, P., Zillmer, E., & Kaminaris, C. (2006). Sex differences in baseline neuropsychological function and concussion symptoms of collegiate athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 40(11), 923-927.
- Crocker, V., & McDonald, S. (2005). Recognition of emotion from facial expression following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 19(10), 787-799.
- Dai, Q., & Feng, Z. (2011). Deficient interference inhibition for negative stimuli in depression: An event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 122(1), 52-61.
- Davis, A. S., & D'Amato, R. C. (Éds). (2010). *Handbook of pediatric neuropsychology*. New York, NY: Springer Publishing Company.
- De Beaumont, L., Brisson, B., Lassonde, M., & Jolicoeur, P. (2007). Long-term electrophysiological changes in athletes with a history of multiple concussions. *Brain Injury*, 21(6), 631-644.

- De Beaumont, L., Theoret, H., Mongeon, D., Messier, J., Leclerc, S., Tremblay, S., ... Lassonde, M. (2009). Brain function decline in healthy retired athletes who sustained their last sports concussion in early adulthood. *Brain*, *132*(3), 695-708.
- DeKosky, S. T., Heilman, K. M., Bowers, D., & Valenstein, E. (1980). Recognition and discrimination of emotional faces and pictures. *Brain and Language*, *9*(2), 206-214.
- Delaney, J. S., Lacroix, V. J., Leclerc, S., & Johnston, K. M. (2002). Concussions among university football and soccer players. *Clinical Journal of Sports Medicine*, *12*(6), 331-338.
- Deldin, P. J., Keller, J., Gergen, J. A., & Miller, G. A. (2000). Right-posterior face processing anomaly in depression. *Journal of Abnormal Psychology*, *109*(1), 116.
- Dick, R. W. (2009). Is there a gender difference in concussion incidence and outcomes? *British Journal of Sports Medicine*, *43*(Suppl 1), i46-i50.
- Dick, R. W., Hootman, J. M., Agel, J., & Marshall, S. W. (2008). Concussion rates and gender in Ncaa competitions. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *40*(5), S231.
- Di Russo, F., Martínez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S., & Hillyard, S. A. (2002). Cortical sources of the early components of the visual evoked potential. *Human Brain Mapping*, *15*(2), 95-111.
- Di Russo, F., Pitzalis, S., Spitoni, G., Aprile, T., Patria, F., Spinelli, D., & Hillyard, S. A. (2005). Identification of the neural sources of the pattern-reversal VEP. *Neuroimage*, *24*(3), 874-886.
- Eger, E., Jedynak, A., Iwaki, T., & Skrandies, W. (2003). Rapid extraction of emotional expression: Evidence from evoked potential fields during brief presentation of face stimuli. *Neuropsychologia*, *41*(7), 808-817.
- Eimer, M., & Holmes, A. (2002). An ERP study on the time course of emotional face processing. *Neuroreport*, *13*(4), 427-431.
- Eisenberg, M. A., Andrea, J., Meehan, W., & Mannix, R. (2013). Time interval between concussions and symptom duration. *Pediatrics*, *133*(6), 999-1006.
- Farace, E., & Alves, W. M. (2000). Do women fare worse? A metaanalysis of gender differences in outcome after traumatic brain injury. *Neurosurgical Focus*, *8*(1), 1-8.
- Fenton, G., McClelland, R., Montgomery, A., MacFlynn, G., & Rutherford, W. (1993). The postconcussional syndrome: Social antecedents and psychological sequelae. *The British Journal of Psychiatry*, *162*(4), 493-497.

