

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DIFFÉRENCES INTER-SEXES DES EFFETS DES COMMOTIONS CÉRÉBRALES SUR LA  
RECONNAISSANCE DES ÉMOTIONS

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT EN PSYCHOLOGIE, PROFIL SCIENTIFIQUE-PROFESSIONNEL

PAR

EDITH LÉVEILLÉ

FÉVRIER 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Cette thèse représente l'aboutissement de huit années d'études doctorales riches en défis et expériences qui m'ont formée tant sur le plan personnel que professionnel.

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, sans qui ce projet de recherche n'aurait pas été possible. Merci à Peter qui m'a acceptée dans son laboratoire et m'a prise sous son aile alors que j'étais encore étudiante au baccalauréat. Merci de votre confiance et pour toutes les opportunités que vous m'avez données au cours de ces années. Merci aussi à Louis pour son efficacité ainsi que son enthousiasme pour mon projet et mes résultats de recherche. Je vous remercie tous les deux d'avoir cru en moi, en mon projet et de m'avoir donné la liberté de le mener jusqu'au bout. Je vous remercie également pour toutes les discussions que nous avons eues et de m'avoir toujours laissé la possibilité de m'exprimer, même si nous n'étions pas toujours d'accord. Ces expériences et ces échanges ont été enrichissants pour moi en tant qu'étudiante et future neuropsychologue clinicienne.

Je tiens ensuite à remercier mes collaborateurs, Caroline et Dave. Merci à Caroline d'avoir accepté de participer à ce projet de recherche dès le début ainsi que pour son aide à toutes les étapes, sa rigueur méthodologique et sa grande gentillesse. Merci aussi à Dave d'avoir accepté de participer à ce projet et d'avoir mis les ressources nécessaires pour sa réalisation, qui ont permis de compléter les deuxième et troisième études.

Merci à Hugues, le statisticien du département de psychologie. Merci pour ton aide dans la réalisation des analyses statistiques, ta belle curiosité et ta bonne humeur, c'était un réel plaisir de travailler avec toi.

Merci aux 130 participants qui ont contribué à l'une ou l'autre des études. Merci pour votre intérêt et votre contribution à la recherche, sans quoi rien de tout cela n'aurait été possible.

Je remercie également mes collègues de laboratoire et amies, Camille L.D., Gaëlle, Marianne et plus spécialement Martine. Merci pour votre aide précieuse à l'une ou l'autre des étapes de ce projet de recherche ainsi que pour votre soutien dans les moments plus difficiles. J'en profite pour remercier aussi mes autres collègues de laboratoire qui m'ont accompagnée à un moment ou un autre de mes études et avec qui j'ai partagé de bons moments, Alberto, Amira, Audrey, Béatrice, Bénédicte, Camille C.P., Catherine P., Frédérique, Gabrielle, Hélène, Ian, Jessica, Léa, Marie, Marjorie, Marya, Meriem, Samuel et Sophie-Andrée.

J'en profite également pour remercier mes collègues et amis du doctorat, Alexandra, Éliane, Estefania, Jean-Cyprien, Marie-Joëlle et Zineb.

Je tiens aussi à remercier mes superviseurs cliniques et plus particulièrement Isabelle, Simon et Valérie pour leur professionnalisme et leur grand humanisme qui m'ont inspirée et continuent toujours de m'inspirer à devenir la meilleure neuropsychologue clinicienne que je puisse être. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir formée, je me compte chanceuse d'avoir été supervisée par vous. Je remercie aussi les personnes avec qui j'ai partagé ces moments formateurs, notamment Camille L.D., Catherine D., Justine et Marianne. Je remercie également Annie Malenfant qui me supervise en ce moment et qui est d'une douceur, d'une gentillesse et d'une rigueur extraordinaires. Merci de prendre le temps de me superviser et de répondre à toutes mes questions, j'apprends énormément à tes côtés.

Merci à toute ma famille et mes amis pour leur soutien au cours de mes études. Merci à Éléna et Fany, mes amies du secondaire qui m'ont suivie jusqu'au doctorat. Merci à ma mère qui m'a toujours encouragée à étudier et m'a inspirée à compléter ce doctorat en réalisant elle-même des études universitaires. Merci à mon frère et ma sœur avec qui j'ai partagé ces années d'études.

Et finalement, merci à Angelo, mon amour, mon cœur. Merci d'avoir toujours cru en moi (même quand moi je n'y croyais plus) et d'avoir mis toutes les ressources nécessaires à ma disposition pour que je puisse réussir. Ta grande gentillesse, ton empathie, ton écoute sans jugement et ton soutien inconditionnel ont rendu ces années intenses un peu plus douces. *Ech hunn dech gâr.*

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	xiv
RÉSUMÉ.....	xv
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE THÉORIQUE.....	4
1.1 Traumatisme crânio-cérébral et commotion cérébrale.....	4
1.1.1 Définition.....	4
1.1.2 Facteurs de risque .....	5
1.1.2.1 Historique de commotions cérébrales.....	5
1.1.2.2 Sexe.....	6
1.1.3 Altérations structurelles .....	9
1.2 Reconnaissance des émotions faciales .....	12
1.2.1 Définition et corrélats neuronaux.....	12
1.2.2 Substrats électrophysiologiques.....	15
1.2.3 Différences liées au sexe.....	18
1.3 Effets des TCC sur la reconnaissance des émotions .....	20
1.4 Différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions .....	22
1.5 Problématique et objectifs.....	23
1.5.1 Problématique .....	23
1.5.2 Objectif général.....	25
1.5.3 Objectifs spécifiques.....	25
CHAPITRE 2 ARTICLE 1 Sex-Related Differences in Emotion Recognition in Multi-concussed Athletes	
28	
2.1 Abstract.....	29
2.2 Introduction.....	30
2.3 Method .....	33
2.3.1 Participants.....	33
2.3.2 Materials .....	34
2.3.2.1 Concussion history form and Post-Concussion Symptoms Scale.....	34
2.3.2.2 Neuropsychological testing.....	34

2.3.2.3	Morphed emotion recognition task .....	35
2.3.3	Procedure .....	36
2.3.4	Statistical Analyses .....	36
2.4	Results .....	37
2.4.1	Neuropsychological Tests .....	37
2.4.2	Emotion Recognition .....	37
2.4.2.1	Accuracy .....	37
2.4.2.2	Intensity threshold.....	38
2.4.3	Correlational Analyses.....	40
2.5	Discussion .....	42
2.6	Acknowledgments.....	45
CHAPITRE 3 ARTICLE 2 Effects of Emotion and Emotional Ambiguity on Early Visual Event-Related Potentials .....		
		46
3.1	Abstract .....	47
3.2	Introduction .....	48
3.3	Material and Methods .....	52
3.3.1	Participants.....	52
3.3.2	Stimuli and task .....	53
3.3.3	Electrophysiological recording and analysis.....	55
3.3.4	Statistical analyses .....	56
3.4	Results.....	57
3.4.1	Behavioral results.....	57
3.4.1.1	Accuracy .....	57
3.4.1.2	RT 59 .....	
3.4.2	Electrophysiological results.....	60
3.4.3	Correlational analyses .....	65
3.5	Discussion .....	65
3.6	Author note .....	70
3.7	Appendices.....	70
3.7.1	Appendix 1. Recognition threshold analysis and results. ....	70
3.7.2	Appendix 2. Number of trials for ERP analysis per condition. ....	72
3.8	Supplementary Materials .....	73
CHAPITRE 4 ARTICLE 3 Sex-Related Differences in Early Visual Processing of Emotional Facial Expressions in Multi-Concussed Athletes.....		
		76
4.1	Abstract .....	77
4.2	Introduction.....	78
4.3	Material and Methods .....	82
4.3.1	Participants.....	82
4.3.2	Materials .....	84
4.3.2.1	Concussion history form and Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS).....	84
4.3.2.2	Neuropsychological testing.....	84

4.3.2.3	Morphed emotion recognition task .....	85
4.3.2.4	Face perception control tasks.....	86
4.3.2.5	Sex hormone measures .....	87
4.3.3	Electrophysiological recording and analysis.....	88
4.3.4	Procedure .....	89
4.3.5	Statistical analyses .....	89
4.4	Results.....	91
4.4.1	Neuropsychological tests .....	91
4.4.2	Face perception control tasks.....	92
4.4.3	Emotion recognition.....	93
4.4.3.1	Behavioral results .....	93
4.4.3.1.1	Accuracy.....	93
4.4.3.1.2	Intensity threshold set at 50%.....	93
4.4.3.1.3	RT .....	94
4.4.3.2	Electrophysiological results .....	94
4.4.3.2.1	P1 .....	94
4.4.3.2.2	N170 .....	95
4.4.4	Correlational analyses.....	97
4.5	Discussion .....	98
4.6	Acknowledgements.....	101
4.7	Supplementary Materials .....	102
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE.....		116
5.1	Résumé des principaux résultats .....	116
5.1.1	Article 1 – Différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales à une tâche de reconnaissance des émotions.....	116
5.1.2	Article 2 – Adaptation et validation de la tâche de reconnaissance des émotions en EEG .....	116
5.1.3	Article 3 – Différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche de reconnaissance des émotions validée en EEG .....	117
5.2	Implications.....	118
5.2.1	Mécanismes responsables des différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions.....	118
5.2.2	Modèle théorique des différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions.....	120
5.2.3	Mécanismes compensatoires chez les athlètes commotionnés .....	121
5.2.4	Sensibilité des tâches de reconnaissance des émotions .....	123
5.2.5	Spécificité du déficit de reconnaissance des émotions négatives .....	125
5.2.6	Analyses statistiques des données EEG.....	126
5.3	Limites et pistes de recherches futures.....	128
CONCLUSION .....		130
ANNEXE A Répartition des participants de chaque groupe du premier article selon le sport pratiqué ....		132
ANNEXE B Répartition des participants de chaque groupe du troisième article selon le sport pratiqué ..		133

ANNEXE C Répartition des athlètes féminines du troisième article selon la prise de contraception hormonale ou non.....	134
ANNEXE D Précision des réponses selon le sexe des participants contrôles du premier article .....	135
ANNEXE E Seuil d'intensité selon le sexe des participants contrôles du premier article.....	136
ANNEXE F Précision des réponses selon le sexe des participants contrôles du deuxième article.....	137
ANNEXE G Temps de réaction selon le sexe des participants contrôles du deuxième article.....	138
ANNEXE H Seuil d'intensité selon le sexe des participants contrôles du deuxième article .....	139
ANNEXE I Précision des réponses selon l'intensité et le sexe des participants du premier article.....	140
ANNEXE J Précision des réponses selon l'intensité et le groupe des participants du premier article .....	141
ANNEXE K Précision des réponses selon l'intensité, le sexe et le groupe des participants du premier article.....	142
BIBLIOGRAPHIE .....	143



## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing fear and anger from 14/86% to 86/14%. .....	35
Figure 2.2 Between-group comparisons in accuracy for all emotions. ....	38
Figure 2.3 Between-group comparisons in intensity threshold for negative emotions. ....	39
Figure 2.4 Between-group comparisons in intensity threshold for positive emotions. ....	40
Figure 3.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing anger and fear in a proportion ranging from 26/74% to 74/26%, with the corresponding ambiguity levels (low, intermediate, high). Stimuli from the Radboud Faces Database, which allows free use of the faces without permission for scientific publications as stimulus examples. Figure inspired by Wang et al. (2017).....	54
Figure 3.2 Accuracy for each emotion at each ambiguity level. Individual data are shown on the left, whereas the mean and standard error of the mean (SEM) are shown on the right. ....	59
Figure 3.3 RTs for each emotion at each ambiguity level. Individual data are shown on the left, whereas the mean and SEM are shown on the right.....	60
Figure 3.4 Results of the omnibus ANOVA for the effect of emotion at all electrodes, from 100 to 200 ms. Smaller <i>F</i> values are represented by darker blues, while larger values are represented by lighter blues. ....	61
Figure 3.5 A) On the left, topographic map of the difference wave between anger and disgust from 118 to 126 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for anger and disgust as well as the difference wave at Oz with SEM. B) On the left, topographic map of the difference wave between disgust and surprise from 126 to 134 ms. On the right, ERPs for disgust and surprise as well as the difference wave at TP10 with SEM.....	61
Figure 3.6 On the left, topographic map of the difference wave between disgust and surprise at 126 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for disgust and surprise as well as the difference wave at Pz with SEM.....	63
Figure 3.7 A) On the left, topographic map of the difference wave between anger and happiness at 190 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for anger and happiness as well as the difference wave at PO10 with SEM. B) On the left, topographic map of the difference wave between anger and sadness at 190 ms. On the right, ERPs for anger and sadness as well as the difference wave at PO10 with SEM. C) On the left, topographic map of the difference wave between anger and surprise from 182 to 198 ms. On the right, ERPs for anger and surprise as well as the difference wave at PO10 with SEM. ...	63
Figure 3.8 Results of the omnibus ANOVA for the interaction between ambiguity and emotion at all electrodes, from 100 to 200 ms. Smaller <i>F</i> values are represented by darker blues, while larger values are represented by lighter blues. ....	65

Figure 3.9 Proportion of trials where the emotional facial expression was detected for each percentage of that expression, from 26% to 74%..... 71

Figure 4.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing anger and fear from 26/74% to 74/26%. ..... 85

Figure 4.2 Accuracy (in %) for each emotion at each intensity level for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ )..... 93

Figure 4.3 Intensity threshold for each emotion for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ). ..... 94

Figure 4.4 ERPs at bilateral parieto-occipital electrode sites (PO9, PO10) showing the P1 from 100 to 130 ms for male and female concussed and control participants. .... 95

Figure 4.5 ERPs at bilateral temporo-parietal electrode sites (TP9, TP10) showing the N170 from 140 to 180 ms for male and female participants. .... 96

Figure 4.6 ERPs at bilateral temporo-parietal electrode sites (TP9, TP10) showing the N170 from 140 to 180 ms for concussed and control participants. .... 97

Figure 4.7 Scalp topographies for the P1 (left) from 100 to 130 ms and the N170 (right) from 140 to 180 ms showing the mean amplitude of these two components in response to all emotions presented from 50 to 74% intensity ..... 102

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Caractéristiques des TCC selon la sévérité.....	4
Tableau 2.1 Between-group comparisons in demographic, number of concussions, time since the last concussion, BAI, BDI, and PCSS.....	34
Tableau 2.2 Between-group comparisons on neuropsychological tests.....	37
Tableau 2.3 Correlations between number of concussions, time since the last concussion, and emotion recognition in male concussed athletes, female concussed athletes, and concussed athletes as a group. ....	41
Tableau 2.4 Correlations between neuropsychological data and emotion recognition in male concussed athletes.....	42
Tableau 3.1 Summary table of significant pairwise follow-up tests results ( $p < .05$ ), including the electrode sites, the time windows of significance, and the corresponding $p$ values.....	61
Tableau 3.2 Number of trials for ERP analysis for each emotion at each ambiguity level ( $M \pm SD$ ). ....	72
Tableau 3.3 RTs (in ms) for each emotion at each ambiguity level ( $M \pm SD$ ). ....	73
Tableau 3.4 Correlations between significant electrodes and time points with corresponding accuracy scores ( $r$ and $p$ values).....	74
Tableau 4.1 Sociodemographic and clinical characteristics of male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ).....	83
Tableau 4.2 Performance on the neuropsychological tests and face perception control tasks for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ).....	92
Tableau 4.3 RTs (in ms) for each emotion at each intensity level for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ).....	103
Tableau 4.4 N170 mean amplitude (in $\mu V$ ) in each hemisphere for each emotion for male and female participants ( $M \pm SD$ ).....	104
Tableau 4.5 Significant correlations ( $p$ values in parentheses) between clinical variables as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in concussed athletes.....	105
Tableau 4.6 Significant correlations ( $p$ values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception.....	106
Tableau 4.7 Significant correlations ( $p$ values in parentheses) between clinical variables, sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female concussed athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception.....	107

Tableau 4.8 Significant correlations ( <i>p</i> values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female control athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception. ....	109
Tableau 4.9 Significant correlations ( <i>p</i> values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in male athletes. ....	111
Tableau 4.10 Significant correlations ( <i>p</i> values in parentheses) between clinical variables, sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in male A) concussed and B) control athletes.....	112
Tableau 5.1 Nombre et pourcentage de participants par groupe du premier article pratiquant chaque sport. ....	132
Tableau 5.2 Nombre et pourcentage de participants par groupe du troisième article pratiquant chaque sport. ....	133
Tableau 5.3 Nombre et pourcentage des athlètes féminines du troisième article ayant un cycle naturel ou prenant une contraception hormonale.....	134
Tableau 5.4 Précision des réponses (en %) des hommes et des femmes contrôles du premier article (M ± ET).....	135
Tableau 5.5 Seuil d'intensité (en %) des hommes et des femmes contrôles du premier article (M ± ET).136	
Tableau 5.6 Précision des réponses (en %) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET).....	137
Tableau 5.7 Temps de réaction (en ms) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET). ....	138
Tableau 5.8 Seuil d'intensité (en %) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET). ....	139
Tableau 5.9 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les hommes et les femmes du premier article (M ± ET).....	140
Tableau 5.10 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les athlètes commotionnés et contrôles du premier article (M ± ET).....	141
Tableau 5.11 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin du premier article (M ± ET). ....	142

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

Ag-AgCl	Argent-Chlorure d'argent
ANCOVA	<i>Analysis of Covariance</i> / Analyse de covariance
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> / Analyse de variance
BAI	<i>Beck Anxiety Inventory</i> / Inventaire d'anxiété de Beck
BDI-II	<i>Beck Depression Inventory-Second Edition</i> / Inventaire de dépression de Beck – Seconde édition
BVMT-R	<i>Brief Visuospatial Memory Test-Revised</i> / Test bref de mémoire visuospatiale – Révisé
CDN	<i>Canadian</i> / Canadien
CFPT	<i>Cambridge Face Perception Test</i> / Test de perception des visages de Cambridge
CI	<i>Confidence Interval</i> / Intervalle de confiance
COWAT	<i>Controlled Word Association Test</i> / Fluidité verbale
D-KEFS	<i>Delis-Kaplan Executive Function System</i> / Système de fonction exécutive de Delis-Kaplan
EEG	<i>Electroencephalography</i> / Électroencéphalographie
e.g.	<i>Exempli gratia</i> / Par exemple
ERP	<i>Event-Related Potential</i> / Potentiel évoqué ou potentiel lié à l'événement
GFMT	<i>Glasgow Face Matching Test</i> / Test d'appariement des visages de Glasgow
HEOG	<i>Horizontal Electrooculogram</i> / Électrooculogramme horizontal
ICA	<i>Independent Component Analysis</i> / Analyse par composantes indépendantes
i.e.	<i>Id est</i> / C'est-à-dire
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>

ISI	<i>Interstimulus Interval</i> / Intervalle interstimulus
IUD	<i>Intrauterine Device</i> / Dispositif intra-utérin
M	<i>Mean</i> / Moyenne
mTBI	<i>Mild Traumatic Brain Injury</i> / Traumatisme crânio-cérébral léger
PCSS	<i>Post-Concussion Symptoms Scale</i> / Échelle de symptômes post-commotionnels
PE	Potentiel évoqué ou lié à l'événement
RAVLT	<i>Rey Auditory Verbal Learning Test</i> / 15 mots de Rey
RCFT	<i>Rey Complex Figure Test</i> / Figure complexe de Rey
rpm	<i>Revolutions per minute</i> / Révolutions par minute
RT	<i>Reaction Time</i> / Temps de réaction
SD	<i>Standard Deviation</i> / Écart-type
SDMT	<i>Symbol Digit Modalities Test</i> / Test d'appariement de chiffres et de symboles
SEM	<i>Standard Error to the Mean</i> / Erreur standard
TBI	<i>Traumatic Brain Injury</i> / Traumatisme crânio-cérébral
TCC	Traumatisme crânio-cérébral
TCCL	Traumatisme crânio-cérébral léger
TMT	<i>Trail Making Test</i> / Test des tracés
VEOG	<i>Vertical Electrooculogram</i> / Électrooculogramme vertical
vs.	Versus
WAIS-IV	<i>Wechsler Adult Intelligence Scale-Fourth Edition</i> / Échelle d'intelligence de Wechsler pour adultes – Quatrième édition

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

cm	<i>Centimeter</i> / Centimètre
dB	<i>Decibel</i> / Décibel
Hz	Hertz
k $\Omega$	Kilo ohm
ms	<i>Millisecond</i> / Milliseconde
nm	<i>Nanometer</i> / Nanomètre
pg/mL	<i>Picogram per milliliter</i> / Picogramme par millilitre
$\mu$ V	Millivolt

## RÉSUMÉ

Une commotion cérébrale est une atteinte cérébrale traumatique induite par des forces biomécaniques appliquées directement à la tête ou indirectement (e.g. cou, reste du corps) avec une force impulsive transmise à la tête (McCrory *et al.*, 2017). Elle affecte un ensemble de régions et de structures cérébrales, notamment celles impliquées dans les fonctions cognitives et émotionnelles (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Plusieurs études ont documenté les effets cognitifs des commotions cérébrales, mais très peu ont porté sur ses séquelles émotionnelles. À notre connaissance, une seule étude s'est intéressée à la reconnaissance des émotions chez les athlètes multi-commotionnés et a rapporté des différences liées au sexe, les athlètes commotionnés de sexe masculin et féminin présentant des patrons d'altérations distincts (Carrier-Toutant *et al.*, 2018). Cependant, les mécanismes responsables de ces différences sexuelles ne sont pas encore bien connus.

La présente thèse vise donc à étudier les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions, mais aussi les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et certains des mécanismes sous-jacents à ces différences. Pour ce faire, nous avons effectué trois études dans lesquelles nous avons comparé les réponses comportementales et électrophysiologiques d'athlètes multi-commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à une tâche de reconnaissance des émotions. Cette tâche était composée des six expressions faciales émotionnelles de base (i.e. peur, colère, dégoût, joie, tristesse, surprise), combinées entre elles à différentes intensités (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%). Les participants devaient identifier l'émotion exprimée par le visage pendant que l'activité électrique de leur cerveau était enregistrée à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG). En plus de cette tâche, les participants devaient compléter des questionnaires psychologiques, des tests neuropsychologiques ainsi que des tâches contrôles (e.g. visuelles, de perception des visages). Ils devaient également fournir un échantillon de salive afin de mesurer les concentrations d'hormones sexuelles (i.e. estradiol, progestérone, testostérone).

Dans la première étude, les résultats ont révélé des altérations de la reconnaissance des émotions négatives chez les athlètes multi-commotionnés de sexe masculin, mais pas féminin. Plus précisément, les athlètes commotionnés masculins avaient plus de difficultés à identifier ces émotions et avaient besoin d'une plus grande intensité émotionnelle pour les reconnaître lorsqu'elles étaient présentées que les contrôles de même sexe et les athlètes féminines commotionnées. Pour leur part, les athlètes féminines commotionnées et contrôles performaient de façon comparable à la tâche.



La deuxième étude a quant à elle porté sur l'adaptation de la tâche de reconnaissance des émotions à l'EEG et sa validation auprès de participants en santé. Les résultats ont montré des effets de l'émotion, de l'ambiguïté émotionnelle ainsi qu'une interaction entre l'émotion et l'ambiguïté sur les réponses comportementales à la tâche. Ils ont aussi montré que les composantes ERP sensorielles précoces étaient toutes affectées par l'émotion. Elles n'étaient toutefois pas influencées par l'ambiguïté émotionnelle, ni par l'interaction entre l'émotion et l'ambiguïté.

Finalement, les résultats de la troisième étude n'ont pas révélé de différences dans les réponses comportementales des athlètes multi-commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à la tâche de reconnaissance des émotions adaptée à l'EEG, contrairement à la première étude. Ils ont cependant révélé des effets des commotions cérébrales multiples sur les composantes ERP sensorielles précoces, l'amplitude de la N170 des athlètes commotionnés étant plus grande que celle des contrôles. Ils ont également révélé des différences liées au sexe dans les réponses électrophysiologiques des athlètes multi-commotionnés, l'amplitude de la P1 des athlètes commotionnés masculins étant plus petite que celle des contrôles du même sexe. Ces différences sexuelles n'étaient toutefois pas liées aux niveaux des hormones sexuelles.

En somme, cette thèse a permis de révéler des effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions. Elle a aussi permis de révéler des différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et a exploré certains mécanismes responsables de ces différences. Cette thèse pourrait ainsi contribuer à l'amélioration de l'évaluation et la gestion des commotions cérébrales dans le sport, en soulignant l'importance d'évaluer les émotions et de prendre en considération le sexe de l'athlète. Elle pourrait aussi contribuer au développement d'interventions afin de remédier aux difficultés de reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés.

Mots clés : commotion cérébrale, émotion, expression faciale émotionnelle, différences sexuelles ou liées au sexe, électroencéphalographie (EEG), potentiel évoqué ou lié à l'événement (PE).

## ABSTRACT

A concussion is a traumatic brain injury (TBI) induced by biomechanical forces applied directly to the head or indirectly (e.g. neck, rest of the body) with an impulsive force transmitted to the head (McCrory *et al.*, 2017). It affects a range of brain regions and structures, including those involved in cognitive and emotional functions (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Several studies have documented the cognitive effects of concussions, but very few have focused on its emotional sequelae. To our knowledge, only one study has investigated emotion recognition in multi-concussed athletes and reported sex-related differences, with male and female concussed athletes showing distinct patterns of impairment (Carrier-Toutant *et al.*, 2018). However, the mechanisms responsible for these sex differences are not yet well understood.

The present thesis therefore aims to study the effects of multiple concussions on emotion recognition, but also the sex-related differences in emotional recognition in multi-concussed athletes and some of the mechanisms underlying these differences. To this end, we conducted three studies in which we compared the behavioral and electrophysiological responses of male and female multi-concussed and control athletes to an emotion recognition task. This task was composed of the six basic emotional facial expressions (i.e. fear, anger, disgust, happiness, sadness, surprise), combined with each other at different intensities (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%). Participants had to identify the emotion expressed by the face while the electrical activity of their brain was recorded using electroencephalography (EEG). In addition to this task, participants had to complete psychological questionnaires, neuropsychological tests as well as control tasks (e.g. visual, face perception). They also had to provide a saliva sample to measure sex hormone levels (i.e. estradiol, progesterone, testosterone).

In the first study, results revealed negative emotion recognition impairments in male, but not female, multi-concussed athletes. Specifically, male concussed athletes had more difficulty identifying these emotions and needed more emotional intensity to detect them when presented than same-sex controls and female concussed athletes. On the other hand, female concussed and control athletes performed comparably on the task.

The second study focused on the adaptation of the emotion recognition task to EEG and its validation with healthy participants. Results showed effects of emotion and emotional ambiguity as well as an interaction between emotion and ambiguity on the behavioral responses to the task. They also showed that the early

sensory ERP components were all affected by emotion. However, they were not influenced by emotional ambiguity, nor by the interaction between emotion and ambiguity.

Finally, results of the third study did not reveal differences in the behavioral responses of male and female multi-concussed and control athletes to the EEG-adapted emotion recognition task, unlike the first study. They did, however, reveal effects of multiple concussions on early sensory ERP components, with the amplitude of the N170 of concussed athletes being greater than that of controls. They also revealed sex-related differences in the electrophysiological responses of multi-concussed athletes, with the P1 amplitude of male concussed athletes being smaller than that of same-sex controls. These sex differences, however, were not related to sex hormone levels.

In sum, this thesis revealed effects of multiple concussions on emotion recognition. It also revealed sex-related differences in emotional recognition in multi-concussed athletes and explored some mechanisms responsible for these differences. This thesis could thus contribute to the improvement of the assessment and management of concussions in sport by highlighting the importance of evaluating emotions and taking into consideration the sex of the athlete. It could also contribute to the development of interventions to alleviate emotion recognition impairments in concussed athletes.

Keywords : concussion, emotion, emotional facial expression, sex-related differences, electroencephalography (EEG), event-related potential (ERP).

## INTRODUCTION

La participation féminine dans les sports a considérablement augmenté dans les dernières années. Aux États-Unis, les données collectées par la *National Collegiate Athletic Association* (NCAA) ont permis de révéler que la participation dans les sports féminins a augmenté de 80% entre 1988 et 2004, alors qu'elle n'a augmenté que de 20% dans les sports masculins (Hootman *et al.*, 2007). Ainsi, en 2021, 44% (218 122) des athlètes dans les collèges et universités américaines étaient des femmes (National Collegiate Athletic Association, 2021). Au Canada, et plus particulièrement au Québec, une tendance semblable a été observée. Entre 1999 et 2004-2005, bien que le nombre total et le pourcentage total de femmes participant dans des sports fédérés soient comparables (34% et 167 010 en 1999 vs. 33.1% et 132 047 en 2004-2005), une augmentation du pourcentage d'athlètes féminines a été enregistrée dans plus de la moitié des sports sondés, dont plusieurs considérés comme étant neutres (e.g. soccer) ou à forte représentation masculine (i.e. boxe, hockey, lutte olympique) (Landry, 2008; Légaré, 1999). De plus, toutes les fédérations sportives, à l'exception de celles de plongeon, d'escrime et de curling, ont vu leur nombre d'athlètes féminines augmenter malgré une diminution de leur proportion (Landry, 2008). En 2019, la tendance s'est maintenue, voire même légèrement accrue, 36% (203 961) des athlètes dans les fédérations étant des jeunes filles et des femmes (Claire-Bonenfant, 2019).

Nonobstant cette augmentation de la participation féminine dans les sports, les athlètes féminines sont encore à ce jour sous-représentées dans les études sur les commotions cérébrales. Des recherches récentes ont cependant commencé à s'intéresser aux différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales et révélé que les athlètes féminines sont plus à risque de subir des commotions, rapportent plus de symptômes post-commotionnels et prennent plus de temps pour récupérer et retourner au jeu que leurs homologues masculins (Covassin et Elbin, 2011; Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Koerte *et al.*, 2020; McGroarty *et al.*, 2020; Merritt *et al.*, 2019; Resch *et al.*, 2017). Plus récemment, une étude s'est intéressée aux différences sexuelles dans la reconnaissance des émotions chez les athlètes multi-commotionnés et a révélé une diminution de l'amplitude de la P1 dans l'hémisphère droit en réponse aux expressions faciales émotionnelles chez les athlètes commotionnés, mais aussi de l'amplitude de la N1 frontale chez les athlètes commotionnés masculins (Carrier-Toutant *et al.*, 2018). Elle n'a toutefois pas rapporté de différences dans la performance à la tâche de reconnaissance émotionnelle entre les athlètes multi-commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin, ce qui pourrait s'expliquer par la sensibilité limitée de la tâche. Elle n'a pas non plus investigué les mécanismes responsables de ces différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions (e.g. hormones sexuelles).

La présente thèse s'inscrit dans la continuité de ces recherches. Elle a pour objectifs d'étudier les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions, mais également d'investiguer les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et d'explorer certains mécanismes sous-jacents à ces différences. Afin de répondre à ces objectifs, nous avons comparé les réponses comportementales et électrophysiologiques d'athlètes multi-commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à une tâche de reconnaissance des émotions plus complexe. Cette tâche était composée des six expressions faciales émotionnelles de base (i.e. peur, colère, dégoût, joie, tristesse, surprise), combinées entre elles à différentes intensités (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%). Nous avons enregistré l'activité électrique du cerveau des participants à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG) pendant qu'ils effectuaient la tâche émotionnelle. Nous avons aussi administré des tâches contrôles (e.g. visuelles, de perception des visages), des tests neuropsychologiques ainsi que des questionnaires psychologiques à tous les participants. Nous avons également mesuré les concentrations d'hormones sexuelles (i.e. estradiol, progestérone, testostérone) chez tous les participants.

Cette thèse est divisée en trois articles et cinq chapitres. Le chapitre 1 décrit le contexte théorique entourant le présent projet de recherche. La première partie de ce chapitre porte sur les commotions cérébrales et présente la définition des commotions, les facteurs de risque associés (e.g. historique de commotions, sexe) ainsi que les altérations observées (e.g. structurelles, fonctionnelles). La deuxième partie porte sur la reconnaissance des émotions et présente les régions et structures cérébrales impliquées dans cette habileté, les composantes ERP sensorielles précoces associées aux émotions (i.e. P1, N1, N170) ainsi que les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle. La troisième partie relie les deux premières en présentant les résultats des études portant sur les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions ainsi que celles sur les différences sexuelles dans les effets des TCC sur la reconnaissance émotionnelle. Enfin, la dernière partie de ce chapitre décrit la problématique ainsi que les objectifs généraux et spécifiques de la thèse. Les chapitres 2, 3 et 4 correspondent aux premier, deuxième et troisième articles de thèse, respectivement. Le premier article porte sur les différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales à une tâche de reconnaissance des émotions. Le deuxième porte sur l'adaptation et la validation de la tâche en EEG auprès de participants en santé. Il présente les effets de l'émotion et de l'ambiguïté émotionnelle sur les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche. Le troisième article est la suite des deux premiers et porte sur les différences sexuelles dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche adaptée à l'EEG. Finalement, le chapitre 5 consiste en une discussion générale sur les résultats des trois articles de thèse ainsi que leurs implications cliniques et théoriques. Il aborde notamment les mécanismes responsables des effets observés dans les trois articles (e.g. hormones

sexuelles, réorganisation fonctionnelle). Il discute également des aspects méthodologiques pouvant contribuer aux différences observées entre les résultats de nos études et celles citées dans la thèse (e.g. tâches de reconnaissance des émotions, analyses statistiques des données EEG). Enfin, ce chapitre se conclut par l'énonciation des limites de la thèse et des pistes de recherches futures.

# CHAPITRE 1

## CONTEXTE THÉORIQUE

### 1.1 Traumatisme crânio-cérébral et commotion cérébrale

#### 1.1.1 Définition

Un traumatisme crânio-cérébral (TCC) est défini comme étant une atteinte cérébrale traumatique résultant de forces physiques externes appliquées directement à la tête ou indirectement (e.g. cou, reste du corps) et produisant une altération du fonctionnement cérébral (Holm *et al.*, 2005; McCrory *et al.*, 2017; Menon *et al.*, 2010; MSSS, 2005). Les TCC sont classés selon leur sévérité (voir le tableau 1.1), laquelle est déterminée par la présence et l'intensité des manifestations cliniques telles que l'amnésie post-traumatique, l'altération de l'état de conscience et le score à l'Échelle de coma de Glasgow (Teasdale et Jennett, 1974) ainsi que la présence de fracture du crâne ou de lésions intracrâniennes objectivées à l'imagerie médicale et de signes neurologiques (e.g. foyers, convulsions) observés lors de l'examen neurologique (MSSS, 2005). Le TCC sévère est caractérisé par un score entre 3 et 8 à l'Échelle de coma de Glasgow, une perte de conscience de plus de 24 heures et une amnésie post-traumatique de plus de deux semaines (MSSS, 2005). Pour sa part, le TCC modéré est défini par un score entre 9 et 12 à l'Échelle de coma de Glasgow, une perte de conscience entre 30 minutes et 24 heures ainsi qu'une amnésie post-traumatique entre un et 14 jours (MSSS, 2005). Le TCC léger (TCCL) est quant à lui caractérisé par un score entre 13 et 15 à l'Échelle de coma de Glasgow, une altération de l'état de conscience de moins de 30 minutes (avec ou sans perte de conscience) et une amnésie post-traumatique de moins de 24 heures (Holm *et al.*, 2005; MSSS, 2005). Le TCCL peut être sous-divisé en TCCL simple ou complexe selon l'absence ou la présence de fracture du crâne et de lésions intracrâniennes (ne nécessitant toutefois pas d'intervention chirurgicale), respectivement (Holm *et al.*, 2005; MSSS, 2005). Finalement, les termes TCCL et commotion cérébrale sont souvent utilisés de façon interchangeable étant donnée la similarité des symptômes, bien que le terme de commotion soit préféré pour parler des TCCL survenant exclusivement dans un contexte sportif (McCrory *et al.*, 2017).

Tableau 1.1 Caractéristiques des TCC selon la sévérité.

Caractéristiques	TCC		
	Léger	Modéré	Sévère
Score à l'Échelle de coma de Glasgow	13-15	9-12	3-8
Perte de conscience	< 30 min	30 min - 24 h	> 24 h
Amnésie post-traumatique	< 24 h	1-14 jours	> 2 semaines
Fracture du crâne ou lésions intracrâniennes	Imagerie cérébrale négative (TCCL simple) ou positive (TCCL complexe)	Imagerie cérébrale généralement positive	Imagerie cérébrale positive

Signes neurologiques	Examen neurologique positif possible	Examen neurologique positif	Examen neurologique positif
----------------------	--	--------------------------------	--------------------------------

Ainsi, et de même qu'un TCC, une commotion cérébrale peut produire des signes physiques (e.g. amnésie, perte de conscience, déficit neurologique), des symptômes somatiques (e.g. mal de tête, nausées et vomissements, étourdissements, troubles de l'équilibre), cognitifs (e.g. difficultés d'attention et de mémoire, ralentissement du traitement de l'information) et affectifs (e.g. irritabilité, stress et anxiété, tristesse) ainsi que des perturbations du cycle veille-sommeil (e.g. somnolence, augmentation ou diminution du sommeil, troubles du sommeil) (Harmon *et al.*, 2013; McCrory *et al.*, 2017; Radhakrishnan *et al.*, 2016).

Ces signes et symptômes apparaissent souvent rapidement après le coup à la tête ou au corps, mais peuvent parfois se développer sur quelques minutes à quelques heures (McCrory *et al.*, 2017). Ils sont généralement de courte durée et se résorbent spontanément après une à deux semaines dans la majorité des cas (80 à 90%) (McCrory *et al.*, 2017; Zuckerman *et al.*, 2012). Cependant, de nombreuses études ont révélé des facteurs pouvant modifier le risque de subir une commotion cérébrale et la récupération post-commotion, notamment l'historique de commotions cérébrales et le sexe féminin (Covassin *et al.*, 2018; Jotwani et Harmon, 2010).

## 1.1.2 Facteurs de risque

### 1.1.2.1 Historique de commotions cérébrales

De nombreuses études ont montré qu'un historique de commotions cérébrales est associé à un plus grand risque de subir une nouvelle commotion (Colvin *et al.*, 2009; Davis-Hayes *et al.*, 2017; Delaney *et al.*, 2002; Guskiewicz *et al.*, 2003; Guskiewicz *et al.*, 2000; Putukian *et al.*, 2021; Schulz *et al.*, 2004). Dans une première étude, Guskiewicz *et al.* (2000) ont rapporté que les joueurs de football qui avaient subi une commotion étaient trois fois plus susceptibles d'en avoir une nouvelle dans la même saison que ceux qui n'avaient pas subi une telle blessure. Dans une seconde étude, ces auteurs ont rapporté une relation dose-réponse entre le nombre de commotions cérébrales passées et la probabilité d'en avoir une, les joueurs de football avec un historique d'une commotion étant 1.4 fois plus à risque, ceux avec un historique de deux commotions, 2.5 fois plus à risque et finalement, ceux avec un historique de trois commotions ou plus, trois fois plus à risque que ceux sans antécédents (Guskiewicz *et al.*, 2003). Cette relation demeurerait significative même après avoir contrôlé pour des variables potentiellement confondantes telles que la division et la position de jeu ainsi que le nombre d'années de participation au football (Guskiewicz *et al.*, 2003). Guskiewicz *et al.* (2003) ont également observé qu'un certain pourcentage (6.5%) de ces blessures se



produisaient au cours de la même saison, dont 75% dans les sept jours suivant la dernière commotion et 91.7% dans les 10 jours. Plus récemment, Putukian *et al.* (2021) ont répliqué ces résultats en montrant que 16% des athlètes avec un historique d'une commotion cérébrale et 21% de ceux avec deux commotions et plus étaient subséquemment diagnostiqués avec une commotion au cours de l'étude, comparativement à 10% chez ceux sans antécédents. Cette association entre l'historique de commotions cérébrales et le diagnostic subséquent de commotion persistait même après avoir pris en considération le risque de commotion selon le type de sport (Putukian *et al.*, 2021).

En plus de l'augmentation du risque de commotion, les athlètes qui ont subi des commotions cérébrales multiples rapportent plus de symptômes au niveau de base (i.e. avant le début de la saison) et après une commotion que les athlètes qui ont subi une seule commotion et ceux sans antécédents (Bruce et Echemendia, 2004; Colvin *et al.*, 2009; Iverson *et al.*, 2004; Schatz *et al.*, 2011). Les athlètes multi-commotionnés souffrent aussi de symptômes plus sévères et prennent plus de temps à récupérer (Cancelliere *et al.*, 2014; Collins, M. W. *et al.*, 2002; Guskiewicz *et al.*, 2003; Guskiewicz *et al.*, 2000; Slobounov *et al.*, 2007). Outre ces symptômes subjectifs, les athlètes subissant des commotions et des impacts sous-commotionnels à répétition présentent également des déficits sur des tests neurocognitifs objectifs, notamment ceux évaluant le langage, la mémoire et les fonctions exécutives (Belanger *et al.*, 2010; Belanger et Vanderploeg, 2005; Iverson *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 2017; Redlinger *et al.*, 2022).

#### 1.1.2.2 Sexe

Des recherches récentes ont révélé des différences liées au sexe dans l'incidence et les effets des commotions cérébrales (Covassin et Elbin, 2011; Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Koerte *et al.*, 2020; McGroarty *et al.*, 2020; Merritt *et al.*, 2019; Resch *et al.*, 2017). Dans les sports pratiqués par les deux sexes, le taux d'incidence des commotions est près de deux fois plus élevé chez les femmes que chez les hommes, avec les taux les plus élevés au baseball, au softball, au basketball, au hockey sur glace et au soccer féminins (Bretzin *et al.*, 2018; Bretzin *et al.*, 2021; Chandran *et al.*, 2017; Covassin *et al.*, 2016; Davis-Hayes *et al.*, 2017; Foss *et al.*, 2018; Schallmo *et al.*, 2017). Les athlètes féminines rapportent aussi plus de symptômes et des symptômes plus sévères au niveau de base et après une commotion que leurs homologues masculins (Baker *et al.*, 2016; Benedict *et al.*, 2015; Covassin *et al.*, 2018; Davis-Hayes *et al.*, 2017; Iverson *et al.*, 2015; Merritt *et al.*, 2019; Resch *et al.*, 2017). De plus, elles présentent plus souvent des déficits cognitifs post-commotion (Broshek *et al.*, 2005) et ces déficits sont plus marqués, en particulier sur les tests évaluant la mémoire visuelle et, à un moindre degré, la vitesse de traitement de l'information et les fonctions exécutives (Colvin *et al.*, 2009; Covassin, Elbin, Bleecker, *et al.*, 2013; Covassin, Elbin, Harris, *et al.*, 2012; Dougan *et al.*, 2014; Kontos *et al.*, 2012; Sandel *et al.*, 2017;

Sicard *et al.*, 2018; Tanveer *et al.*, 2017). Leur récupération est également plus lente que celle des hommes, prenant presque deux fois plus de temps pour être asymptomatiques et retourner au jeu (Bretzin *et al.*, 2018; Bretzin *et al.*, 2021; Chand *et al.*, 2020; D'Lauro *et al.*, 2018; Davis-Hayes *et al.*, 2017; Iverson *et al.*, 2017; Stone *et al.*, 2017).