- Gaetz, M., & Bernstein, D. M. (2001). The current status of electrophysiologic procedures for the assessment of mild traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation, 16*(4), 386-405.
- Gaetz, M., Goodman, D., & Weinberg, H. (2000). Electrophysiological evidence for the cumulative effects of concussion. *Brain Injury, 14*(12), 1077-1088.
- Garces, G. L., Medina, D., Milutinovic, L., Garavote, P., & Guerado, E. (2002). Normative database of isometric cervical strength in a healthy population. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 34*(3), 464-470.
- Gessel, L. M., Fields, S. K., Collins, C. L., Dick, R. W., & Comstock, R. D. (2007). Concussions among United States high school and collegiate athletes. *Journal of Athletic Training, 42*(4), 495-503.
- Giza, C. C., & Hovda, D. A. (2014). The new neurometabolic cascade of concussion. *Neurosurgery, 75*(suppl_4), S24-S33.
- Goldman, S. M., Tanner, C. M., Oakes, D., Bhudhikanok, G. S., Gupta, A., & Langston, J. W. (2006). Head injury and Parkinson's disease risk in twins. *Annals of Neurology, 60*(1), 65-72.
- Gosselin, N., Saluja, R. S., Chen, J. K., Bottari, C., Johnston, K., & Ptito, A. (2010). Brain functions after sports-related concussion: insights from event-related potentials and functional MRI. *The Physician and Sports Medicine, 38*(3), 27-37.
- Gosselin, N., Thériault, M., Leclerc, S., Montplaisir, J., & Lassonde, M. (2006). Neurophysiological anomalies in symptomatic and asymptomatic concussed athletes. *Neurosurgery, 58*(6), 1151-1161.
- Green, R. E., Turner, G. R., & Thompson, W. F. (2004). Deficits in facial emotion perception in adults with recent traumatic brain injury. *Neuropsychologia, 42*(2), 133-141.
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Cantu, R. C., Randolph, C., & Jordan, B. D. (2005). Association between recurrent concussion and late-life cognitive impairment in retired professional football players. *Neurosurgery, 57*(4), 719-726.
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Harding, H. P., Matthews, A., ... Cantu, R. C. (2007). Recurrent concussion and risk of depression in retired professional football players. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 39*(6), 903-909.

- Guskiewicz, K. M., McCrea, M., Marshall, S. W., Cantu, R. C., Randolph, C., Barr, W., ... Kelly, J. P. (2003). Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players: The NCAA Concussion Study. *Jama*, *290*(19), 2549-2555.
- Haider, M., Spong, P., & Lindsley, D. B. (1964). Attention, vigilance, and cortical evoked-potentials in humans. *Science*, *145*(3628), 180-182.
- Halgren, E., Baudena, P., Heit, G., Clarke, M., & Marinkovic, K. (1994). Spatio-temporal stages in face and word processing. 1. Depth recorded potentials in the human occipital and parietal lobes. *Journal of Physiology-Paris*, *88*(1), 1-50.
- Halgren, E., Raij, T., Marinkovic, K., Jousmäki, V., & Hari, R. (2000). Cognitive response profile of the human fusiform face area as determined by MEG. *Cerebral Cortex*, *10*(1), 69-81.
- Halit, H., de Haan, M., & Johnson, M. H. (2000). Modulation of event-related potentials by prototypical and atypical faces. *Neuroreport*, *11*(9), 1871-1875.
- Hall, J. A., & Matsumoto, D. (2004). Gender differences in judgments of multiple emotions from facial expressions. *Emotion*, *4*(2), 201-206.
- Hampson, E., van Anders, S. M., & Mullin, L. I. (2006). A female advantage in the recognition of emotional facial expressions: Test of an evolutionary hypothesis. *Evolution and Human Behavior*, *27*(6), 401-416.
- Harmer, C. J., Grayson, L., & Goodwin, G. M. (2002). Enhanced recognition of disgust in bipolar illness. *Biological Psychiatry*, *51*(4), 298-304.
- Heller, W. (1993). Neuropsychological mechanisms of individual differences in emotion, personality, and arousal. *Neuropsychology*, *7*(4), 476-489.
- Heller, W., Nitschke, J. B., & Miller, G. A. (1998). Lateralization in emotion and emotional disorders. *Current Directions in Psychological Science*, *7*(1), 26-32.
- Henry, J. D., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Ietswaart, M., & Summers, F. (2006). Theory of mind following traumatic brain injury: The role of emotion recognition and executive dysfunction. *Neuropsychologia*, *44*(10), 1623-1628.
- Henry, L. C., Tremblay, S., Boulanger, Y., Ellemberg, D., & Lassonde, M. (2010). Neurometabolic changes in the acute phase after sports concussions correlate with symptom severity. *Journal of Neurotrauma*, *27*(1), 65-76.