Trois mécanismes principaux ont été avancés pour expliquer ces différences sexuelles dans les commotions cérébrales (Dick, 2009). Premièrement, le mécanisme biomécanique propose que des différences physiologiques entre les hommes et les femmes pourraient contribuer au plus grand risque et aux effets plus importants des commotions chez les athlètes féminines (Covassin et Elbin, 2011; Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Koerte *et al.*, 2020; McGroarty *et al.*, 2020; Merritt *et al.*, 2019; Resch *et al.*, 2017). En moyenne, les dimensions du cou et de la tête (e.g. tour du cou, masse du segment entre la tête et le cou) ainsi que les muscles du cou sont plus faibles chez les femmes que les hommes, résultant en une moins grande force du cou ainsi que de plus grandes accélérations de la tête et du cou lors d'impacts commotionnels chez les athlètes féminines (Barth *et al.*, 2001; Garces *et al.*, 2002; Mansell *et al.*, 2005; Queen *et al.*, 2003; Tierney *et al.*, 2008; Tierney *et al.*, 2005; Vasavada *et al.*, 2008). Plusieurs études ont d'ailleurs rapporté des corrélations négatives entre la force du cou et l'accélération linéaire (e.g. lors d'un coup de tête sur un ballon de soccer) chez les athlètes féminines et une recherche a même identifié la force du cou comme étant un prédicteur des commotions chez ces athlètes (Bretzin *et al.*, 2017; Collins, C. L. *et al.*, 2014; Gutierrez *et al.*, 2014). Plus récemment, une étude a rapporté que l'accélération linéaire des impacts commotionnels chez les athlètes féminines était significativement moindre que chez les athlètes masculins (pic d'accélération linéaire moyen de 43 g vs. 98 g), suggérant que les femmes ont un seuil biomécanique pour les commotions plus faible que les hommes (Beckwith *et al.*, 2013; Brennan *et al.*, 2017; Guskiewicz, Mihalik, *et al.*, 2007; Wilcox *et al.*, 2015).

Deuxièmement, le mécanisme culturel suggère que des différences dans les normes socioculturelles de divulgation des symptômes post-commotionnels entre les hommes et les femmes pourraient expliquer la plus grande incidence des commotions et les symptômes plus importants chez les athlètes féminines (Covassin et Elbin, 2011; Covassin *et al.*, 2018; Dick, 2009; Koerte *et al.*, 2020; McGroarty *et al.*, 2020; Merritt *et al.*, 2019; Resch *et al.*, 2017). Les athlètes masculins sont encouragés et renforcés à jouer malgré la douleur et leurs blessures, voire à ne pas les rapporter, afin de montrer leur virilité (e.g. force, dureté) (Covassin et Elbin, 2011). Des études ont d'ailleurs rapporté qu'ils sont plus de deux fois plus susceptibles de ne pas rapporter leurs symptômes que les athlètes féminines (Kerr *et al.*, 2016) et qu'une des raisons pour lesquelles ils ne le font pas est qu'ils estiment que leur blessure n'est pas grave et qu'ils peuvent continuer à jouer sans danger (Delaney *et al.*, 2018; Dick, 2009; McCrea *et al.*, 2004). Les athlètes féminines, pour

leur part, seraient plus préoccupées par les effets d'une blessure sur leur santé future et donc, plus portées à révéler leurs symptômes (Covassin et Elbin, 2011; Dick, 2009; Granito, 2002; Lin *et al.*, 2018; Wallace *et al.*, 2017). Des recherches récentes ont toutefois suggéré qu'un pourcentage significatif d'athlètes féminines (i.e. 17.2-66.8%) ne rapportent pas leurs symptômes ou ne l'ont pas fait au moins une fois dans leur carrière sportive (Brook *et al.*, 2017; Gallagher *et al.*, 2018; McDonald, T. *et al.*, 2016; O'Kane *et al.*, 2014; Strand *et al.*, 2015).

Troisièmement, le mécanisme hormonal postule que les hormones sexuelles telles que l'estrogène et la progestérone pourraient contribuer aux différences liées au sexe dans le risque ainsi que les effets des commotions et des traumatismes crânio-cérébraux légers (TCCL) (Covassin et Elbin, 2011; Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Dick, 2009; Merritt *et al.*, 2019; Reddy et Collins, 2009; Resch *et al.*, 2017). En effet, ces différences sont plus souvent observées chez les femmes en âge de procréer et celles ayant un cycle menstruel naturel (i.e. n'utilisant pas une contraception hormonale), suggérant une perturbation de la production endogène d'estrogène et de progestérone (Bazarian *et al.*, 2010; Decloe *et al.*, 2014; Iverson *et al.*, 2017; Koerte *et al.*, 2020). Des auteurs ont d'ailleurs rapporté que les femmes qui avaient subi un TCCL durant la phase lutéale de leur cycle menstruel, lors de laquelle les concentrations de progestérone sont élevées, rapportaient plus de symptômes post-commotionnels ainsi qu'une moins bonne santé générale et qualité de vie un mois post-TCCL que celles qui étaient blessées pendant la phase folliculaire, lorsque les niveaux d'estrogène sont élevés, et celles qui prenaient des contraceptifs oraux (Wunderle *et al.*, 2014). Ces résultats ont été interprétés selon l'« hypothèse de sevrage », laquelle propose qu'une atteinte cérébrale se produisant dans un contexte de progestérone élevée cause une diminution rapide et soudaine de cette hormone neuroprotectrice, résultant en des effets plus importants que les atteintes survenant dans un contexte de faible progestérone (Wunderle *et al.*, 2014). Ainsi, les femmes subissant un TCCL durant la phase lutéale, lors de laquelle les concentrations de progestérone sont élevées, auraient plus de symptômes et récupérerait moins bien que celles blessées pendant la phase folliculaire et les hommes, qui ont de faibles niveaux de progestérone, ainsi que les femmes prenant des progestatifs synthétiques, qui ont des concentrations élevées de progestérone de façon continue (Wunderle *et al.*, 2014). Plus récemment, d'autres auteurs ont rapporté des résultats semblables, les athlètes féminines commotionnées qui n'utilisaient pas une contraception hormonale rapportant des symptômes plus sévères que celles qui en utilisaient une (Gallagher *et al.*, 2018).

À ces trois mécanismes principaux, d'autres auteurs ont ajouté que des différences neuroanatomiques et neurométaboliques entre les hommes et les femmes pourraient aussi contribuer aux différences sexuelles dans le risque et les effets des commotions cérébrales (Broshek *et al.*, 2005; Covassin et Elbin, 2011;

Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Merritt *et al.*, 2019). Une recherche récente a démontré pour la première fois que les axones de rates et de femmes sont plus petits et ont moins de microtubules que ceux de leurs homologues masculins et donc, sont plus à risque de se briser et/ou de montrer des signes de pathologie axonale (e.g. œdèmes, altérations des flux ioniques) que les axones masculins après un traumatisme de même sévérité (Dollé *et al.*, 2018). D'autres études ont également rapporté que les femmes ont un flux sanguin cérébral et un taux de métabolisme cérébral du glucose plus élevés que les hommes, ce qui pourrait exacerber la cascade neurométabolique des commotions et ainsi, augmenter leurs effets chez les femmes (Andreason *et al.*, 1994; Esposito *et al.*, 1996; Hu *et al.*, 2013).

### 1.1.3 Altérations structurelles

Une commotion cérébrale produit des altérations structurelles qui ne sont généralement pas détectées par des méthodes de neuroimagerie conventionnelles telles que la tomодensitométrie et l'imagerie par résonance magnétique classique (McCrorry *et al.*, 2017). Ces altérations peuvent toutefois être identifiées avec des analyses plus avancées comme la volumétrie ou des techniques de neuroimagerie plus sophistiquées telles que l'imagerie en tenseur de diffusion.

Les régions frontales et temporales sont particulièrement affectées par les commotions cérébrales et les traumatismes crânio-cérébraux (TCC) (Albaugh *et al.*, 2015; Bigler, 2007, 2018; Churchill *et al.*, 2017a; Meier, Bellgowan, *et al.*, 2016). Les régions frontales postérieures telles que l'aire prémotrice, l'aire motrice supplémentaire et les aires motrices primaires sont importantes pour la motricité, alors que les régions préfrontales dorsolatérales et ventromédianes sont impliquées dans la cognition et les émotions, respectivement, avec le lobe temporal (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Plusieurs auteurs ont rapporté des altérations de ces régions (e.g. amincissement cortical) chez les athlètes commotionnés et suggéré qu'elles pourraient expliquer les symptômes moteurs, cognitifs et affectifs des commotions (Albaugh *et al.*, 2015; De Beaumont, Henry, *et al.*, 2012; De Beaumont *et al.*, 2009; De Beaumont, Tremblay, *et al.*, 2013; De Beaumont, Tremblay, *et al.*, 2012; Meier, Bellgowan, *et al.*, 2016).

Parmi les régions temporales, le lobe temporal médian est le plus touché par les atteintes cérébrales traumatiques (Bigler, 2007, 2018; Leh *et al.*, 2017; List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Meier, Savitz, *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2014). Le lobe temporal médian inclut la formation hippocampique ainsi que les cortex hippocampique, entorhinal et périrhinal, qui sont importants pour la mémoire (Davachi et Preston, 2014; Scoville et Milner, 1957; Squire *et al.*, 2004). De nombreuses études ont observé des changements du lobe temporal médian (e.g. amincissement, diminution du volume cortical) dans les phases aiguë (moins de

trois mois) et chronique des commotions cérébrales (trois mois et plus post-commotion) (List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Meier, Savitz, *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2014). Dans toutes ces études, les changements observés étaient associés à des mesures d'exposition (e.g. nombre de commotions ou de coups à la tête subis, d'années passées à jouer au football), suggérant que les commotions, mais aussi les impacts sous-commotionnels, pourraient avoir un effet cumulatif et chronique (List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Meier, Savitz, *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2014).

En plus du lobe temporal médian, l'insula et les structures du système limbique telles que l'amygdale, l'hippocampe et le gyrus cingulaire sont touchés par les commotions cérébrales (Banks *et al.*, 2014; Bigler, 2018; Churchill *et al.*, 2017a; Ganpule *et al.*, 2017; List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Slobounov *et al.*, 2017). L'insula et le système limbique sont impliqués dans différents aspects des émotions, allant de la reconnaissance à la régulation émotionnelle (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Plusieurs auteurs ont rapporté des altérations de l'insula et des structures limbiques (e.g. amincissement, changements dans l'intégrité de la matière blanche) suite à des commotions et impacts sous-commotionnels (Churchill *et al.*, 2017a; List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Slobounov *et al.*, 2017). Certains ont même rapporté des effets dose-dépendants, indiquant que plus les athlètes avaient subi de commotions ou de coups à la tête, plus ils présentaient des altérations de ces structures (List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014). Considérant le rôle de l'insula, du système limbique et du lobe temporal médian dans les fonctions cognitives et émotionnelles, il a été proposé que les atteintes de ces régions et structures pourraient contribuer aux troubles cognitifs et aux symptômes anxiodépressifs observés dans les phases aiguë et chronique des commotions cérébrales (Hart *et al.*, 2013; List *et al.*, 2015; McAllister *et al.*, 2014; Strain *et al.*, 2013).

Outre le cortex cérébral, la matière blanche et ses nombreux faisceaux sont particulièrement affectés par les commotions (Bazarian *et al.*, 2014; Bigler, 2018; Gardner *et al.*, 2012; Henry, L. C. *et al.*, 2017; Tremblay *et al.*, 2014; Tremblay *et al.*, 2017). Les atteintes du corps calleux, du faisceau fronto-occipital ainsi que des faisceaux longitudinaux inférieur et supérieur, des voies corticospinales et de la capsule interne sont plus souvent rapportées (Cubon *et al.*, 2011; Gajawelli *et al.*, 2013; Gardner *et al.*, 2012; Henry, L. C., Tremblay, Tremblay, *et al.*, 2011; Henry, L. C. *et al.*, 2017; Herweh *et al.*, 2016; Tremblay *et al.*, 2014). Ces atteintes sont observées dans les phases aiguë et chronique des commotions cérébrales (Casson *et al.*, 2014; Churchill *et al.*, 2017a; Churchill *et al.*, 2017b; Henry, L. C., Tremblay, Tremblay, *et al.*, 2011; Lancaster *et al.*, 2016; Meier, Bergamino, *et al.*, 2016; Murugavel *et al.*, 2014) et sont liées au nombre de commotions et d'impacts sous-commotionnels subis (Bazarian *et al.*, 2014; Casson *et al.*, 2014; Davenport *et al.*, 2014; Herweh *et al.*, 2016; Lipton *et al.*, 2013; McAllister *et al.*, 2014; Wilde *et al.*, 2016). Elles sont également liées à des

mesures cliniques telles que le fonctionnement cognitif et les symptômes dépressifs (Davenport *et al.*, 2014; Hart *et al.*, 2013; Lipton *et al.*, 2013; McAllister *et al.*, 2014; Multani *et al.*, 2016; Strain *et al.*, 2013; Wilde *et al.*, 2016).

Plus récemment, des altérations des structures sous-corticales telles que l'hypophyse, l'hypothalamus, le thalamus et les ganglions de la base ont été identifiées dans les commotions cérébrales (Banks *et al.*, 2014; Bernick *et al.*, 2015; Bigler, 2018; Cubon *et al.*, 2011; Mayer *et al.*, 2017; McAllister *et al.*, 2014). En particulier, les altérations de l'hypothalamus et de l'hypophyse pourraient expliquer les perturbations du cycle menstruel (e.g. aménorrhée, irrégularités du cycle menstruel), lesquelles pourraient contribuer aux différences liées au sexe observées dans les effets des commotions (Colantonio *et al.*, 2010; Cytowic *et al.*, 1986; Ripley *et al.*, 2008; Snook *et al.*, 2017).

Des différences sexuelles dans les altérations structurelles causées par les commotions cérébrales et les TCCL ont d'ailleurs été documentées (Fakhran *et al.*, 2014; Helmer *et al.*, 2014; Hsu *et al.*, 2015; Koerte *et al.*, 2020; McGroarty *et al.*, 2020; Schranz *et al.*, 2018; Sollmann *et al.*, 2018). Émilie Chamard a été l'une des premières à s'intéresser aux changements neurométaboliques et microstructurels causés par les commotions et les impacts sous-commotionnels chez les athlètes féminines (Chamard *et al.*, 2013; Chamard *et al.*, 2016; Chamard *et al.*, 2012). Dans une de ses études chez des athlètes de sexe masculin et féminin sans diagnostic de commotion cérébrale, elle a observé que les athlètes féminines présentaient une diminution de certains ratios métaboliques au cours de la saison de hockey, alors que ces ratios demeuraient stables chez les athlètes masculins, suggérant des atteintes neuronales dues à des impacts sous-commotionnels et une plus grande sensibilité des femmes à ce type d'atteintes (Chamard *et al.*, 2012). De façon semblable, une recherche récente a rapporté des changements structurels dans la matière blanche (e.g. faisceau longitudinal supérieur, capsule interne, corona radiata) chez les athlètes féminines au cours de la saison, mais pas chez leurs homologues masculins, appuyant l'hypothèse d'une plus grande vulnérabilité des femmes aux impacts sous-commotionnels (Sollmann *et al.*, 2018). Enfin, une étude chez des patients avec TCCL a montré que les femmes qui avaient subi une atteinte cérébrale traumatique avaient des scores plus faibles aux séquences de chiffres, un test évaluant la mémoire à court terme et de travail, que les femmes contrôles, sans atteinte cérébrale. De plus, elles présentaient une hypoactivation des régions frontales et pariétales lors d'une tâche de mémoire de travail un mois après un TCCL et continuaient à présenter cette hypoactivation six semaines plus tard, alors que les hommes montraient une hyperactivation puis une régression de cette hyperactivation, ce qui pourrait indiquer une meilleure récupération (Hsu *et al.*, 2015).

En résumé, les études de neuroimagerie ont identifié de nombreuses altérations structurelles causées par les atteintes cérébrales traumatiques. Le caractère unique de chaque blessure (e.g. type de sport et mécanisme de blessure, port du casque ou non, anticipation de l'impact ou non) peut expliquer les différences dans la localisation des lésions d'une étude à l'autre, mais le cortex frontotemporal et les faisceaux de matière blanche semblent préférentiellement affectés. L'insula et les structures sous-corticales, incluant celles du système limbique telles que l'amygdale et l'hippocampe, sont également touchés. Ces altérations sont observées tant dans les phases aiguë que chronique des commotions cérébrales et liées à différentes mesures cliniques (e.g. nombre de commotions ou d'impacts sous-commotionnels, fonctionnement cognitif, symptomatologie anxiodépressive). Bien que peu de recherches se soient intéressées aux différences liées au sexe dans les commotions cérébrales et les TCCL, elles suggèrent néanmoins que les femmes sont plus susceptibles à certains types d'atteintes que les hommes, ce qui pourrait contribuer aux différences sexuelles dans l'incidence et les effets des commotions.

## 1.2 Reconnaissance des émotions faciales

### 1.2.1 Définition et corrélats neuronaux

La reconnaissance des émotions faciales est la capacité à percevoir une expression faciale émotionnelle et identifier sa signification émotionnelle en l'associant notamment à des connaissances et souvenirs en mémoire (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003). Elle implique un ensemble de régions et structures corticales et sous-corticales, incluant le cortex visuel, l'amygdale, le cortex préfrontal, l'insula, les régions somesthésiques et les ganglions de la base (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011).

Les régions occipitotemporales du cortex visuel extrastrié sont impliquées dans l'analyse visuelle des visages et des expressions faciales émotionnelles (Allison *et al.*, 1999; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Haxby *et al.*, 2000, 2002; Hoffman et Haxby, 2000; Sabatinelli *et al.*, 2011; Streit *et al.*, 1999). Le cortex occipitotemporal ventral, le gyrus temporal médian ainsi que le cortex temporal latéral postérieur et ventral antérieur sont activés spécifiquement par des visages (Allison *et al.*, 1999). De même, l'aire fusiforme des visages est plus activée par des visages intacts que des visages brouillés ou schématiques et d'autres stimuli qui ne sont pas des visages (e.g. mains, maisons, objets), ce qui suggère que cette aire est sélectivement impliquée dans la perception des visages (Halgren *et al.*, 2000; Kanwisher, 2000; Kanwisher *et al.*, 1997). Pour sa part, le sulcus temporal supérieur est activé par des mouvements des parties du visage (e.g. yeux, bouche), suggérant qu'il est sollicité pour l'analyse des aspects changeants des visages tels que la direction du regard et les expressions faciales émotionnelles (Adolphs, 2002a, 2002b; Allison *et al.*, 2000; Haxby *et al.*, 2000, 2002; Hoffman et Haxby, 2000). En plus de leur rôle dans la perception des visages, les régions occipitotemporales

inférieures du cortex visuel, le gyrus fusiforme ainsi que le cortex temporal médian et supérieur ont aussi été impliqués dans le traitement des expressions faciales émotionnelles (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Sabatinelli *et al.*, 2011; Streit *et al.*, 1999). Ces régions permettraient de différencier les expressions faciales émotionnelles des visages neutres (Fusar-Poli *et al.*, 2009; Hinojosa *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2010; Zhang, D. *et al.*, 2013), mais également de détecter rapidement des expressions faciales potentiellement menaçantes telles que la colère et la peur (Luo *et al.*, 2010; Vuilleumier et Pourtois, 2007; Zhang, D. *et al.*, 2013).

L'amygdale contribue aussi à la reconnaissance des visages et des expressions faciales émotionnelles (Adolphs, 2002a, 2002b, 2008; Costafreda *et al.*, 2008; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Mende-Siedlecki *et al.*, 2013; Rutishauser *et al.*, 2011; Sabatinelli *et al.*, 2011). De nombreuses études de neuroimagerie ont rapporté une activation de l'amygdale aux expressions faciales émotionnelles, plus particulièrement aux expressions négatives telles que la peur et la colère (Breiter *et al.*, 1996; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Mattavelli *et al.*, 2014; Morris *et al.*, 1996; Phillips *et al.*, 1998; Whalen *et al.*, 2004; Whalen *et al.*, 2001). De plus, un déficit sélectif de la reconnaissance des émotions négatives est observé après des lésions complètes des noyaux basolatéral et centromédian de l'amygdale (Adolphs et Tranel, 2004; Adolphs *et al.*, 1994; Adolphs *et al.*, 1995; Adolphs *et al.*, 1999; Anderson et Phelps, 2000; Broks *et al.*, 1998; Calder, Young, Rowland, *et al.*, 1996). Ces résultats ont été interprétés comme reflétant la détection automatique et rapide de stimuli potentiellement menaçants ou dangereux par l'amygdale, à l'instar des régions occipitotemporales du cortex visuel extrastrié (Adolphs *et al.*, 1999; Mattavelli *et al.*, 2014). Cependant, d'autres recherches ont également rapporté une réponse de l'amygdale aux visages neutres ainsi qu'aux expressions faciales de joie et de tristesse (Blair, R. *et al.*, 1999; Breiter *et al.*, 1996; Fried *et al.*, 1997; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 1999; Mende-Siedlecki *et al.*, 2013; Rutishauser *et al.*, 2011). Une réponse pour toutes les expressions faciales émotionnelles a même été observée dans certaines études (Costafreda *et al.*, 2008; Fitzgerald *et al.*, 2006; Yang, T. *et al.*, 2002). En outre, les patients qui ont des lésions partielles de l'amygdale, affectant le noyau basolatéral mais préservant le noyau centromédian, présentent un patron de reconnaissance des émotions différent de ceux ayant des lésions complètes, avec une hypersensibilité à la peur (Terburg *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017). Ainsi, il a été suggéré que l'amygdale pourrait aussi identifier l'intensité et l'ambiguïté des stimuli ainsi que moduler la vigilance et l'attention en fonction de ces paramètres (Adams Jr *et al.*, 2003; Blair, R. *et al.*, 1999; Cunningham *et al.*, 2004; Morris *et al.*, 1996; Posamentier et Abdi, 2003; Wang *et al.*, 2017; Whalen, 1998).

Le cortex préfrontal participe également à la reconnaissance des émotions par ses connexions avec l'amygdale et les autres structures du système limbique (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009;



Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Des activations dans les régions préfrontales ventromédianes, orbitofrontales et cingulaires antérieures en réponse à des visages et des expressions faciales émotionnelles ont notamment été rapportées dans des études électrophysiologiques et de neuroimagerie (Blair, R. *et al.*, 1999; Kawasaki *et al.*, 2001; Marinkovic *et al.*, 2000; Sabatinelli *et al.*, 2011; Vuilleumier *et al.*, 2001). Ces régions seraient particulièrement activées par des stimuli aversifs tels que des expressions faciales de peur et de colère (Blair, R. *et al.*, 1999; Kawasaki *et al.*, 2001; Vuilleumier *et al.*, 2001). De plus, la stimulation du cortex frontal médian affecterait la reconnaissance des expressions de colère, les participants prenant plus de temps pour répondre correctement suivant la stimulation du cortex frontal médian que celle d'autres régions ou la non-stimulation (Harmer *et al.*, 2001). En outre, des déficits de reconnaissance des émotions ont été observés chez des patients avec des lésions préfrontales ventromédianes et ventrolatérales, orbitofrontales ainsi que cingulaires antérieures (Heberlein *et al.*, 2008; Hornak *et al.*, 2003; Hornak *et al.*, 1996; Marinkovic *et al.*, 2000; Tsuchida et Fellows, 2012). Les lésions unilatérales et bilatérales du cortex orbitofrontal seraient associées à des déficits de reconnaissance des expressions faciales et/ou vocales émotionnelles, alors que seules les lésions bilatérales produiraient des changements significatifs dans le comportement social et l'état émotionnel subjectif des patients (Hornak *et al.*, 2003). Pour leur part, les lésions unilatérales du cortex cingulaire antérieur produiraient des changements significatifs dans l'état émotionnel subjectif et seraient parfois liées à des déficits de reconnaissance des expressions faciales et/ou vocales émotionnelles (Hornak *et al.*, 2003). Dans deux études lésionnelles, les déficits de reconnaissance des émotions étaient corrélés avec l'expérience émotionnelle subjective, laquelle était corrélée avec les problèmes comportementaux (e.g. désinhibition ou comportement socialement inapproprié, impulsivité) des patients ayant des lésions préfrontales (Heberlein *et al.*, 2008; Hornak *et al.*, 1996). Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que le cortex préfrontal est impliqué dans différents aspects des émotions, allant de l'expérience subjective à la reconnaissance des émotions. D'ailleurs, l'expérience émotionnelle subjective pourrait contribuer aux déficits de reconnaissance des émotions observés après des lésions préfrontales, lesquels pourraient expliquer les difficultés sociales des patients avec de telles lésions.

Finalement, l'insula, les aires somesthésiques du cortex pariétal et les ganglions de la base, notamment le striatum, contribuent aussi à la reconnaissance des émotions (Adolphs, 2002a, 2002b; Calder *et al.*, 2001; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003). Plusieurs études de neuroimagerie ont montré que l'insula, les régions pariétales et le striatum, incluant le putamen et le noyau caudé, sont activés par des expressions faciales émotionnelles, plus particulièrement celles de dégoût (Fusar-Poli *et al.*, 2009; Gorno-Tempini *et al.*, 2001; Phillips *et al.*, 1998; Phillips *et al.*, 1997; Sprengelmeyer *et al.*, 1998). D'autres études ont observé que les patients qui souffrent de maladies affectant préférentiellement ces régions (e.g. maladie de Huntington, syndrome de Gilles de la Tourette, trouble obsessionnel-compulsif) présentent des déficits de

reconnaissance et dans l'expérience subjective des émotions négatives, en particulier du dégoût (Adolphs *et al.*, 2003; Calder *et al.*, 2000; Gray *et al.*, 1997; Sprengelmeyer *et al.*, 1997; Sprengelmeyer *et al.*, 1996). De plus, des associations ont été rapportées entre les déficits de reconnaissance des émotions et les lésions de l'insula, du gyrus supramarginal ainsi que du cortex pariétal ventral et latéral, notamment des cortex somesthésiques primaire et secondaire (Adolphs *et al.*, 2000; Adolphs *et al.*, 1996). Globalement, ces études suggèrent que l'insula, les aires somesthésiques du cortex pariétal et les ganglions de la base participent tous à l'expérience et la reconnaissance du dégoût.

Pour résumer, la reconnaissance des émotions est un processus complexe qui implique un ensemble de régions et structures corticales et sous-corticales, incluant les régions occipitotemporales du cortex visuel extrastrié, l'amygdale, le cortex préfrontal ainsi que l'insula, les aires somesthésiques du cortex pariétal et les ganglions de la base. Certaines de ces régions et structures sont impliquées de façon générale dans la reconnaissance des émotions, contribuant à discriminer des expressions faciales émotionnelles de visages neutres, alors que d'autres se sont spécialisées dans le traitement d'émotions spécifiques telles que le dégoût ou celles signalant une menace ou un danger potentiel (i.e. colère, peur).

### 1.2.2 Substrats électrophysiologiques

Les études portant sur les corrélats neuronaux de la reconnaissance des émotions ont principalement utilisé des techniques de neuroimagerie telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle en raison de leur résolution spatiale élevée. Bien qu'elles aient permis d'identifier les régions et structures impliquées dans la reconnaissance émotionnelle, la plupart des techniques d'imagerie ont une faible résolution temporelle qui ne permet pas d'apprécier le décours temporel de cette habileté. En revanche, l'EEG, avec sa résolution temporelle élevée, permet de révéler les différentes étapes de la reconnaissance des émotions, allant de la détection automatique et rapide des expressions faciales potentiellement menaçantes ou dangereuses à la distinction entre les expressions émotionnelles et neutres jusqu'à la discrimination entre les différentes émotions (Luo *et al.*, 2010). Plusieurs études ont d'ailleurs rapporté que les composantes ERP sensorielles précoces telles que la P1, la N1 et la N170 peuvent être modulées par les expressions faciales émotionnelles (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Durston, A. J. et Itier, 2021; Luo *et al.*, 2010; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006; Zhang, D. *et al.*, 2013).

La P1 visuelle est la première déflexion positive dans la courbe ERP émergeant entre 60 et 90 ms après l'apparition du stimulus et culminant entre 100 et 130 ms aux électrodes occipitales latérales (Luck, 2014). La partie précoce de cette composante originerait du gyrus occipital médian, alors que la partie plus tardive proviendrait du gyrus fusiforme (Di Russo *et al.*, 2001). En raison de ses origines dans le cortex extrastrié,

la P1 est sensible aux caractéristiques visuelles de bas niveau des stimuli telles que la taille, le contraste et la luminance (Luck, 2014). Elle est aussi modulée par l'attention et l'état d'éveil (*arousal*) du participant, avec une plus grande amplitude dans des conditions d'éveil élevée (*high arousal*) que modérée (*moderate arousal*) (Hillyard *et al.*, 1998; Luck *et al.*, 2000; Vogel et Luck, 2000). Des études ont révélé que la P1 est également sensible au contenu émotionnel des stimuli, avec une plus grande amplitude pour les images déplaisantes que pour celles plaisantes et/ou neutres (Carretié *et al.*, 2006; Carretié *et al.*, 2004; De Cesarei et Codispoti, 2006; Delplanque *et al.*, 2004; Hot *et al.*, 2006; Olofsson *et al.*, 2008; Smith, N. K. *et al.*, 2003). De plus, les études portant sur les expressions faciales émotionnelles ont rapporté une plus grande P1 en réponse aux expressions de colère, de dégoût et de peur qu'à celles de joie et/ou aux visages neutres (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Luo *et al.*, 2010; Pourtois *et al.*, 2004; Rellecke *et al.*, 2012; Smith, E. *et al.*, 2013; Williams, L. M. *et al.*, 2006), bien que d'autres n'aient pas observé un tel biais de négativité (Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Meeren *et al.*, 2005; Schindler *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2017; Turano *et al.*, 2017).

La N1 visuelle est le premier potentiel évoqué négatif qui est la somme de différentes sous-composantes (Luck, 2014). La sous-composante la plus précoce de la N1 culmine entre 100 et 150 ms après la présentation du stimulus aux électrodes antérieures, alors que deux autres sous-composantes culminent plus tard, entre 150 et 200 ms post-stimulus aux électrodes postérieures, une originant du cortex occipital latéral et l'autre du cortex pariétal (Luck, 2014). De façon semblable à la P1 visuelle, la N1 est modulée à la fois par l'attention et les émotions (Carretié *et al.*, 2007; Foti *et al.*, 2009; Hajcak *et al.*, 2012; Hillyard *et al.*, 1998; Keil *et al.*, 2002; Keil *et al.*, 2001; Weinberg et Hajcak, 2010). Des études ont rapporté une augmentation de l'amplitude de cette composante aux stimuli plaisants et déplaisants comparativement à ceux neutres (Carretié *et al.*, 2007; Foti *et al.*, 2009; Hajcak *et al.*, 2012; Keil *et al.*, 2001; Schupp *et al.*, 2003; Weinberg et Hajcak, 2010). Contrairement à cette modulation émotionnelle indifférenciée, la majorité des études portant sur les expressions faciales émotionnelles ont observé un biais de négativité, avec une plus grande N1 en réponse aux expressions négatives (e.g. peur, détresse) qu'à celles positives (i.e. joie) et/ou neutres (Holmes *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2010; Proverbio *et al.*, 2006; Zhang, D. *et al.*, 2013), avec seulement quelques-unes ne rapportant pas de modulation émotionnelle (Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Pourtois *et al.*, 2004). Il a alors été proposé que la P1 et la N1 reflètent la détection rapide et grossière d'expressions faciales potentiellement menaçantes, avant une analyse plus détaillée des visages dans le cortex visuel postérieur autour de 170 ms (Luo *et al.*, 2010; Vuilleumier et Pourtois, 2007).

La N170 est aussi un potentiel évoqué négatif, mais qui est observé aux électrodes occipitotemporales bilatérales, avec de plus grandes amplitudes dans l'hémisphère droit (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012).

Cette composante émerge vers 140 ms et culmine vers 160-170 ms après l'apparition du stimulus, d'où son nom (N pour représenter sa valeur négative et 170 pour sa latence) (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012). Elle est plus négative pour les visages que pour les autres stimuli qui ne sont pas des visages, ce qui a été interprété comme reflétant le traitement perceptif des visages (Bentin *et al.*, 1996; Bentin et Deouell, 2000; Rossion et Jacques, 2012). Les générateurs de source de cette composante ont été proposés comme étant localisés dans le cortex occipitotemporal latéral et le gyrus fusiforme (Bötzel *et al.*, 1995; Deffke *et al.*, 2007; Pizzagalli *et al.*, 2002; Rossion *et al.*, 2003; Schweinberger *et al.*, 2002; Shibata *et al.*, 2002). D'autres générateurs dans le gyrus lingual, la partie postérieure du sulcus temporal supérieur ainsi que dans un réseau pariéto-temporo-occipital ont également été suggérés (Herrmann *et al.*, 2005; Itier et Taylor, 2004b; Taylor *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2003). À l'instar des autres composantes ERP sensorielles précoces, la modulation émotionnelle de la N170 est controversée, certaines études observant une augmentation de l'amplitude de cette composante aux expressions faciales émotionnelles comparativement aux visages neutres (Luo *et al.*, 2010; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006) et d'autres ne rapportant pas un tel effet (Ashley *et al.*, 2004; Eimer et Holmes, 2002; Eimer *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2005; Wild-Wall *et al.*, 2008). Les études montrant une modulation émotionnelle de la N170 ont notamment rapporté une plus grande amplitude de cette composante en réponse aux expressions de colère, de dégoût et/ou de peur qu'à celles de joie et/ou aux visages neutres (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Blau *et al.*, 2007; Rellecke *et al.*, 2011; Roberge *et al.*, 2019; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017). Des recherches plus récentes ont également observé une augmentation de l'amplitude de la N170 en réponse aux expressions de joie qu'aux visages neutres (Hinojosa *et al.*, 2015; Kolassa *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2010; Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006), suggérant que cette composante reflète la discrimination des expressions faciales émotionnelles (à la fois menaçantes et non-menaçantes) des visages neutres, sans distinction entre les différentes émotions (Luo *et al.*, 2010).

En résumé, l'EEG, de par sa résolution temporelle élevée, est une méthode qui permet de révéler les différentes étapes de la reconnaissance des émotions, allant de la détection automatique de certaines expressions faciales émotionnelles à la discrimination entre les différentes émotions. Les études portant sur la modulation émotionnelle des composantes ERP sensorielles précoces, reflétant les premières étapes de la reconnaissance des émotions, ont cependant révélé des résultats parfois contradictoires. Plusieurs ont rapporté que la P1 et la N1 sont modulées par les émotions négatives, ce qui a été interprété comme reflétant la détection automatique et rapide des expressions faciales potentiellement menaçantes ou dangereuses. Pour sa part, la N170 serait modulée à la fois par les émotions positives et négatives, suggérant qu'elle serait impliquée dans la discrimination des expressions faciales émotionnelles des neutres, sans distinction entre

les différentes émotions. Quelques études n'ont toutefois pas observé de modulation émotionnelle des composantes ERP sensorielles précoces, ce qui pourrait s'expliquer entre autres par des différences méthodologiques (e.g. comparaison d'une ou de plusieurs émotions de valence positive et/ou négative avec un visage neutre) et statistiques (e.g. utilisation de méthodes d'analyse conventionnelle ou plus avancée des ERP).

### 1.2.3 Différences liées au sexe

De façon semblable aux commotions cérébrales, des différences liées au sexe dans la reconnaissance des émotions ont été documentées (Kret et De Gelder, 2012; McClure, 2000; Petrovic *et al.*, 2019; Thompson et Voyer, 2014). Les femmes sont généralement plus précises et rapides à identifier les émotions que les hommes (Hall et Matsumoto, 2004; Hampson *et al.*, 2006; Montagne *et al.*, 2005; Sasson *et al.*, 2010; Saylik *et al.*, 2018; Thayer et Johnsen, 2000; Wingenbach *et al.*, 2018). Cet avantage féminin pourrait cependant varier en fonction des caractéristiques des stimuli telles que l'émotion et l'intensité émotionnelle (Thompson et Voyer, 2014). En ce qui concerne l'émotion, certaines études ont observé que les femmes étaient meilleures à reconnaître toutes les émotions, qu'elles soient positives ou négatives (Hampson *et al.*, 2006; Saylik *et al.*, 2018; Thompson et Voyer, 2014), alors que d'autres ont rapporté que leur avantage était accentué pour les émotions négatives telles que la colère, la peur ou la tristesse (Hampson *et al.*, 2006; Kessels *et al.*, 2014; Petrovic *et al.*, 2019; Sasson *et al.*, 2010; Thompson et Voyer, 2014; Weisenbach *et al.*, 2014). Pour ce qui est de l'intensité émotionnelle, les recherches ont habituellement montré que les femmes sont plus sensibles à des expressions faciales émotionnelles présentées à faible intensité que les hommes (Hall et Matsumoto, 2004; Hoffmann *et al.*, 2010; Lee, N. C. *et al.*, 2013; Montagne *et al.*, 2005; Sasson *et al.*, 2010). Inversement, ces derniers ont plus de difficultés à détecter une émotion dans un visage (qu'ils vont alors identifier comme étant neutre) et distinguer les différentes émotions entre elles (Sasson *et al.*, 2010; Thayer et Johnsen, 2000).

Plusieurs théories ont été proposées afin d'expliquer ces différences sexuelles dans la reconnaissance des émotions. Les théories socioconstructivistes suggèrent que des différences dans la socialisation des enfants, en fonction de leur sexe biologique, de façon à répondre à des attentes socioculturelles (e.g. stéréotypes de genre) pourraient contribuer à l'avantage féminin dans la reconnaissance émotionnelle (Hall et Matsumoto, 2004; Kret et De Gelder, 2012; Lee, N. C. *et al.*, 2013; McClure, 2000; Saylik *et al.*, 2018; Wingenbach *et al.*, 2018). Les jeunes filles sont généralement encouragées à exprimer leurs émotions et porter attention à celles d'autrui, alors que les jeunes garçons sont encouragés à les inhiber (Herba et Phillips, 2004; Kret et De Gelder, 2012; Lee, N. C. *et al.*, 2013; Wingenbach *et al.*, 2018). Les femmes seraient ainsi socialisées

pour être plus attentives aux expressions faciales émotionnelles des autres et donc, deviendraient meilleures à les détecter et les identifier (Hall et Matsumoto, 2004; Lee, N. C. *et al.*, 2013).

Pour leur part, les théories biologiques proposent que des différences liées au sexe dans la maturation corticale, les régions et les patrons d'activation cérébrale ainsi que les hormones sexuelles pourraient expliquer l'avantage féminin dans la reconnaissance des émotions (Kret et De Gelder, 2012; Lee, N. C. *et al.*, 2013; McClure, 2000; Saylik *et al.*, 2018). En ce qui concerne la maturation corticale, il a été suggéré que le développement des régions cérébrales impliquées dans le traitement des émotions serait plus précoce et rapide chez les filles que chez les garçons (De Bellis *et al.*, 2001; Lee, N. C. *et al.*, 2013; Lenroot *et al.*, 2007; McClure, 2000). Les filles pourraient alors avoir une meilleure capacité à traiter les informations émotionnelles, incluant les expressions faciales émotionnelles (Lee, N. C. *et al.*, 2013). Des auteurs ont d'ailleurs rapporté que les femmes présentent une meilleure intégration multisensorielle (e.g. audiovisuelle) des informations émotionnelles et qu'elles utilisent de meilleures stratégies visuelles pour reconnaître les expressions faciales émotionnelles (e.g. elles passent moins de temps à regarder des régions du visage moins pertinentes comme le nez) que les hommes (Collignon *et al.*, 2010; Vassallo *et al.*, 2009).

Pour ce qui est des régions et des patrons d'activation cérébrale, des différences sexuelles dans les structures du système limbique telles que l'amygdale, l'hippocampe et le cortex cingulaire ainsi que d'autres régions cérébrales participant à la reconnaissance des émotions, notamment les régions occipitales et pariétales, ont été documentées (Durstun, S. *et al.*, 2001; Kret et De Gelder, 2012; Raz *et al.*, 2004). Ces régions et structures seraient globalement plus activées chez les hommes que chez les femmes (Fusar-Poli *et al.*, 2009; Lee, T. *et al.*, 2005; Rahko *et al.*, 2010; Schienle *et al.*, 2005; Schneider *et al.*, 2011; Weisenbach *et al.*, 2014; Wrase *et al.*, 2003). De plus, les activations seraient davantage latéralisées à droite chez les hommes, alors qu'elles seraient plus bilatéralisées chez les femmes (Kret et De Gelder, 2012; Proverbio *et al.*, 2006; Schneider *et al.*, 2011; Weisenbach *et al.*, 2014). Ainsi, ces différences dans les régions et les patrons d'activation cérébrale pourraient contribuer aux différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle, bien que les mécanismes sous-jacents ne soient pas encore bien compris.

Finalement, il a été proposé que les variations dans les concentrations d'hormones sexuelles pourraient expliquer l'avantage féminin dans la reconnaissance des émotions (Kret et De Gelder, 2012; Saylik *et al.*, 2018). Des études ont observé des associations entre les concentrations d'estrogène et/ou de progestérone et les réponses comportementales ou neuronales à des tâches émotionnelles, certaines rapportant des corrélations positives et d'autres négatives (Derntl *et al.*, 2013; Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Fleischman *et al.*, 2010; Guapo *et al.*, 2009; Kamboj *et al.*, 2015; Maner et

Miller, 2014). D'autres études ont rapporté que les femmes dans la phase folliculaire ou préovulatoire, lorsque les niveaux d'estrogène sont plus élevés, sont meilleures à identifier les émotions, en particulier les émotions négatives, que celles dans la phase lutéale ou à l'ovulation et les hommes, qui ont de plus faibles niveaux d'estrogène (Derntl *et al.*, 2013; Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Osório *et al.*, 2018; Pearson et Lewis, 2005). Les régions cérébrales impliquées dans le traitement des visages et des expressions faciales émotionnelles, notamment l'amygdale et l'aire fusiforme du visage, seraient aussi plus activées chez les femmes dans la phase folliculaire et à mi-cycle (Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Marečková *et al.*, 2014). À l'inverse, les femmes utilisant des contraceptifs hormonaux et donc, ayant de plus faibles concentrations d'hormones sexuelles endogènes, seraient moins bonnes à reconnaître les émotions et présenteraient moins d'activations cérébrales en réponse à des expressions faciales émotionnelles que les femmes cyclant naturellement (Fleischman *et al.*, 2010; Hamstra *et al.*, 2015; Hamstra *et al.*, 2014; Osório *et al.*, 2018; Pahnke *et al.*, 2019). Des recherches plus récentes n'ont toutefois pas montré d'effet du cycle menstruel et/ou de la contraception hormonale sur la reconnaissance des émotions, ce qui pourrait s'expliquer par des différences méthodologiques (e.g. devis transversal vs. longitudinal, mesures hormonales) (Pahnke *et al.*, 2019; Pletzer et Kerschbaum, 2014; Radke et Derntl, 2016; Shirazi *et al.*, 2020).