- Henry, L. C., Tremblay, S., Leclerc, S., Khiat, A., Boulanger, Y., Ellemberg, D., & Lassonde, M. (2011). Metabolic changes in concussed American football players during the acute and chronic post-injury phases. *BMC Neurology, 11*(1), 105. doi: 10.1186/1471-2377-11-105
- Heyman, A., Wilkinson, W. E., Stafford, J. A., Helms, M. J., Sigmon, A. H., & Weinberg, T. (1984). Alzheimer's disease: A study of epidemiological aspects. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society, 15*(4), 335-341.
- Holmes, A., Vuilleumier, P., & Eimer, M. (2003). The processing of emotional facial expression is gated by spatial attention: Evidence from event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research, 16*(2), 174-184.
- Holmes, A., Winston, J. S., & Eimer, M. (2005). The role of spatial frequency information for ERP components sensitive to faces and emotional facial expression. *Cognitive Brain Research, 25*(2), 508-520.
- Hootman, J. M., Dick, R., & Agel, J. (2007). Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: Summary and recommendations for injury prevention initiatives. *Journal of Athletic Training, 42*(2), 311-319.
- Humphreys, K., Minshew, N., Leonard, G. L., & Behrmann, M. (2007). A fine-grained analysis of facial expression processing in high-functioning adults with autism. *Neuropsychologia, 45*(4), 685-695.
- Ietswaart, M., Milders, M., Crawford, J. R., Currie, D., & Scott, C. L. (2008). Longitudinal aspects of emotion recognition in patients with traumatic brain injury. *Neuropsychologia, 46*(1), 148-159.
- Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2002). Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: A repetition study using ERPs. *Neuroimage, 15*(2), 353-372.
- Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2004). Effects of repetition learning on upright, inverted and contrast-reversed face processing using ERPs. *Neuroimage, 21*(4), 1518-1532.
- Iverson, G. L., Gardner, A. J., Terry, D. P., Ponsford, J. L., Sills, A. K., Broshek, D. K., & Solomon, G. S. (2017). Predictors of clinical recovery from concussion: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine, 51*(12), 941-948.
- Kerr, Z. Y., DeFreese, J. D., & Marshall, S. W. (2014). Current physical and mental health of former collegiate athletes. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 2*(8). doi: 10.1177/2325967114544107

- Kerr, Z. Y., Evenson, K. R., Rosamond, W. D., Mihalik, J. P., Guskiewicz, K. M., & Marshall, S. W. (2014). Association between concussion and mental health in former collegiate athletes. *Injury Epidemiology, 1*(1), 28.
- Kestenbaum, R., & Nelson, C. A. (1992). Neural and behavioral correlates of emotion recognition in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology, 54*(1), 1-18.
- Koerte, I. K., Lin, A. P., Muehlmann, M., Merugumala, S., Liao, H., Starr, T., ... Karch, S. (2015). Altered neurochemistry in former professional soccer players without a history of concussion. *Journal of Neurotrauma, 32*(17), 1287-1293.
- Langlois, J. A., Rutland-Brown, W., & Wald, M. M. (2006). The epidemiology and impact of traumatic brain injury: A brief overview. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation, 21*(5), 375-378.
- Laurian, S., Bader, M., Lanares, J., & Oros, L. (1991). Topography of event-related potentials elicited by visual emotional stimuli. *International Journal of Psychophysiology, 10*(3), 231-238.
- Leddy, J. J., Baker, J. G., Merchant, A., Picano, J., Gaile, D., Matuszak, J., & Willer, B. (2015). Brain or strain? Symptoms alone do not distinguish physiologic concussion from cervical/vestibular injury. *Clinical Journal of Sports Medicine, 25*(3), 237-242.
- Léveillé, E., Guay, S., Blais, C., Scherzer, P., & De Beaumont, L. (2017). Sex-related differences in emotion recognition in multi-concussed athletes. *Journal of the International Neuropsychological Society, 23*(1), 65-77.
- Lincoln, A. E., Caswell, S. V., Almquist, J. L., Dunn, R. E., Norris, J. B., & Hinton, R. Y. (2011). Trends in concussion incidence in high school sports: A prospective 11-year study. *The American Journal of Sports Medicine, 39*(5), 958-963.
- Linkenkaer-Hansen, K., Palva, J. M., Sams, M., Hietanen, J. K., Aronen, H. J., & Ilmoniemi, R. J. (1998). Face-selective processing in human extrastriate cortex around 120 ms after stimulus onset revealed by magneto-and electroencephalography. *Neuroscience Letters, 253*(3), 147-150.
- Luck, S. J. (2005). *Event-related potentials: A methods handbook*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Luck, S. J. (2012). Event-related potentials. *APA handbook of research methods in Psychology, 1*, 523-546.

- Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (Éds, 2011). *The Oxford handbook of event-related potential components*. Oxford: Oxford University Press.
- Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N. Y., & Luo, Y. J. (2010). Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial visual presentation. *Neuroimage*, 49(2), 1857-1867.
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1991). Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(4), 1057-1074.
- Marar, M., McIlvain, N. M., Fields, S. K., & Comstock, R. D. (2012). Epidemiology of concussions among United States high school athletes in 20 sports. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(4), 747-755.
- Martland, H. S. (1928). Punch drunk. *Journal of the American Medical Association*, 91(15), 1103-1107.
- McCrea, M., Hammeke, T., Olsen, G., Leo, P., & Guskiewicz, K. (2004). Unreported concussion in high school football players: Implications for prevention. *Clinical Journal of Sports Medicine*, 14(1), 13-17.
- McCrory, P., Meeuwisse, W., Dvorak, J., Aubry, M., Bailes, J., Broglio, S., ... Davis, G. A. (2017). Consensus statement on concussion in sport - the 5th international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016. *British Journal of Sports Medicine*, 51(11), 838-847.
- McKee, A. C., Cantu, R. C., Nowinski, C. J., Hedley-Whyte, E. T., Gavett, B. E., Budson, A. E., ... Stern, R. A. (2009). Chronic traumatic encephalopathy in athletes: Progressive tauopathy after repetitive head injury. *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology*, 68(7), 709-735.
- Meeren, H. K., van Heijnsbergen, C. C., & de Gelder, B. (2005). Rapid perceptual integration of facial expression and emotional body language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(45), 16518-16523.
- Miller, J. H., Gill, C., Kuhn, E. N., Rocque, B. G., Menendez, J. Y., O'Neill, J. A., ... Ferguson, D. (2016). Predictors of delayed recovery following pediatric sports-related concussion: A case-control study. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 17(4), 491-496.

- Montenegro, P. H., Alosco, M. L., Martin, B. M., Daneshvar, D. H., Mez, J., Chaisson, C. E., ... McClean, M. D. (2017). Cumulative head impact exposure predicts later-life depression, apathy, executive dysfunction, and cognitive impairment in former high school and college football players. *Journal of Neurotrauma*, *34*(2), 328-340.
- Moore, R. D., Broglio, S. P., & Hillman, C. H. (2014). Sport-related concussion and sensory function in young adults. *Journal of Athletic Training*, *49*(1), 36-41.
- Moore, R. D., Lepine, J., & Ellemberg, D. (2017). The independent influence of concussive and sub-concussive impacts on soccer players' neurophysiological and neuropsychological function. *International Journal of Psychophysiology*, *112*, 22-30.
- Morgan, C. D., Zuckerman, S. L., Lee, Y. M., King, L., Beaird, S., Sills, A. K., & Solomon, G. S. (2015). Predictors of postconcussion syndrome after sports-related concussion in young athletes: A matched case-control study. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, *15*(6), 589-598.
- Münste, T. F., Brack, M., Grootheer, O., Wieringa, B. M., Matzke, M., & Johannes, S. (1998). Brain potentials reveal the timing of face identity and expression judgments. *Neuroscience Research*, *30*(1), 25-34.
- Narumoto, J., Okada, T., Sadato, N., Fukui, K., & Yonekura, Y. (2001). Attention to emotion modulates fMRI activity in human right superior temporal sulcus. *Cognitive Brain Research*, *12*(2), 225-231.
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., ... & Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, *37*(2), 127-152.
- Pizzagalli, D. A., Lehmann, D., Hendrick, A. M., REGARD, M., Pascual-Marqui, R. D., & Davidson, R. J. (2002). Affective judgments of faces modulate early activity (~160 ms) within the fusiform gyri. *Neuroimage*, *16*(3), 663-677.
- Pizzagalli, D. A., REGARD, M., & Lehmann, D. (1999). Rapid emotional face processing in the human right and left brain hemispheres: An ERP study. *Neuroreport*, *10*(13), 2691-2698.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, *118*(10), 2128-2148.
- Polich, J., & Criado, J. R. (2006). Neuropsychology and neuropharmacology of P3a and P3b. *International Journal of Psychophysiology*, *60*(2), 172-185.