Dans l'ensemble, les études sur la reconnaissance des émotions ont révélé des différences liées au sexe dans cette habileté, les femmes étant généralement plus précises et rapides à identifier des expressions faciales émotionnelles que les hommes. Elles sont également plus sensibles pour reconnaître des expressions présentées à faible intensité. Cet avantage féminin est observé pour toutes les émotions, bien qu'il puisse être accentué pour les émotions négatives. De nombreuses théories ont été proposées pour expliquer ces différences sexuelles, certaines mettant l'emphase sur des facteurs socioculturels et d'autres sur des facteurs biologiques tels que la maturation corticale, les régions et les patrons d'activation cérébrale ou encore, les hormones sexuelles. Cependant, en neuroscience, la recherche sur les différences liées au sexe étant relativement nouvelle, il n'est pas clair comment ces facteurs influencent la reconnaissance émotionnelle, ni comment ils interagissent ensemble.

### 1.3 Effets des TCC sur la reconnaissance des émotions

Plusieurs études se sont intéressées à la reconnaissance des émotions chez les patients ayant subi un TCC, considérant le chevauchement entre les régions affectées par les atteintes cérébrales traumatiques et celles impliquées dans le traitement des émotions (Binder *et al.*, 2019; Genova *et al.*, 2015; Mancuso *et al.*, 2015; McDonald, S. *et al.*, 2018; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2017; Rigon *et al.*, 2018). Globalement, ces études ont rapporté des déficits de reconnaissance des émotions (Binder *et al.*, 2019; Genova *et al.*, 2015;

Mancuso *et al.*, 2015; McDonald, S. *et al.*, 2018; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2017; Rigon *et al.*, 2018), et plus particulièrement des émotions négatives (Binder *et al.*, 2019; Drapeau, J. *et al.*, 2017; Mancuso *et al.*, 2015; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2018; Spikman *et al.*, 2013; Zupan *et al.*, 2014), chez les patients avec TCC. Ces déficits sont observés tant dans les phases aiguë que chronique des TCC (Borgaro *et al.*, 2004; Green *et al.*, 2004; Ietswaart *et al.*, 2008).

Cependant, la majorité de ces études ont porté sur des patients ayant subi des TCC modéré à sévère et les quelques-unes qui ont inclus des patients qui ont subi des TCCL les ont généralement groupés avec les autres patients, sans distinction en fonction de la sévérité de leur traumatisme (Borgaro *et al.*, 2004; Ietswaart *et al.*, 2008; Milders *et al.*, 2008). Ainsi, il n'est pas clair si les atteintes plus légères telles que les commotions cérébrales et les TCCL sont aussi associées à des déficits de reconnaissance des émotions ou si les difficultés observées après un TCC, toutes sévérités confondues, sont principalement dues aux atteintes plus sévères. Des recherches récentes ont toutefois commencé à distinguer des groupes de patients selon la sévérité de leur TCC (e.g. léger vs. modéré à sévère) ou à s'intéresser spécifiquement à la reconnaissance émotionnelle chez les patients avec TCCL (D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2017, 2019; Zuj *et al.*, 2017).

Dans une première étude, Drapeau, J. *et al.* (2017) ont comparé la performance de participants en santé et de patients ayant subi des TCCL simple et complexe (i.e. résultats négatifs et positifs à l'imagerie médicale, respectivement) ainsi que des TCC modéré à sévère sur des tâches de reconnaissance des émotions. Ils ont rapporté que les patients qui avaient subi des TCC léger complexe, modéré et sévère avaient plus de difficultés à identifier des expressions faciales de peur que ceux qui avaient subi un TCCL simple et les participants contrôles. Ces auteurs ont ainsi été les premiers à révéler des difficultés de reconnaissance de la peur après un TCCL complexe, mais pas simple. Ils ont néanmoins mentionné la possibilité que leurs tâches ne soient pas suffisamment sensibles pour discriminer les patients avec TCCL simple des contrôles. Dans une seconde étude, Drapeau, J. *et al.* (2019) ont alors comparé les réponses corticales de patients ayant subi des TCCL simple et de participants en santé lors de tâches émotionnelles à l'aide de l'EEG, une mesure qui s'est avérée sensible aux effets des commotions cérébrales et des TCCL. L'amplitude de la N1 fronto-centrale des patients avec TCCL était inférieure à celle des participants contrôles et ce, pour toutes les émotions. La N170 était quant à elle comparable entre les patients et les contrôles. Ces résultats ont été interprétés comme reflétant une altération du traitement attentionnel précoce des émotions suivant un TCCL simple, alors que le traitement perceptif des visages serait relativement bien préservé.



Deux autres recherches ont porté sur l'effet d'un TCCL sur les composantes ERP sensorielles précoces lors de la présentation d'expressions faciales émotionnelles, une chez des enfants et l'autre chez des militaires (D'Hondt *et al.*, 2017; Zuj *et al.*, 2017). D'Hondt *et al.* (2017) ont rapporté que les enfants qui n'avaient pas subi de TCCL présentaient une modulation émotionnelle de la P1, avec une plus grande amplitude de cette composante pour les expressions faciales de joie que de colère. Ils présentaient également une modulation de la N170, avec une plus courte latence pour les expressions faciales émotionnelles que neutres. En revanche, les enfants qui avaient subi un TCCL ne montraient pas de tels patrons de réponse, suggérant une perturbation du traitement des émotions permettant de distinguer les expressions faciales émotionnelles et neutres ainsi que de discriminer les différentes émotions entre elles. Pour leur part, Zuj *et al.* (2017) n'ont pas observé de différences dans l'amplitude de la P1 entre les militaires qui avaient subi un TCCL et ceux qui n'en avaient pas subi. Cependant, les militaires sans atteinte cérébrale traumatique présentaient une N1 de plus petite amplitude en réponse aux expressions faciales de colère qu'aux visages neutres, alors que ceux qui avaient subi un TCCL ne montraient pas une telle modulation émotionnelle. De plus, ces derniers avaient une plus petite N170 en réponse à toutes les émotions (i.e. peur, colère, joie) que les militaires sans atteinte, indiquant une diminution généralisée du traitement cortical des émotions suite à un TCCL.

Ainsi, peu d'études se sont intéressées à la reconnaissance des émotions chez les patients qui ont subi des TCCL. Les quelques études sur le sujet suggèrent néanmoins des altérations de la reconnaissance émotionnelle chez ces patients. L'électrophysiologie semble être une méthode particulièrement intéressante, plus que les tâches comportementales, pour détecter ces altérations en raison de sa sensibilité aux effets des commotions cérébrales et des TCCL. Les altérations électrophysiologiques observées varient toutefois d'une étude à l'autre, certaines rapportant des perturbations de toutes les composantes ERP sensorielles précoces associées à l'attention et la perception visuelles, alors que d'autres n'observent pas de différences dans la P1 et la N170. Plus de recherches sont donc nécessaires afin de déterminer quelles composantes et quels processus cognitifs sous-jacents sont touchés par les TCCL et lesquels sont préservés.

#### 1.4 Différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions

À l'instar des différences liées au sexe dans la reconnaissance des émotions et les effets des commotions cérébrales, des recherches ont récemment révélé des différences sexuelles dans la reconnaissance émotionnelle chez les patients ayant subi des TCC modéré à sévère (Rigon *et al.*, 2016; Turkstra *et al.*, 2020; Zupan *et al.*, 2017). Une première étude a rapporté que les hommes qui avaient subi un TCC modéré à sévère performaient significativement moins bien que les participants contrôles à une tâche dynamique (mais pas statique) de reconnaissance des émotions, alors que les femmes contrôles et celles qui avaient subi un TCC performaient de façon comparable (Rigon *et al.*, 2016). De plus, les femmes avec TCC surpassaient

significativement leurs homologues masculins sur cette tâche. Une deuxième étude a aussi rapporté que les femmes étaient significativement meilleures que les hommes à reconnaître la peur et les expressions faciales émotionnelles présentées à intensité élevée après un TCC sévère (Zupan *et al.*, 2017). Ces résultats et ceux d'autres études en cognition sociale (i.e. ensemble des processus impliqués dans les interactions sociales) ont été repris dans une récente revue de la littérature qui a conclu que les femmes sont généralement meilleures à identifier les émotions et inférer les états mentaux des autres que les hommes suite à un TCC modéré à sévère (Turkstra *et al.*, 2020).

Cependant, et de façon semblable aux études sur la reconnaissance des émotions suivant un TCC, ces recherches ont porté majoritairement sur des patients ayant subi des TCC modéré à sévère. À notre connaissance, une seule étude s'est intéressée aux différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez des athlètes multi-commotionnés, asymptomatiques et testés plus de trois mois depuis leur dernière commotion (Carrier-Toutant *et al.*, 2018). Dans cette étude, les athlètes commotionnés de sexe masculin et féminin présentaient une diminution de l'amplitude de la P1 dans l'hémisphère droit en réponse aux expressions faciales émotionnelles comparativement aux athlètes contrôles. En outre, seuls les athlètes commotionnés masculins présentaient une diminution de l'amplitude de la N1 frontale en réponse aux émotions. Il n'y avait toutefois pas de différences dans la performance (i.e. précision des réponses, temps de réaction) à la tâche de reconnaissance des émotions entre les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin, ce qui pourrait s'expliquer par la sensibilité limitée de la tâche.

Ainsi, des recherches récentes ont révélé des différences sexuelles dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et les patients avec TCC modéré à sévère. Ces recherches suggèrent que le sexe féminin pourrait être un facteur de protection contre les déficits de cognition sociale après des atteintes cérébrales traumatiques, les hommes étant moins bons à identifier les émotions que les femmes et présentant des altérations électrophysiologiques spécifiques. Il serait toutefois important de reproduire ces résultats considérant la rareté des études sur le sujet, notamment celles portant sur les différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions.

## 1.5 Problématique et objectifs

### 1.5.1 Problématique

Les connaissances actuelles concernant l'effet d'un TCC sur la reconnaissance des émotions sont principalement limitées aux hommes ayant subi des TCC modéré à sévère. Très peu d'études se sont intéressées aux patients qui ont subi des TCCL et aux différences sexuelles dans la reconnaissance

émotionnelle chez ces patients (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2017, 2019; Zuj *et al.*, 2017).

En ce qui concerne l'effet du TCCL, les quelques études sur le sujet ont suggéré des altérations de la reconnaissance des émotions chez les athlètes multi-commotionnés et les patients avec TCCL (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2017, 2019; Zuj *et al.*, 2017). Ces altérations seraient détectées à l'aide de mesures sensibles telles que l'EEG, les tâches comportementales n'étant pas suffisamment sensibles pour les identifier. En effet, la majorité des études ont utilisé des tâches classiques de reconnaissance des émotions, lesquelles consistent à présenter une expression faciale émotionnelle par valence (i.e. positive, négative) à intensité maximale (i.e. 100%) (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Drapeau, J. *et al.*, 2017, 2019). Ces tâches sont souvent trop faciles pour les athlètes commotionnés et les patients avec TCCL, résultant en un effet plafond ne permettant pas de discriminer les patients des participants en santé. En revanche, des tâches plus complexes consistant en la présentation de mélanges d'expressions (e.g. peur/colère, dégoût/joie) présentées à différentes intensités (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%) sont plus difficiles et ainsi, permettent de révéler de légers changements dans la reconnaissance des émotions chez des populations variées (e.g. stress social aigu, maltraitance à l'enfance) (Bérubé *et al.*, 2020; Daudelin-Peltier *et al.*, 2017; Fiset *et al.*, 2017; Turgeon *et al.*, 2020). Ces tâches pourraient s'avérer particulièrement intéressantes auprès d'athlètes multi-commotionnés, asymptomatiques et testés dans la phase chronique des commotions en raison de leur sensibilité.

Pour ce qui est des différences liées au sexe dans l'effet du TCCL, des recherches récentes suggèrent que le sexe féminin pourrait être un facteur de protection contre les déficits de reconnaissance des émotions après des atteintes cérébrales traumatiques (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Rigon *et al.*, 2016; Turkstra *et al.*, 2020; Zupan *et al.*, 2017). Les hommes auraient notamment plus de difficultés à identifier des émotions que les femmes et présenteraient des patrons d'altérations électrophysiologiques spécifiques (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Rigon *et al.*, 2016; Turkstra *et al.*, 2020; Zupan *et al.*, 2017). Cependant, à notre connaissance, une seule étude s'est intéressée aux différences sexuelles dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés (Carrier-Toutant *et al.*, 2018). De plus, aucune des études susmentionnées n'a investigué les mécanismes responsables de ces différences à l'aide de mesures hormonales.

Ces limites dans les connaissances concernant les différences liées au sexe dans la reconnaissance des émotions chez les athlètes multi-commotionnés ont ainsi permis de motiver le présent projet de recherche.

### 1.5.2 Objectif général

L'objectif général de cette thèse est donc d'étudier les différences liées au sexe dans la reconnaissance des émotions chez des athlètes multi-commotionnés, asymptomatiques et testés au moins trois mois depuis leur dernière commotion. Pour ce faire, nous avons effectué un projet de recherche, divisé en trois études, portant sur les réponses comportementales et électrophysiologiques d'athlètes multi-commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à une tâche de reconnaissance des émotions plus complexe. Cette tâche était composée des six expressions faciales émotionnelles de base (i.e. peur, colère, dégoût, joie, tristesse, surprise), combinées entre elles à différentes intensités (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%), par intervalle de 12%. Les participants devaient alors identifier l'émotion exprimée par le visage pendant que l'activité électrique de leur cerveau était enregistrée à l'aide de l'EEG. En plus de cette tâche, les participants devaient compléter des questionnaires psychologiques, des tests neuropsychologiques ainsi que des tâches contrôles (e.g. visuelles, de perception des visages). Ils devaient également fournir un échantillon de salive pour mesurer les concentrations d'hormones sexuelles (i.e. estradiol, progestérone, testostérone).

Le recrutement et la collecte de données pour la première étude se sont déroulés de l'été 2015 à l'hiver 2016 et ceux pour les deuxième et troisième études se sont déroulés de l'été 2017 à 2019. Des communications orales et par affiche ont été effectuées tout au long de la réalisation du projet, de 2015 à 2021. Un premier article a été publié à l'hiver 2016, un deuxième a été soumis à l'automne 2020, puis resoumis à l'automne 2021 et enfin, un troisième article a été soumis à l'hiver 2022.

### 1.5.3 Objectifs spécifiques

Le premier article, correspondant au deuxième chapitre de la présente thèse, porte sur les réponses comportementales des athlètes multi-commotionnés de sexe masculin et féminin à la tâche de reconnaissance des émotions. L'objectif était d'étudier les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions, mais également d'investiguer les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés. Nous avions comme hypothèses que les athlètes commotionnés auraient des difficultés à identifier les émotions, plus particulièrement les émotions négatives, et que les effets des commotions seraient modulés en fonction du sexe de l'athlète. Les résultats publiés sont ceux obtenus auprès de 50 participants, soit 10 athlètes commotionnés masculins (âge moyen =  $21.59 \pm 1.89$  ans, niveau de scolarité moyen =  $15.30 \pm 1.70$  ans, nombre moyen de commotions cérébrales =  $2.80 \pm 0.92$ , temps moyen depuis la dernière commotion =  $24.14 \pm 9.05$  mois), 12 athlètes féminines commotionnées (âge moyen =  $23.84 \pm 3.00$  ans, niveau de scolarité moyen =  $16.75 \pm 2.26$  ans, nombre moyen de commotions cérébrales =  $3.17 \pm 0.83$ , temps moyen depuis la dernière commotion =  $38.08 \pm 14.96$  mois), 15 athlètes contrôles masculins (âge moyen =  $21.44 \pm 1.97$  ans, niveau de scolarité

moyen =  $15.40 \pm 1.92$  ans) et 13 athlètes contrôles féminines (âge moyen =  $21.43 \pm 1.15$  ans, niveau de scolarité moyen =  $15.38 \pm 1.26$  ans).

Le deuxième article, constituant le troisième chapitre de thèse, porte sur l'adaptation et la validation de la tâche de reconnaissance des émotions en EEG. L'objectif était d'étudier les effets de l'émotion et de l'ambiguïté émotionnelle sur les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche ainsi adaptée chez des participants en santé. Il était attendu que l'émotion et l'ambiguïté émotionnelle influenceraient les réponses comportementales, certaines émotions (e.g. joie) étant plus faciles à identifier que d'autres et la performance s'améliorant avec la diminution de l'ambiguïté. En ce qui concerne les réponses électrophysiologiques, il était attendu que la P1 et la N1 soient affectées par les émotions, avec de plus grandes amplitudes de ces composantes en réponse aux émotions négatives que positives. Pour la N170, nous avons aussi émis l'hypothèse qu'elle soit affectée par les émotions, mais n'avions pas d'*a priori* concernant les émotions spécifiques qui influenceraient cette composante. Finalement, nous n'avions pas d'hypothèses quant à la modulation des composantes ERP sensorielles précoces par l'ambiguïté émotionnelle considérant la rareté des études sur le sujet. À noter que la collecte des données pour les deuxième et troisième études a été effectuée chez des participants différents de ceux de la première étude. Ainsi, les données présentées dans ce deuxième article de thèse ont été obtenues auprès de 37 nouveaux participants en santé (19 hommes, âge moyen =  $23.41 \pm 3.38$  ans, niveau de scolarité moyen =  $15.19 \pm 1.76$  ans).

Le troisième article, correspondant au quatrième chapitre de thèse, est l'aboutissement des deux précédents. Il porte sur les réponses comportementales et électrophysiologiques des athlètes multi-commotionnés de sexe masculin et féminin à la tâche de reconnaissance des émotions validée en EEG. Cet article avait deux objectifs principaux. Le premier était d'étudier les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions. À la lumière des résultats de la première étude, nous avons comme hypothèse que les athlètes commotionnés auraient plus de difficultés à identifier les émotions, en particulier les émotions négatives, que les athlètes contrôles. Nous avons aussi émis l'hypothèse que ces difficultés seraient reflétées par des diminutions de l'amplitude de la P1 et de la N170 chez les athlètes commotionnés. Le deuxième objectif était d'investiguer les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et d'explorer l'effet potentiellement modulateur des hormones sexuelles mesurées le jour du testing. Il était attendu que les athlètes commotionnés de sexe masculin et féminin montreraient des patrons d'altérations comportementales et électrophysiologiques distincts, les athlètes commotionnés masculins ayant plus de difficultés à la tâche de reconnaissance des émotions et présentant de plus petites amplitudes de la P1 et de la N170 que leurs homologues féminines. Il était

également attendu que ces altérations seraient corrélées avec les concentrations d'hormones sexuelles, particulièrement l'estrogène et la progestérone. Il est important de mentionner que les athlètes contrôles de cette étude sont les mêmes que les participants en santé de la deuxième étude. Ainsi, les données présentées dans ce troisième article de thèse sont celles obtenues auprès des 37 participants en santé de la deuxième étude (19 hommes, âge moyen =  $23.41 \pm 3.38$  ans, niveau de scolarité moyen =  $15.19 \pm 1.76$  ans) ainsi que de 35 nouveaux athlètes commotionnés (18 hommes, âge moyen =  $24.80 \pm 3.97$  ans, niveau de scolarité moyen =  $15.40 \pm 2.23$  ans).

## CHAPITRE 2

### ARTICLE 1

#### Sex-Related Differences in Emotion Recognition in Multi-concussed Athletes<sup>1</sup>

Edith Léveillé<sup>1,2</sup>, Samuel Guay<sup>3</sup>, Caroline Blais<sup>4</sup>, Peter Scherzer<sup>1</sup>, and Louis De Beaumont<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Département de psychologie, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup> Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>3</sup> Département de psychologie, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada

<sup>4</sup> Département de psychoéducation et de psychologie, Université du Québec en Outaouais, Gatineau, Québec, Canada

---

<sup>1</sup> Article publié dans le *Journal of the International Neuropsychological Society* en 2017. Référence complète : 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.

## 2.1 Abstract

**Objectives:** Concussion is defined as a complex pathophysiological process affecting the brain. Although the cumulative and long-term effects of multiple concussions are now well documented on cognitive and motor function, little is known about their effects on emotion recognition. Recent studies have suggested that concussion can result in emotional sequelae, particularly in females and multi-concussed athletes. The objective of this study was to investigate sex-related differences in emotion recognition in asymptomatic male and female multi-concussed athletes. **Methods:** We tested 28 control athletes (15 males) and 22 multi-concussed athletes (10 males) more than a year since the last concussion. Participants completed the Post-Concussion Symptom Scale, the Beck Depression Inventory-II, the Beck Anxiety Inventory, a neuropsychological test battery and a morphed emotion recognition task. Pictures of a male face expressing basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) morphed with another emotion were randomly presented. After each face presentation, participants were asked to indicate the emotion expressed by the face. **Results:** Results revealed significant sex by group interactions in accuracy and intensity threshold for negative emotions, together with significant main effects of emotion and group. **Conclusions:** Male concussed athletes were significantly impaired in recognizing negative emotions and needed more emotional intensity to correctly identify these emotions, compared to same-sex controls. In contrast, female concussed athletes performed similarly to same-sex controls. These findings suggest that sex significantly modulates concussion effects on emotional facial expression recognition.

**Keywords:** Sport, Concussion, Emotional facial expression, Gender differences, Anxiety, Depression



## 2.2 Introduction

Sports-related concussion is defined as a complex pathophysiological process affecting the brain, induced by biomechanical forces (McCrory *et al.*, 2013). It can result in physical signs (post-traumatic amnesia, loss of consciousness), somatic (headaches, dizziness, nausea, vomiting), cognitive (attention and memory deficits, slowed information processing) and emotional symptoms (lability), behavioral changes (irritability), and sleep disturbances (McCrory *et al.*, 2013).

Although these symptoms resolve spontaneously within 7 to 10 days, the cumulative and long-term effects of concussions are now well documented (De Beaumont, Beauchemin, *et al.*, 2013; De Beaumont, Brisson, *et al.*, 2007; De Beaumont, Henry, *et al.*, 2012; Gaetz *et al.*, 2000; Theriault *et al.*, 2009; Theriault *et al.*, 2011). Over the past years, several studies have revealed chronic cognitive and motor function alterations in athletes with a history of a previous concussion (Broglia *et al.*, 2012; De Beaumont, Lassonde, *et al.*, 2007; De Beaumont *et al.*, 2011; De Beaumont *et al.*, 2009; Guskiewicz *et al.*, 2005; Iverson *et al.*, 2004; Tremblay *et al.*, 2013). These athletes report more symptoms and take longer to recover than athletes with no previous history (Collins, M. W. *et al.*, 2002; Colvin *et al.*, 2009; Guskiewicz *et al.*, 2003; Guskiewicz *et al.*, 2000; Iverson *et al.*, 2004; Schatz *et al.*, 2011; Slobounov *et al.*, 2007). They are also more likely to suffer from persistent post-concussion symptoms, including anxiety and depression (Decq *et al.*, 2016; Didehbani *et al.*, 2013; Guskiewicz, Marshall, *et al.*, 2007; Solomon *et al.*, 2016; Vargas *et al.*, 2015).

More recently, studies have revealed gender differences in the incidence and recovery from a concussion. In sports played by both sexes, females sustain proportionately more concussions than males (Covassin *et al.*, 2003; Dick, 2009; Gessel *et al.*, 2007; Lincoln *et al.*, 2011; Marar *et al.*, 2012). They report a higher number and greater severity of symptoms, including anxiety and depression, and take longer to recover than their male counterparts (Baker *et al.*, 2016; Broshek *et al.*, 2005; Colvin *et al.*, 2009; Dick, 2009; Ellis *et al.*, 2015; Farace et Alves, 2000; Fenton *et al.*, 1993; Kutcher et Eckner, 2010; Yang, J. *et al.*, 2015).

These clinical symptoms reflect primarily a functional disturbance, but may also result from structural damage (McCrory *et al.*, 2013). Early neuroimaging studies of traumatic brain injury (TBI) found that the more commonly affected areas were the frontal and temporal lobes, the ventricular system, and the corpus callosum (Bigler, 2001a, 2001b, 2007; Johnson *et al.*, 1996). Structures of the limbic system such as the amygdala, the hippocampus, and the fornix may also be affected by TBI (Bigler *et al.*, 1996; Gale *et al.*, 1993; Tate et Bigler, 2000). Recent technological advances allowed the detection of damage to the corpus callosum, putamen, globus pallidus, and internal capsule as well as in several white matter tracts such as the uncinate, fronto-occipital, and longitudinal fasciculi, the thalamic radiations, the corticospinal tract, and the

cingulum (Chamard *et al.*, 2013; Chappell *et al.*, 2006; Henry, L. C., Tremblay, Tremblay, *et al.*, 2011; Zhang, L. *et al.*, 2006).

The frontal and temporal lobes are involved in higher cognitive processes such as attention, memory, and executive functions, as well as emotion recognition (Chayer et Freedman, 2001; Squire *et al.*, 2004; Squire et Zola-Morgan, 1991; Stuss *et al.*, 1997). Studies of the effects of concussion on cognitive functioning have yielded mixed results. While some studies found persistent alterations in attention, memory, executive functions, visuospatial perception, and information processing speed in concussed athletes beyond the acute post-concussion phase (Echemendia *et al.*, 2001; Guskiewicz *et al.*, 2001; Iverson *et al.*, 2004; Lovell, 2004; Lovell *et al.*, 2003; Mccrea *et al.*, 2005; McCrea *et al.*, 2003), others have not (De Beaumont, Brisson, *et al.*, 2007; De Beaumont, Lassonde, *et al.*, 2007; Dupuis *et al.*, 2000; Iverson *et al.*, 2006; Theriault *et al.*, 2009).

In addition to their role in cognition, structures such as the amygdala, the anterior cingulate gyrus, the hippocampus, and the prefrontal cortex are also involved in emotion recognition (Adolphs, 1999a; Adolphs *et al.*, 2002; Adolphs et Tranel, 2004; Adolphs *et al.*, 1994; Adolphs *et al.*, 1999; Phillips *et al.*, 2003). In particular, recognition of emotional facial expressions has been shown to involve the amygdala, ventromedial prefrontal cortex, occipitotemporal regions, right somatosensory cortex, insula, basal ganglia, thalamus, hypothalamus, and brainstem (Adolphs, 1999b, 2001, 2002a, 2002b, 2003; Adolphs *et al.*, 1996). Damage to these structures can result in emotion recognition deficits (Adolphs *et al.*, 2002; Adolphs *et al.*, 2000; Adolphs et Tranel, 2004; Adolphs *et al.*, 1994; Adolphs *et al.*, 1999). Importantly, several brain structures involved in emotion recognition are vulnerable to concussion (Chamard *et al.*, 2013; Henry, L. C. *et al.*, 2010; Henry, L. C., Tremblay, Leclerc, *et al.*, 2011; Vagnozzi *et al.*, 2010; Vagnozzi *et al.*, 2008; Zhang, K. *et al.*, 2010).

In parallel, studies have consistently shown that patients with TBI of various severity, who are not clinically anxious or depressed, are impaired on emotion recognition tasks, compared to healthy controls (Croker et McDonald, 2005; Green *et al.*, 2004; Henry, J. D. *et al.*, 2006; McDonald, S. et Flanagan, 2004; McDonald, S. *et al.*, 2003; McDonald, S. *et al.*, 2011; Milders *et al.*, 2008). Notably, recognition of negative emotions such as anger, disgust, fear, and sadness is known to be more impaired than that of positive emotions such as happiness and surprise after TBI (Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Hopkins *et al.*, 2002; Ietswaart *et al.*, 2008; McDonald, S. *et al.*, 2003; McDonald, S. *et al.*, 2011; Williams, C. et Wood, 2010). While most of these studies focused on moderate to severe TBI, the few that included patients with mild

TBI did not statistically stratify according to injury severity. Therefore, it is not clear if patients with milder injuries such as sports-related concussion are impaired on emotion recognition tasks.

Furthermore, these studies have focused on male subjects. However, gender differences in emotion recognition are now well documented, with women being better and faster at recognizing emotions than men (Campbell *et al.*, 2002; Hall et Matsumoto, 2004; Hampson *et al.*, 2006; Montagne *et al.*, 2005; Rahman *et al.*, 2004; Thayer et Johnsen, 2000). More recently, studies have suggested that hormonal levels may partially account for these gender differences. These studies have shown that women taking oral contraceptives or in the follicular phase of their cycle, when estrogen is high relative to progesterone, are better at recognizing emotions, particularly negative emotions such as anger and fear (Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Pearson et Lewis, 2005). They have also found significant associations between hormonal levels and activations in the amygdala and fusiform face area to emotional facial expressions (Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Marečková *et al.*, 2014). It, therefore, appears plausible that gender may play a putative role in emotion recognition after recurrent concussions.

Moreover, most of these studies used conventional emotion recognition tasks with limited sensitivity to characterize and quantify recognition thresholds across emotion types. More sophisticated emotion recognition tasks were designed to offset these limitations. In particular, morphed emotion recognition tasks (Young *et al.*, 1997), where one neutral and six emotional facial expressions are combined at different intensities, can provide information on the accuracy and intensity needed to recognize an emotion. These tasks have been shown to be particularly sensitive to subtle emotion recognition alterations (Bishop *et al.*, 2015; Harmer *et al.*, 2002; Humphreys *et al.*, 2007; Richards *et al.*, 2002) and may thus be useful in the assessment of emotion recognition in concussed athletes.

This study had two objectives. The first was to investigate the effects of multiple concussions on emotion recognition. We hypothesized that concussed athletes would show alterations on a morphed emotion recognition task, particularly for negative emotions, compared to healthy control athletes. The second objective was to study sex-related differences in emotion recognition among concussed athletes. Considering that women are better at recognizing emotions than men, we hypothesized that concussion effects would be significantly modulated by sex.

## 2.3 Method

### 2.3.1 Participants

All 50 participants were active athletes from college and university sports teams (basketball, football, hockey, soccer, or non-contact sports) aged between 19 and 28 years [mean age of 22.04 years, standard deviation (SD) = 2.27] (voir l'Annexe A pour le nombre et le pourcentage d'athlètes par groupe pratiquant chaque sport). Participants were included if they met all of the following criteria: normal or corrected to normal vision, no history of alcohol and/or substance abuse, no condition requiring daily medication, no history of psychiatric or neurological disorder, no current anxiety or depression as assessed by the Beck Anxiety Inventory (BAI) (Beck et Steer, 1993) and the Beck Depression Inventory-II (BDI-II) (Beck *et al.*, 1996), no learning disability or TBI unrelated to contact sports. The study was approved by the research ethics committee of the Université du Québec à Trois-Rivières, and all participants gave written informed consent before testing. Subjects received a financial compensation of \$60 CDN for their participation.

The study included four groups. The first group consisted of 15 male athletes with no prior history of concussion. The second group included 10 male athletes who reported at least two sports-related concussions (number of concussions ranged from two to four, mean number of concussions was  $2.80 \pm .92$ ) that had occurred more than a year before testing (time elapsed since the last concussion ranged from 12.78 to 36.37 months, mean time since the last concussion was  $24.14 \pm 9.05$  months). The third group consisted of 13 female athletes with no prior history of concussion. The fourth group included 12 female athletes who reported at least two sports-related concussions (number of concussions ranged from two to four, mean number of concussions was  $3.17 \pm .83$ ) that had occurred more than a year before testing (time elapsed since the last concussion ranged from 20.27 to 67.61 months, mean time since the last concussion was  $38.08 \pm 14.96$  months).

Concussion classification was performed by a trained graduate student in clinical neuropsychology and was based on the concussion definition proposed in the 4th Consensus Statement on concussion in sport, including the assessment of a range of domains including clinical symptoms, physical signs, cognitive impairment, neurobehavioural features, and sleep disturbances (McCrory *et al.*, 2013). Groups differed in terms of age ( $F(3, 49) = 3.86; p < .05$ ), and *post hoc* analyses revealed that female concussed athletes (mean age of  $23.84 \pm 3.00$  years) were significantly older than female control athletes (mean age of  $21.43 \pm 1.15$  years;  $p < .05$ ) and male concussed athletes (mean age of  $21.59 \pm 1.89$  years;  $p < .05$ ). Male and female concussed athletes also differed in terms of time since the last concussion ( $t(20) = -2.57; p < .05$ ) (see Table 2.1).

Tableau 2.1 Between-group comparisons in demographic, number of concussions, time since the last concussion, BAI, BDI, and PCSS.

	Male concussed (n = 10)	Male controls (n = 15)	Female concussed (n = 12)	Female controls (n = 13)
Age	21.59 ± 1.89	21.44 ± 1.97	23.84 ± 3.00	21.43 ± 1.15
Education level	15.30 ± 1.70	15.40 ± 1.92	16.75 ± 2.26	15.38 ± 1.26
Number of concussions	2.80 ± 0.92	0	3.17 ± 0.83	0
Time since the last concussion (months)	24.14 ± 9.05	–	38.08 ± 14.96	–
BDI	2.90 ± 3.03	2.80 ± 2.78	3.25 ± 3.62	2.46 ± 2.30
BAI	1.60 ± 1.58	1.00 ± 1.85	1.92 ± 2.71	2.77 ± 2.13
PCSS	6.00 ± 8.94	4.27 ± 4.80	4.50 ± 6.40	4.31 ± 3.57

### 2.3.2 Materials

#### 2.3.2.1 Concussion history form and Post-Concussion Symptoms Scale

Concussion history was assessed with a standardized concussion history form including questions on the number of previous concussions (if any), approximate date(s) of each concussion, description of the accident(s), nature and duration of relevant post-concussion symptoms (confusion and/or disorientation, anterograde and/or retrograde amnesia, and loss of consciousness), and time before return to play. Post-concussion symptoms were then evaluated with the Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS) (Maroon *et al.*, 2000). This scale consists of 19 symptoms commonly experienced after a concussion in three different domains. The first domain includes somatic symptoms such as headaches, dizziness, nausea, vomiting, and balance problems. The second consists of cognitive symptoms such as concentration and memory difficulties, reduced processing speed, and feeling in a fog. The third domain includes neuropsychiatric symptoms such as irritability, sadness, nervousness, and anxiety. Participants were asked to rate the 19 symptoms on a scale from 0 (no symptom) to 6 (severe symptom), for a maximum score of 114. At the time of testing, concussed athletes were asymptomatic (symptom threshold for exclusion was fixed at 25) (Larson-Dupuis *et al.*, 2015) reporting few, if any symptoms on the PCSS (mean of  $5.18 \pm 7.51$ ).

#### 2.3.2.2 Neuropsychological testing

To ensure there were no significant differences between concussed and control athletes on cognitive functioning, participants were then administered a battery of neuropsychological tests. This battery consisted of the Rey Auditory Verbal Learning Test (RAVLT; assessing learning as well as immediate and delayed verbal memory), the Rey Complex Figure Test (RCFT; evaluating immediate and delayed visual memory), the Symbol Digit Modalities Test (SDMT; measuring visual working memory, learning, visual

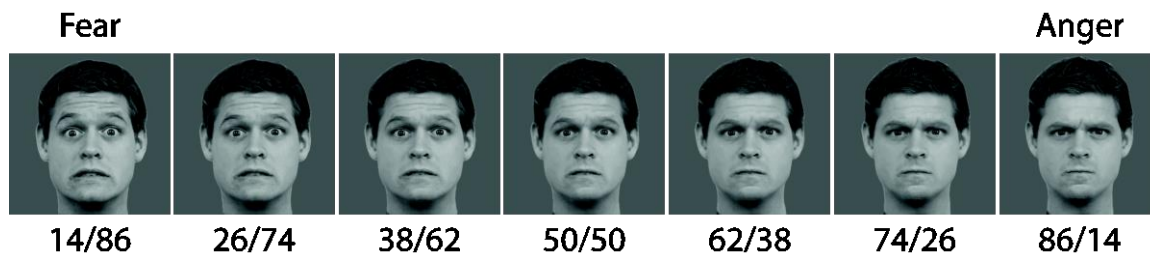
scanning, psychomotor speed, and attention), the verbal fluency (assessing verbal fluency and word retrieval) and the Stroop test (evaluating inhibition and mental flexibility) from the Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS), as well as the Comprehension subtest from the Wechsler Adult Intelligence Scale, fourth edition (WAIS-IV; evaluating verbal reasoning, practical knowledge and social judgment). These tests were found to be valid, reliable, and sensitive measures of cognitive deficits associated with concussion (Echemendia et Julian, 2001; Echemendia *et al.*, 2001; Kosaka, 2006; Maroon *et al.*, 2000).

### 2.3.2.3 Morphed emotion recognition task

Finally, emotion recognition was evaluated by a task inspired by the “facial expression megamix paradigm” (Young *et al.*, 1997). This task consists in the categorization of blends of emotional facial expressions, created by morphing two expressions together (Deschênes *et al.*, 2015; Tardif, Fiset, *et al.*, 2014; Tardif, Hébert, *et al.*, 2014). It allows to assess the accuracy (proportion of trials in which the emotion is recognized when it is dominant in a morph stimulus) and threshold (emotional intensity needed to detect an emotion on 50% of the trials in which it is presented) with each emotion. Recent studies have shown that this task is particularly sensitive to subtle emotion recognition alterations (Bishop *et al.*, 2015; Harmer *et al.*, 2002; Humphreys *et al.*, 2007; Richards *et al.*, 2002).

Facial expression stimuli consisted in photographs of a male face depicting the six basic emotional facial expressions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise), taken from the Radboud Faces Database (Langner *et al.*, 2010). The facial expression stimuli were transformed into grayscale, and were put on a neutral gray background. Each inner feature (eyes, nose, mouth) was aligned to the average position of that feature across all facial expression stimuli using a homemade MATLAB program applying rotations, translations, and/or scaling. The mean luminance and the spatial frequency spectrum were also equated across stimuli. The facial expressions were morphed with each other in all possible pairwise combinations using FantaMorph. The proportion of each expression in a given blend varied from 14/86% to 86/14%, in 12% increments. A total of 15 continuums of blend were thereby created (anger/disgust, anger/happiness, anger/fear, and so on) (see Figure 2.1).

Figure 2.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing fear and anger from 14/86% to 86/14%.



The task consisted of 9 blocks of 105 trials, for a total of 945 trials. On each trial, a morph was randomly selected and presented in the center of a computer screen and lasted up to participants' response. Participants were asked to choose which of six labels (angry, disgusted, fearful, happy, sad, surprised) best described the presented facial expression using a forced-choice task. No feedback was provided. The stimulus width subtended 10 degrees of visual angle.

Accuracy for each expression was calculated on all trials in which that expression was displayed with an intensity of 50% or more. To calculate the intensity threshold at which an emotional facial expression was detected on at least 50% of the trials in which it was presented, the following procedure was taken for each expression separately. First, all the blend continuums containing the expression under analysis were pooled together. For each intensity level, the proportion of trials the expression was detected was then calculated, and a sigmoid curve was fitted on the proportions of detection across intensity levels. The intensity threshold was obtained using the sigmoid parameters that best-fitted the results.

### 2.3.3 Procedure

Participants first completed a general health questionnaire, the concussion history form, the PCSS, the BAI, and the BDI-II to verify study eligibility. They then completed a battery of neuropsychological tests. They also completed the morphed emotion recognition task in two separate sessions to minimize fatigue ( $M = 3.41 \pm 7.75$  days, range = 0-40 days). Both sessions lasted approximately 30 min. Testing was conducted by a trained and experienced graduate student in clinical neuropsychology.

### 2.3.4 Statistical Analyses

We first analyzed data with descriptive statistics and tests of normality to verify the assumptions of statistical tests. Data that were not normally distributed were transformed with logarithmic or probit function. Analyses of variance (ANOVAs) were conducted on neuropsychological tests as well as on accuracy and intensity threshold for positive (happiness, surprise) and negative emotions (anger, disgust, fear, sadness) separately. Age and time since the last concussion were not entered as covariates in the main analyses as they did not correlate with emotion recognition (all  $ps > .05$ ). However, given the significant difference in time since the last concussion between male and female concussed athletes and its potential effects on the results, analyses of covariance (ANCOVAs) were then conducted on emotion recognition for male and female concussed athletes, with time since the last concussion as a covariate. Correlational analyses were conducted between clinical variables (number of concussions, time since the last concussion), neuropsychological data and emotion recognition. *Post hoc* tests were conducted with the Tukey's B approach. Two-tailed  $p$  values less than .05 were considered statistically significant.

## 2.4 Results

### 2.4.1 Neuropsychological Tests

There were no group differences in immediate or delayed recall on the RAVLT and the RCFT, in total correct responses on the SDMT, in total correct responses on the verbal fluency, in time and total errors on the Stroop test as well as in the total correct responses on the Comprehension subtest (all  $ps > .05$ ) (see Table 2.2).

Tableau 2.2 Between-group comparisons on neuropsychological tests.