- Proverbio, A. M., Brignone, V., Matarazzo, S., Del Zotto, M., & Zani, A. (2006). Gender differences in hemispheric asymmetry for face processing. *BMC Neuroscience*, 7(1), 44.
- Rossion, B., Delvenne, J. F., Debatisse, D., Goffaux, V., Bruyer, R., Crommelinck, M., & Guérit, J. M. (1999). Spatio-temporal localization of the face inversion effect: An event-related potentials study. *Biological Psychology*, 50(3), 173-189.
- Sato, W., Kochiyama, T., Yoshikawa, S., & Matsumura, M. (2001). Emotional expression boosts early visual processing of the face: ERP recording and its decomposition by independent component analysis. *Neuroreport*, 12(4), 709-714.
- Sivanandam, T. M., & Thakur, M. K. (2012). Traumatic brain injury: A risk factor for Alzheimer's disease. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(5), 1376-1381.
- Stern, R. A., Riley, D. O., Daneshvar, D. H., Nowinski, C. J., Cantu, R. C., & McKee, A. C. (2011). Long-term consequences of repetitive brain trauma: Chronic traumatic encephalopathy. *PM&R*, 3(10), S460-S467.
- Thériault, M., De Beaumont, L., Gosselin, N., Filipinni, M., & Lassonde, M. (2009). Electrophysiological abnormalities in well functioning multiple concussed athletes. *Brain Injury*, 23(11), 899-906.
- Tierney, R. T., Sitler, M. R., Swanik, C. B., Swanik, K. A., Higgins, M., & Torg, J. (2005). Gender differences in head-neck segment dynamic stabilization during head acceleration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(2), 272-279.
- Tucker, D. M. (1981). Lateral brain function, emotion, and conceptualization. *Psychological Bulletin*, 89(1), 19-46.
- Vagnozzi, R., Signoretti, S., Cristofori, L., Alessandrini, F., Floris, R., Isgro, E., ... Del Bolgia, F. (2010). Assessment of metabolic brain damage and recovery following mild traumatic brain injury: A multicentre, proton magnetic resonance spectroscopic study in concussed patients. *Brain*, 133(11), 3232-3242.
- Vagnozzi, R., Signoretti, S., Tavazzi, B., Floris, R., Ludovici, A., Marziali, S., ... Lazzarino, G. (2008). Temporal window of metabolic brain vulnerability to concussion: A pilot 1H-magnetic resonance spectroscopic study in concussed athletes—part III. *Neurosurgery*, 62(6), 1286-1296.
- Wang, Y., Nelson, L. D., LaRoche, A. A., Pfaller, A. Y., Nencka, A. S., Koch, K. M., & McCrea, M. A. (2016). Cerebral blood flow alterations in acute sport-related concussion. *Journal of Neurotrauma*, 33(13), 1227-1236.

- Weir, D. R., Jackson, J. S., & Sonnega, A. (2009). *National football league player care foundation study of retired NFL players*. Ann Arbor: University of Michigan Institute for Social Research.
- Williams, C., & Wood, R. L. (2010). Impairment in the recognition of emotion across different media following traumatic brain injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 32(2), 113-122.
- Wunderle, M. K., Hoeger, K. M., Wasserman, M. E., & Bazarian, J. J. (2014). Menstrual phase as predictor of outcome after mild traumatic brain injury in women. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 29(5), E1-E8.
- Zani, A., & Proverbio, A. M. (Éds, 2003). Cognitive electrophysiology of mind and brain. Dans *The cognitive electrophysiology of mind and brain* (pp. 3-12). Cambridge, MA: Academic Press.
- Zemek, R., Barrowman, N., Freedman, S. B., Gravel, J., Gagnon, I., McGahern, C., ... Craig, W. (2016). Clinical risk score for persistent postconcussion symptoms among children with acute concussion in the ED. *Jama*, 315(10), 1014-1025.