Tests	Conditions	Male concussed	Male controls	Female concussed	Female controls	<i>F</i>	<i>p</i>
RAVLT	Immediate recall	10.50 ± 2.07	11.92 ± 2.22	11.80 ± 2.04	11.38 ± 2.26	.94	.43
	Delayed recall	9.90 ± 2.42	11.77 ± 2.55	11.90 ± 1.79	11.00 ± 2.12	1.73	.17
RCFT	Immediate recall	21.35 ± 5.93	24.81 ± 3.31	24.45 ± 5.25	22.92 ± 6.65	.93	.43
	Delayed recall	21.75 ± 4.66	25.27 ± 3.76	23.75 ± 6.24	22.54 ± 6.69	.93	.43
SDMT		61.20 ± 6.71	64.00 ± 8.07	64.70 ± 5.93	65.77 ± 6.89	.84	.48
Verbal fluency		29.13 ± 5.36	32.44 ± 6.47	30.10 ± 6.24	29.95 ± 5.37	.70	.56
Stroop 1	Completion time	25.80 ± 2.78	24.46 ± 2.96	27.30 ± 4.37	24.50 ± 4.32	1.46	.24
	Total errors	0.40 ± 0.84	0.15 ± 0.38	0.50 ± 0.53	0.31 ± 0.48	.78	.51
Stroop 2	Completion time	19.30 ± 1.64	18.38 ± 1.85	20.44 ± 2.30	19.69 ± 2.87	1.62	.20
	Total errors	0.40 ± 0.52	0.08 ± 0.28	0.40 ± 0.70	0.08 ± 0.28	1.91	.14
Stroop 3	Completion time	42.50 ± 7.03	41.77 ± 7.32	43.22 ± 7.73	41.85 ± 5.11	.10	.96
	Total errors	1.30 ± 1.06	1.62 ± 1.61	1.50 ± 1.51	1.62 ± 1.26	.13	.94
Stroop 4	Completion time	51.90 ± 6.08	47.31 ± 6.55	51.00 ± 8.49	49.92 ± 7.27	.92	.44
	Total errors	1.70 ± 1.77	1.23 ± 1.36	1.20 ± 1.40	1.54 ± 1.39	.28	.84
Comprehension		23.70 ± 3.02	25.92 ± 4.42	25.80 ± 3.85	22.77 ± 4.73	1.72	.18

### 2.4.2 Emotion Recognition

#### 2.4.2.1 Accuracy

A two-way ANOVA on accuracy for negative emotions revealed a significant main effect of emotion ( $F(3, 138) = 85.94; p < .001; \eta^2 = .65$ ). Pairwise comparisons indicated that fear ( $M = 57.80\% \pm 11.60\%$ ) was significantly more difficult to recognize than anger ( $M = 77.68\% \pm 7.61\%$ ), disgust ( $M = 77.96\% \pm 10.91\%$ ), and sadness ( $M = 85.51\% \pm 6.29\%$ ), while the latter was significantly easier to identify than anger and disgust (all  $ps < .001$ ). There was also a significant main effect of group ( $F(1, 46) = 8.63; p < .01; \eta^2 = .16$ ), indicating that concussed athletes ( $M = 72.58\% \pm 5.74\%$ ) were significantly worse at recognizing negative emotions relative to control athletes ( $M = 76.43\% \pm 5.15\%$ ). Importantly, analyses revealed a significant sex by group interaction ( $F(1, 46) = 5.31; p < .05; \eta^2 = .10$ ). Tukey's *B post hoc* analyses revealed that male concussed athletes ( $M = 69.24\% \pm 6.38\%$ ) were significantly worse at identifying negative emotions

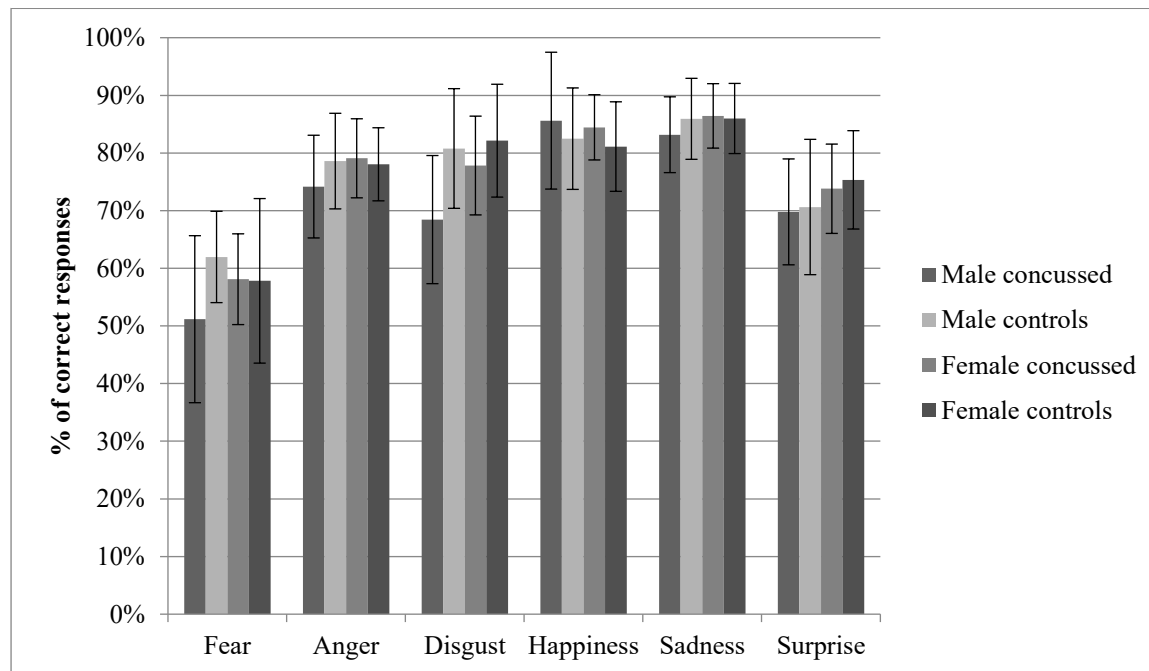


compared to male control athletes ( $M = 76.81\% \pm 4.76\%$ ;  $p < .01$ ;  $d = -1.34$ ) and female concussed athletes ( $M = 75.36\% \pm 3.33\%$ ;  $p < .01$ ;  $d = -1.20$ ), while female athletes did not show similar concussion effects (concussed athletes:  $M = 75.36\% \pm 3.33\%$ ; control athletes  $M = 75.99\% \pm 5.74\%$ ;  $d = -.13$ ).

ANCOVAs were then conducted on accuracy for negative emotions for male and female concussed athletes, with time since the last concussion as a covariate. Again, there was a significant effect of sex ( $F(1, 19) = 7.81$ ;  $p < .05$ ;  $\eta^2 = .29$ ), indicating that time since the last concussion could not account for the significant difference between male and female concussed athletes on accuracy for negative emotions.

In contrast to negative emotions, there was only a significant main effect of emotion on accuracy for positive emotions ( $F(1, 46) = 37.10$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2 = .45$ ), indicating that happiness ( $M = 83.22\% \pm 8.53\%$ ) was significantly easier to identify than surprise ( $M = 72.44\% \pm 9.55\%$ ). There were no significant group differences in accuracy for positive emotions (all  $ps > .05$ ) (see Figure 2.2).

Figure 2.2 Between-group comparisons in accuracy for all emotions.

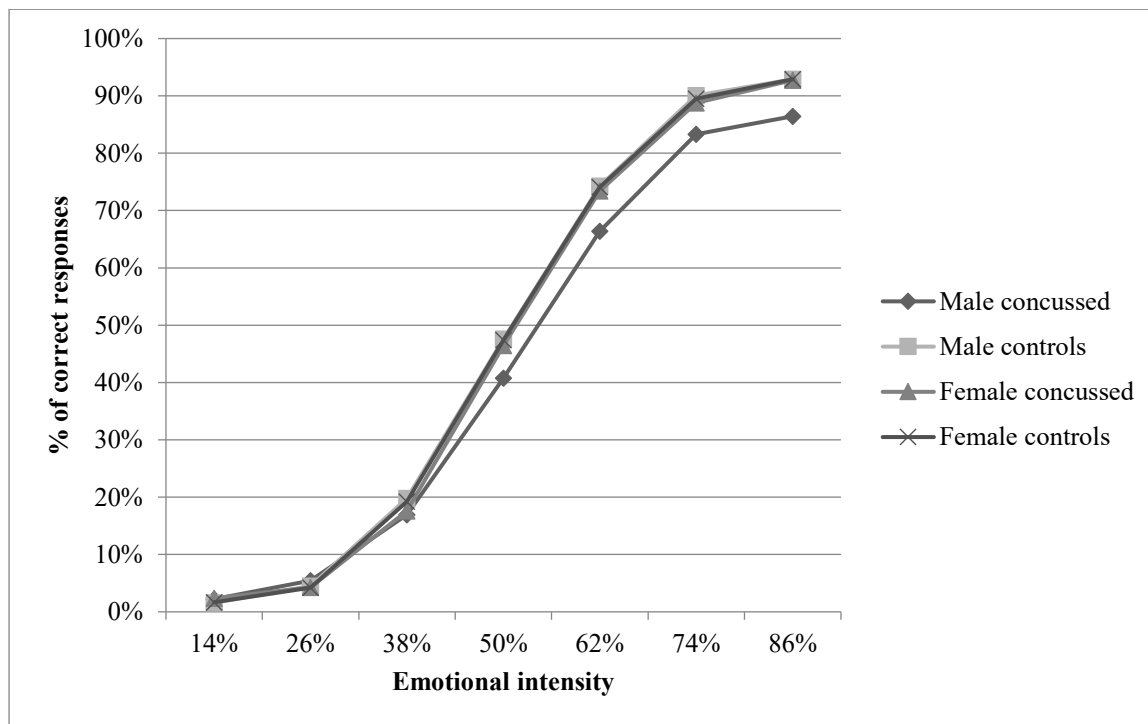


#### 2.4.2.2 Intensity threshold

A two-way ANOVA on intensity threshold for negative emotions revealed a significant main effect of emotion ( $F(3, 138) = 75.53$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2 = .62$ ). Pairwise comparisons indicated that participants needed

significantly more emotional intensity to recognize fear ( $M = 63.97\% \pm 8.47\%$ ) than anger ( $M = 51.79\% \pm 5.28\%$ ), disgust ( $M = 50.42\% \pm 7.11\%$ ), and sadness ( $M = 46.64\% \pm 4.14\%$ ), while they needed significantly less intensity to identify sadness than anger and disgust (all  $ps < .001$ ). There was also a significant main effect of group ( $F(1, 46) = 7.31$ ;  $p = .01$ ;  $\eta^2 = .14$ ), showing that concussed athletes ( $M = 54.54\% \pm 3.97\%$ ) needed more intensity to recognize negative emotions than control athletes ( $M = 52.15\% \pm 3.08\%$ ). More importantly, analyses revealed a significant sex by group interaction ( $F(1, 46) = 6.02$ ;  $p < .05$ ;  $\eta^2 = .12$ ). Tukey's *post hoc* tests revealed that male concussed athletes ( $M = 56.68\% \pm 4.56\%$ ) needed significantly more emotional intensity to identify the negative emotions compared to male control athletes ( $M = 51.82\% \pm 3.16\%$ ;  $p < .01$ ;  $d = 1.24$ ) and female concussed athletes ( $M = 52.77\% \pm 2.34\%$ ;  $p < .05$ ;  $d = 1.08$ ), while there was no difference between female concussed ( $M = 52.77\% \pm 2.34\%$ ) and same-sex control athletes ( $M = 52.53\% \pm 3.05\%$ ;  $p > .05$ ;  $d = .09$ ) (see Figure 2.3).

Figure 2.3 Between-group comparisons in intensity threshold for negative emotions.

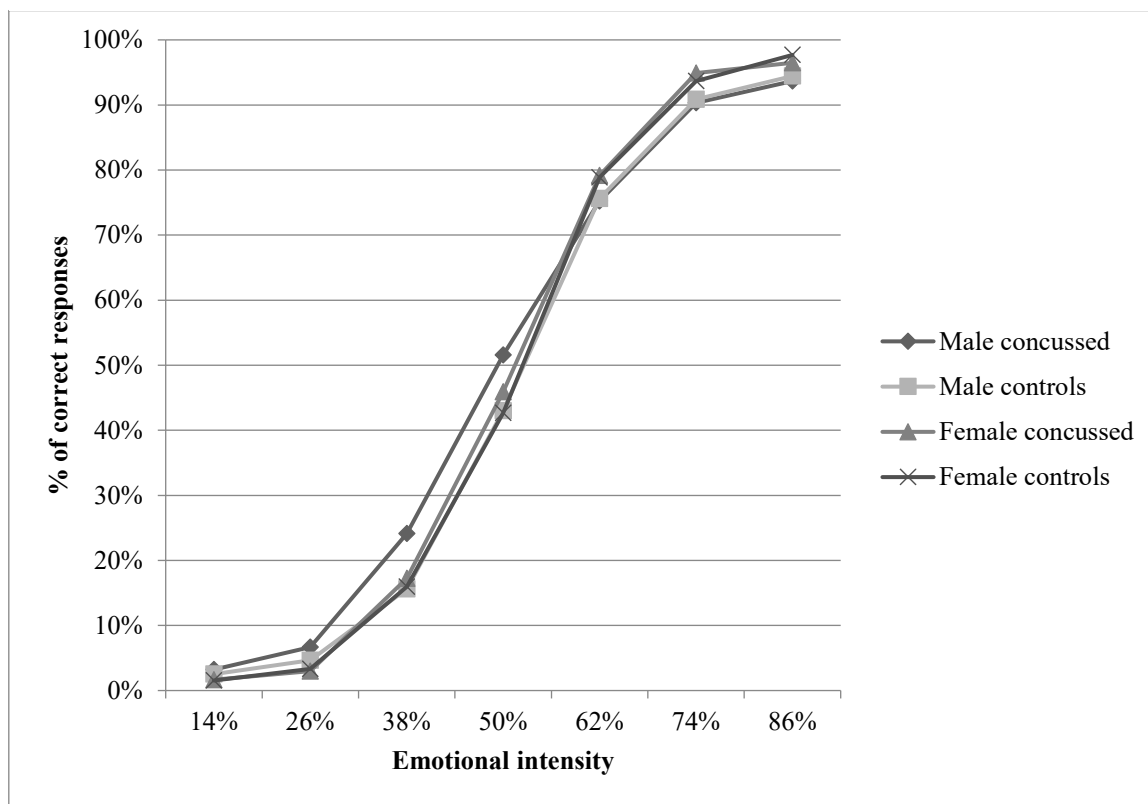


ANCOVAs were then conducted on intensity threshold for negative emotions for male and female concussed athletes, with time since the last concussion as a covariate. Again, there was a significant effect of sex ( $F(1, 19) = 7.35$ ;  $p < .05$ ;  $\eta^2 = .28$ ), indicating that time since the last concussion could not account

for the significant difference between male and female concussed athletes on intensity threshold for negative emotions.

In contrast to negative emotions, there was only a significant main effect of emotion on threshold for positive emotions ( $F(1, 46) = 22.44; p < .001; \eta^2 = .33$ ), indicating that participants needed less intensity to recognize happiness ( $M = 48.86\% \pm 6.53\%$ ) than surprise ( $M = 54.84\% \pm 5.75\%$ ). There were no significant group differences in threshold for positive emotions (all  $ps > .05$ ) (see Figure 2.4).

Figure 2.4 Between-group comparisons in intensity threshold for positive emotions.



### 2.4.3 Correlational Analyses

After correction for multiple comparisons, there were no significant correlations between number of concussions, time since the last concussion, and emotion recognition in male and female concussed athletes (see Table 2.3).

Tableau 2.3 Correlations between number of concussions, time since the last concussion, and emotion recognition in male concussed athletes, female concussed athletes, and concussed athletes as a group.

	Male concussed athletes		Female concussed athletes		Concussed athletes	
	Number of concussions	Time since the last concussion	Number of concussions	Time since the last concussion	Number of concussions	Time since the last concussion
Accuracy						
Fear	.20 (.57)	-.07 (.84)	.39 (.21)	-.16 (.61)	.31 (.16)	.07 (.77)
Anger	.15 (.68)	.00 (.99)	-.42 (.17)	-.34 (.29)	-.08 (.74)	-.03 (.91)
Disgust	-.38 (.28)	.03 (.93)	-.15 (.63)	.34 (.28)	-.13 (.55)	.40 (.07)
Happiness	-.60 (.07)	.04 (.91)	.33 (.29)	.19 (.55)	-.30 (.18)	-.02 (.94)
Sadness	-.04 (.92)	-.30 (.39)	-.42 (.17)	-.21 (.51)	-.17 (.45)	-.06 (.79)
Surprise	.36 (.30)	.24 (.51)	.56 (.06)	.50 (.10)	.49 (.02)	.44 (.04)
Intensity threshold						
Fear	-.07 (.85)	.10 (.78)	-.38 (.22)	.15 (.64)	-.21 (.35)	-.08 (.72)
Anger	-.29 (.42)	.10 (.79)	.37 (.24)	.43 (.17)	.01 (.96)	.16 (.48)
Disgust	.27 (.45)	.08 (.82)	.34 (.27)	-.21 (.51)	.18 (.43)	-.28 (.20)
Happiness	.57 (.09)	-.10 (.77)	-.32 (.31)	-.27 (.40)	.26 (.24)	-.04 (.87)
Sadness	.08 (.83)	.29 (.41)	.43 (.16)	.21 (.52)	.22 (.32)	.12 (.59)
Surprise	-.30 (.41)	-.30 (.40)	-.59 (.04)	-.57 (.05)	-.43 (.04)	-.41 (.06)

Note. *p*-Values are presented in parentheses.

Because of the small sample size, correlational analyses were also conducted among concussed athletes. Again, there were no significant correlations between number of concussions, time since the last concussion, and emotion recognition after correction for multiple comparisons (see Table 2.3).

To investigate whether subtle cognitive changes could drive negative emotion recognition alterations in male concussed athletes, correlational analyses were conducted between neuropsychological data and emotion recognition. After correction for multiple comparisons, there were no significant correlations between neuropsychological data and emotion recognition in male concussed athletes (see Table 2.4).

Tableau 2.4 Correlations between neuropsychological data and emotion recognition in male concussed athletes.

	RAVLT		RCFT		SDMT	Verbal fluenc y	Stroop 3		Stroop 4		Compr hensi on
	Immed iate recall	Delaye d recall	Imme diate recall	Delaye d recall			Compl etion time	Total errors	Compl etion time	Total errors	
Accur acy											
Fear	.15 (.68)	-.17 (.64)	-.10 (.79)	.15 (.68)	.24 (.51)	.03 (.93)	-.35 (.32)	-.67 (.03)	-.70 (.02)	.09 (.81)	.40 (.26)
Anger	-.21 (.57)	-.30 (.39)	-.34 (.34)	-.09 (.80)	.30 (.40)	.15 (.68)	-.20 (.59)	-.27 (.44)	-.16 (.67)	.59 (.07)	.36 (.31)
Disgus t	-.12 (.74)	.06 (.87)	-.25 (.49)	-.53 (.12)	-.15 (.67)	-.20 (.58)	.13 (.73)	.05 (.89)	.39 (.26)	.41 (.24)	-.03 (.94)
Happi ness	-.12 (.74)	.02 (.96)	-.25 (.48)	-.12 (.75)	-.15 (.69)	-.20 (.57)	.03 (.94)	-.32 (.36)	-.46 (.18)	-.53 (.11)	.05 (.89)
Sadnes s	.19 (.59)	.00 (1.00)	.06 (.87)	.36 (.31)	.29 (.41)	.25 (.49)	-.29 (.42)	-.44 (.21)	-.59 (.07)	-.29 (.42)	.06 (.88)
Surpri se	.16 (.67)	.01 (.97)	.02 (.97)	-.11 (.76)	-.37 (.29)	-.71 (.02)	.06 (.88)	-.46 (.18)	-.54 (.11)	-.65 (.04)	.03 (.92)
Intensit y thresho ld											
Fear	-.07 (.84)	.14 (.70)	.23 (.53)	-.02 (.97)	-.26 (.48)	.00 (1.00)	.26 (.47)	.66 (.04)	.65 (.04)	-.11 (.75)	-.35 (.32)
Anger	.11 (.76)	.24 (.51)	.26 (.47)	.02 (.97)	-.37 (.30)	-.22 (.54)	.19 (.59)	.24 (.51)	.14 (.69)	-.57 (.09)	-.25 (.49)
Disgus t	.14 (.69)	-.06 (.88)	.21 (.55)	.50 (.14)	.14 (.69)	.28 (.43)	-.18 (.62)	-.07 (.84)	-.46 (.18)	-.25 (.49)	.17 (.63)
Happi ness	.06 (.87)	-.14 (.70)	.14 (.71)	.00 (.99)	-.08 (.82)	.21 (.56)	.13 (.73)	.40 (.25)	.46 (.18)	.47 (.17)	-.10 (.79)
Sadnes s	-.25 (.49)	-.16 (.66)	-.19 (.60)	-.41 (.23)	-.38 (.28)	-.38 (.29)	.17 (.64)	.20 (.58)	.37 (.29)	.20 (.58)	-.01 (.98)
Surpri se	-.22 (.54)	-.04 (.91)	-.10 (.77)	.09 (.80)	.53 (.11)	.56 (.09)	-.11 (.75)	.23 (.52)	.42 (.23)	.58 (.08)	-.02 (.96)

Note. *p*-Values are presented in parentheses.

## 2.5 Discussion

The current study investigated the effects of multiple concussions on emotion recognition in asymptomatic male and female athletes tested more than a year since the last concussion. Results revealed emotion recognition alterations in male concussed athletes, but not in females. These alterations were specific to

negative emotional facial expressions. Male concussed athletes were worse than same-sex controls in recognizing negative emotions and needed more intensity to correctly identify these emotions. In contrast, female concussed athletes performed similarly to same-sex controls. The effect sizes were medium to large, particularly for the sex by group interaction in negative emotions accuracy and intensity threshold. The robustness of these findings is further supported by several studies that have shown that morphed emotion recognition tasks are particularly sensitive to subtle emotion recognition alterations (Bishop *et al.*, 2015; Harmer *et al.*, 2002; Humphreys *et al.*, 2007; Richards *et al.*, 2002).

Results in male concussed athletes are consistent with several studies in which patients with TBI were found to be impaired in recognizing emotions, particularly negative emotions (Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Hopkins *et al.*, 2002; Ietswaart *et al.*, 2008; McDonald, S. *et al.*, 2003; McDonald, S. *et al.*, 2011; Williams, C. et Wood, 2010). Notably, recognition of positive emotions was preserved in concussed athletes. This result is also consistent with studies of TBI in which recognition of happiness was found to be spared while recognition of all the other basic emotions was affected (Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Hopkins *et al.*, 2002; Ietswaart *et al.*, 2008; McDonald, S. *et al.*, 2003; McDonald, S. *et al.*, 2011; Williams, C. et Wood, 2010).

Several explanations may account for this effect of emotional valence. First, there are fewer positive than negative emotions, which could make it easier to distinguish one positive emotion from another (Adolphs *et al.*, 1996; Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Williams, C. et Wood, 2010). A related issue is that happiness is often considered to be the only basic positive emotion, which could make it easier to recognize than negative emotions (Adolphs *et al.*, 1996). Second, happiness is the only emotion that is expressed with the stereotypic smile which may also facilitate recognition (Callahan *et al.*, 2011). In contrast, negative emotions are known to share many facial features such as a frown, furrowed brows, and widened jaws, which were suggested to render recognition of negative emotions more difficult (Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Smith, M. L. *et al.*, 2005; Williams, C. et Wood, 2010). In line with this, recent research has suggested that task difficulty may account for the differential impairment in emotion recognition in TBI (Ietswaart *et al.*, 2008; Rapcsak *et al.*, 2000; Rosenberg *et al.*, 2015).

In particular, Rosenberg *et al.* (2015) found that TBI patients were impaired at recognizing emotions in general, while being more impaired at recognizing negative emotions. However, when they examined accuracy across the different intensities, they showed that this differential impairment was driven by some emotions such as happiness being easier to recognize than others. In our study, participants recognized happiness expressed at 62% of emotional intensity in 83% of trials in which it was presented, while they

recognized negative emotions such as anger, disgust, fear, and sadness expressed at the same intensity on 72% of trials in which they were presented. In light of these findings, one cannot exclude the possibility that task difficulty may at least partially account for the pattern of results observed in male concussed athletes.

One possible explanation for gender differences in emotion recognition in multi-concussed athletes is that concussion tends to exacerbate premonitory ailments or difficulties (Bryant *et al.*, 2010; Deb, Lyons et Koutzoukis, 1999; Deb, Lyons, Koutzoukis, *et al.*, 1999; Ellis *et al.*, 2015; Fleminger, 2008; Koponen *et al.*, 2011; Koponen *et al.*, 2002). In keeping with this notion, studies have found that baseline differences in symptoms and neuropsychological testing may at least partially account for sex differences after concussion (Brown *et al.*, 2015; Covassin, Elbin, Bleecker, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2006; Dick, 2009; Zuckerman *et al.*, 2014). A longitudinal study with baseline and post-concussion testing would be helpful in confirming the differential pattern of results across sex.

Alternatively, it is possible that menstrual cycle and hormonal levels could at least partially account for sex-related differences in emotion recognition after concussion. Interestingly, a recent study showed that women injured during the luteal phase of their menstrual cycle, when progesterone is high relative to estrogen, had lower quality of life and neurologic outcome than women injured during the follicular phase of their cycle or those taking oral contraceptives (Wunderle *et al.*, 2014). Furthermore, women taking oral contraceptives or in the follicular phase of their cycle are better at recognizing emotions, particularly negative emotions such as anger and fear, and have stronger activation in both the amygdala and fusiform face area (Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Marečková *et al.*, 2014; Pearson et Lewis, 2005). Another study showed associations between progesterone levels and amygdala response to fearful, sad, and neutral faces (Marečková *et al.*, 2014). Although conjectural, it is plausible that intrinsic and cyclic changes in hormonal levels may have contributed to sex-related emotion recognition differences among concussed athletes. Lastly, given the increased propensity for female concussed athletes to develop affective disorders such as depression and anxiety (Ellis *et al.*, 2015; Fenton *et al.*, 1993; Trojian, 2016; Yang, J. *et al.*, 2015), one target for future studies should be to investigate the interplay between anxiety, depression, and emotion recognition in a sample of concussed athletes presenting with symptoms of anxiety and depression.

There are several methodological limitations to this study. First, our sample size of self-reported concussion cases was relatively small. Second, we tested multi-concussed athletes only, which limits the generalizability of the findings of the current study to a subset of the population of concussed athletes. Finally, we did not measure menstrual cycle and hormonal levels in females at the moment of testing. Large-

scale, follow-up studies conducted with single and multi-concussed athletes including menstrual cycle and hormonal measures are therefore warranted to further confirm the validity of the present study findings. Nevertheless, this study provides evidence that multiple concussions induce long-term changes in the processing of negative emotional facial expressions in asymptomatic male concussed athletes, but not in females.

## 2.6 Acknowledgments

The authors declare no conflict of interests. This work was supported by the Fonds de recherche du Québec awarded to EL and LDB. The authors thank André Achim and Jean Bégin for their advices on statistical analyses.



## CHAPITRE 3

### ARTICLE 2

#### Effects of Emotion and Emotional Ambiguity on Early Visual Event-Related Potentials<sup>2</sup>

Edith Léveillé<sup>1, 2</sup>, Martine Desjardins<sup>1, 2</sup>, Gaëlle Dumel<sup>1, 2</sup>, Caroline Blais<sup>3</sup>, Dave Saint-Amour<sup>1, 4</sup>, Peter Scherzer<sup>1</sup>, & Louis De Beaumont<sup>2, 5</sup>

<sup>1</sup> Département de psychologie, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup> Centre de recherche, Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>3</sup> Département de psychoéducation et de psychologie, Université du Québec en Outaouais, Gatineau, Québec, Canada

<sup>4</sup> Centre de recherche, Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine, Montréal, Québec, Canada

<sup>5</sup> Département de chirurgie, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

---

<sup>2</sup> Article publié dans la revue *Emotion* en 2022. Référence complète : Léveillé, E., Desjardins, M., Dumel, G., Blais, C., Saint-Amour, D., Scherzer, P., & De Beaumont, L. (2022). Effects of Emotion and Emotional Ambiguity on Early Visual Event-Related Potentials. *Emotion*.

### 3.1 Abstract

**Objective:** The modulation of early sensory event-related potentials (ERPs) such as the P1, N1, and N170 by emotion and emotional ambiguity is still controversial. Some studies have found a modulation of one or all of these components by one or both of these factors, whereas others have failed to show such results. The objective of this study was to investigate the effects of emotion and ambiguity on the behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task. **Methods:** 37 healthy participants (19 males) completed an emotion recognition task where photographs of a male face expressing the six basic emotions morphed with another emotion (in a proportion ranging from 26% to 74%) were randomly presented while electroencephalography (EEG) was recorded. After each face presentation, participants were asked to identify the facial emotion. **Results:** We found an emotional effect on the P1, N1, and N170, with greater amplitudes for some emotional facial expressions (i.e. anger, disgust, fear) than for others (i.e. happiness, sadness, surprise). However, we found no significant emotional ambiguity effect or interaction between emotion and ambiguity for any of these components. **Conclusions:** These findings suggest that computation of emotional facial expressions (regardless of their ambiguity) occurs from the early stages of brain processing.

**Keywords:** emotion, emotional facial expression (EFE), electroencephalography (EEG), event-related potential (ERP), mass univariate statistics

### 3.2 Introduction

Emotional facial expressions are an important means of social communication, allowing one person to express effectively and quickly information about his or her emotional state to others (Ekman *et al.*, 1980). Because these expressions are so important to adaptation and social communication, humans have become experts in perceiving them, with specific brain regions dedicated to their processing (Schyns *et al.*, 2009).

Neuroimaging studies have shown that the perception of emotional facial expressions involves a set of cortical and subcortical regions, including the amygdala, the right occipitotemporal regions, the right parietal cortex, the prefrontal cortex, the insula, and the basal ganglia, among others (Adolphs, 2002a, 2002b; Fusar-Poli *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2003; Sabatinelli *et al.*, 2011). Furthermore, these studies have reported asymmetric hemispheric activations in emotion perception, with the right hemisphere being generally more activated than the left (Abbott *et al.*, 2013; Adolphs, 2002a, 2002b; Blair, R. *et al.*, 1999; Morris *et al.*, 1998; Sabatinelli *et al.*, 2011). Although these studies provide useful information about the brain regions involved in emotion processing, the low temporal resolution of most neuroimaging techniques offers only limited insight about the time course of this cognitive process. In contrast, electroencephalography (EEG), with its high temporal resolution, can provide valuable information about the time course of processes underlying emotion recognition. Indeed, research has shown that early sensory event-related potentials (ERPs) such as the P1, N1, and N170 can be modulated by emotional facial expressions (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Durston, A. J. et Itier, 2021; Luo *et al.*, 2010; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006; Zhang, D. *et al.*, 2013).

The visual P1 is the first positive-going deflection recorded at lateral occipital electrode sites emerging 60-90 ms after stimulus onset and peaking at approximately 100-130 ms (Luck, 2014). It has been proposed that the early portion of this component arises in the middle occipital gyrus, whereas the later portion is suggested to originate from the fusiform gyrus (Di Russo *et al.*, 2001). Because of its origins in the extrastriate cortex, the P1 is sensitive to low-level visual features of stimuli such as size, contrast, and luminance (Luck, 2014), but it is also modulated by arousal and attention (Hillyard *et al.*, 1998; Luck *et al.*, 2000; Vogel et Luck, 2000). More recently, research has shown that it is also sensitive to the emotional content of stimuli, with enhanced responses to unpleasant compared to pleasant and/or neutral images (Carretié *et al.*, 2006; Carretié *et al.*, 2004; De Cesarei et Codispoti, 2006; Delplanque *et al.*, 2004; Hot *et al.*, 2006; Olofsson *et al.*, 2008; Smith, N. K. *et al.*, 2003). Moreover, studies on emotional facial expressions have found increased P1 responses to angry, disgusted, and fearful expressions than to happy and/or neutral faces (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Luo *et al.*, 2010; Pourtois *et al.*, 2004; Rellecke *et al.*, 2012; Smith, E. *et al.*, 2013; Williams, L. M. *et al.*, 2006), although others did not show such an effect

(Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Meeren *et al.*, 2005; Schindler *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2017; Turano *et al.*, 2017).

The visual N1 is the first negative-going potential which is the sum of different N1 subcomponents (Luck, 2014). The earliest N1 subcomponent peaks between 100 and 150 ms post-stimulus at anterior electrodes, while two other N1 subcomponents peak later, between 150 and 200 ms post-stimulus at posterior sites, one arising from lateral occipital cortex and the other from parietal cortex (Luck, 2014). Similar to the P1, the visual N1 is affected by both attention and emotion (Carretié *et al.*, 2007; Foti *et al.*, 2009; Hajcak *et al.*, 2012; Hillyard *et al.*, 1998; Keil *et al.*, 2002; Keil *et al.*, 2001; Weinberg et Hajcak, 2010). Indeed, research has shown that this component is enhanced by both pleasant and unpleasant compared to neutral stimuli (Carretié *et al.*, 2007; Foti *et al.*, 2009; Hajcak *et al.*, 2012; Keil *et al.*, 2001; Schupp *et al.*, 2003; Weinberg et Hajcak, 2010). On the other hand, the vast majority of studies on emotional facial expressions have found increased N1 responses to negative (fearful and distressed) than to happy and/or neutral faces (Holmes *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2010; Proverbio *et al.*, 2006; Zhang, D. *et al.*, 2013), with only a few showing no emotional modulation (Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Pourtois *et al.*, 2004). The visual P1 and N1 have been proposed to reflect the coarse and rapid detection of potentially threatening facial expressions, before a more detailed analysis of faces in the posterior visual cortex around 170 ms (Luo *et al.*, 2010; Vuilleumier et Pourtois, 2007).

The N170 is also a negative-going deflection observed at bilateral occipitotemporal sites, with greater amplitudes in the right hemisphere (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012). This component arises around 140 ms and peaks at approximately 160-170 ms after stimulus onset (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012). The N170 is more negative to faces than to non-face stimuli and is therefore considered to reflect the perceptual processing of faces (Bentin *et al.*, 1996; Bentin et Deouell, 2000; Rossion et Jacques, 2012). It has been suggested that the source generators of this component are located in the lateral occipitotemporal cortex and the fusiform gyrus (Bötzel *et al.*, 1995; Deffke *et al.*, 2007; Pizzagalli *et al.*, 2002; Rossion *et al.*, 2003; Schweinberger *et al.*, 2002; Shibata *et al.*, 2002). Additional generators in the lingual gyrus, the posterior part of the superior temporal sulcus as well as in a parieto-temporo-occipital network have also been proposed (Herrmann *et al.*, 2005; Itier et Taylor, 2004b; Taylor *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2003). Similar to other early sensory ERPs, the emotional modulation of the N170 is controversial, with some studies showing enhanced responses to emotional compared to neutral facial expressions (Luo *et al.*, 2010; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006) and others failing to find such an effect (Ashley *et al.*, 2004; Eimer et Holmes, 2002; Eimer *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2005; Wild-Wall *et al.*, 2008). Among the studies reporting an emotional modulation of the N170, several have shown increased

responses to angry, disgusted, and/or fearful expressions than to happy and/or neutral faces (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Blau *et al.*, 2007; Rellecke *et al.*, 2011; Roberge *et al.*, 2019; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017), although more recent research has also suggested enhanced responses to happy relative to neutral expressions (Hinojosa *et al.*, 2015; Kolassa *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2010; Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006). This has been interpreted as reflecting the discrimination of emotional (both threatening and non-threatening) from neutral facial expressions, with no distinction between the different emotions (Luo *et al.*, 2010). However, the majority of studies on the neural correlates of emotion processing have included only one emotion from each category (positive, negative, neutral), failing to compare the modulation of the P1, N1, and N170 by the different emotions of a single type (e.g. anger, disgust, fear).

Although interesting, these studies offer limited insight into the neural substrates of emotional facial expressions processing in real life. Faces do not always display an emotion at full intensity. Instead, they often express an emotion at lower intensities (i.e. a combination of a neutral with an emotional expression) or even, several emotions simultaneously (e.g. a mix of anger and disgust or happiness and surprise). In the last few years, research on emotional facial expressions has used two more realistic types of stimuli: the older studies have used stimuli morphing a neutral with an emotional expression, while the more recent ones have used morphs combining two emotional expressions. There is, however, an important distinction between these two types of stimuli. In the case of morphs between a neutral and an emotional expression, an increase in the proportion of the emotional expression in the stimulus increases its emotional intensity. In contrast, in the case of stimuli morphing two emotional expressions, an increase in the proportion of one expression in the morph has the effect of reducing the emotional ambiguity of that expression, thereby increasing the ambiguity of the other (unlike the morphs between a neutral [which cannot be less or more ambiguous] and an emotional expression). A recent study using neuroimaging and single-neuron recordings has indeed shown that intensity and ambiguity are two different aspects of emotion, and that they can be distinguished at the electrophysiological level (Wang *et al.*, 2017).

The majority of EEG studies using these more realistic stimuli have used morphs between a neutral and an emotional facial expression. Surprisingly, many of these studies did not factor in intensity as a potential modulator of the electrophysiological responses to emotional expressions (Kerestes *et al.*, 2009; Kolassa *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2010; Muukkonen *et al.*, 2020). Among the few investigating the effect of emotional intensity, conflicting results have been reported, with some showing P1 and N170 amplitude modulation as a function of intensity (Utama *et al.*, 2009), while others found a modulation for the N170 only (Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Sprengelmeyer et Jentzsch, 2006), and still others showing no such effect

for any of these components (Recio *et al.*, 2014). None of these studies have examined the effect of emotional intensity on the N1.

Relatively few studies have used morphs between two emotional facial expressions to investigate the electrophysiological responses to emotional ambiguity (Kaminska *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2017). In one such study, it was found that the frontal midline N1 was affected by emotional ambiguity, with more negative amplitudes to “pure” (100%) than ambiguous (50/50%) emotional facial expressions (Kaminska *et al.*, 2020). The N170, on the other hand, was not influenced by ambiguity. To our knowledge, this is the only study that has examined the effect of emotional ambiguity on early sensory ERPs, which leaves the question how does the brain process ambiguity in emotional facial expressions, unresolved.

Most of the aforementioned studies have used classical statistical analyses of ERPs, which consist of selecting an electrode or a subset of electrodes and a time window based on past research and/or visualization of the data. However, this method increases the number of implicit multiple comparisons, which in turn increases the probability of committing a type I error (false positive) (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011; Luck et Gaspelin, 2017). It also reduces the power to detect effects at other electrodes and time points that were not included in the analyses (type II error or false negative) (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011). Very few studies have used mass univariate statistics, which allow greater flexibility and better power (lower type II error rate), while adequately controlling the type I error rate (Durstun, A. J. et Itier, 2021; Kaminska *et al.*, 2020). These methodological issues (statistical analyses and stimuli used such as type of morphs and emotions included) may partly explain the low replicability in EEG research on emotion, making it unclear whether the early sensory ERPs such as the P1, N1, and N170 are modulated or not by emotion and/or emotional ambiguity.

Unlike EEG, more research has been done on the effects of emotion and emotional ambiguity on the behavioral responses, with more consistent results. Regarding the effect of emotion, several studies have shown that the recognition of negative emotions such as anger, disgust, and fear is more difficult than that of positive emotions such as happiness (Eimer *et al.*, 2003; Humphreys *et al.*, 2007; Kerestes *et al.*, 2009; Kolassa *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2010; Recio *et al.*, 2014; Utama *et al.*, 2009). As for ambiguity, studies using morphs combining two emotional facial expressions have reported that emotion recognition improves (both in terms of number of correct responses and reaction times) with decreasing ambiguity (Calder, Young, Perrett, *et al.*, 1996; Daudelin-Peltier *et al.*, 2017; de Gelder *et al.*, 1997; Etcoff et Magee, 1992; Kaminska *et al.*, 2020; Young *et al.*, 1997).

The objective of this study was thus to investigate the effects of emotion and emotional ambiguity on the behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task. In accordance with past research on emotion recognition (Calder, Young, Perrett, *et al.*, 1996; Kaminska *et al.*, 2020; Kerestes *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2010; Recio *et al.*, 2014; Utama *et al.*, 2009; Young *et al.*, 1997), we hypothesized that these two factors would affect the behavioral responses, with some emotions (i.e. happiness) being easier to identify than others and emotion recognition improving with decreasing ambiguity. As for the electrophysiological responses, we hypothesized that the P1 and N1 would be affected by emotion, with greater amplitudes to negative compared to positive emotions, as previously reported (Aguado *et al.*, 2012; Holmes *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2010; Proverbio *et al.*, 2006; Rellecke *et al.*, 2012; Smith, E. *et al.*, 2013; Zhang, D. *et al.*, 2013). For the N170, we hypothesized that it would also be affected by emotion, but had no assumptions as to which specific emotions would influence this component considering the conflicting results of previous studies (Durston, A. J. et Itier, 2021; Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2011; Rellecke *et al.*, 2012; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017). Finally, we had no a priori hypotheses as to whether or not the P1, N1, and/or N170 would be modulated by emotional ambiguity given that only one study has examined the effect of this factor on early sensory ERPs (Kaminska *et al.*, 2020).

### 3.3 Material and Methods

#### 3.3.1 Participants

This experiment was part of a larger study on the behavioral and electrophysiological correlates of emotion recognition in athletes with concussion. This study was approved by the local ethics committee, and all participants gave written informed consent before testing. They received financial compensation of \$80 CDN for their participation in the study.

For this experiment, 41 healthy participants (20 males, age =  $23.27 \pm 3.29$  years, range = 19-33 years, level of education =  $15.17 \pm 1.77$  years, range = 13-21 years, all right-handed except for 2 who were ambidextrous) were tested. To be included in the experiment, they had to be between 18 and 35 years old, have normal or corrected to normal vision, no history of alcohol and/or substance abuse, no condition requiring daily medication, no history of psychiatric or neurological disorder, no current anxiety or depression as assessed by the Beck Anxiety Inventory (Beck et Steer, 1993) and the Beck Depression Inventory-II (Beck *et al.*, 1996), respectively, no learning disability, and no concussion or traumatic brain injury. Two participants were excluded due to clinical anxiety as assessed by the BAI, one due to learning disorder diagnosed after the study, and another one due to excessive movements during EEG recording, resulting in a final sample

of 37 participants (19 males, age =  $23.41 \pm 3.38$  years, range = 19-33 years, level of education =  $15.19 \pm 1.76$  years, range = 13-21 years, all right-handed except for 2 who were ambidextrous).

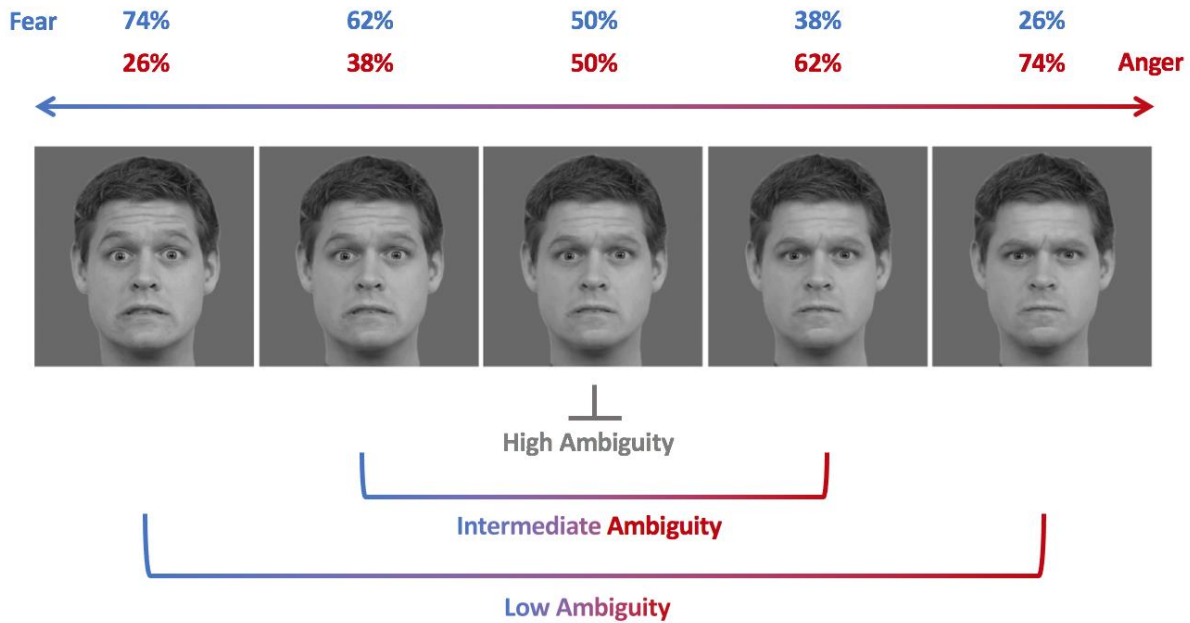
### 3.3.2 Stimuli and task

Participants completed an emotion recognition task inspired by the “facial expression megamix paradigm” (Young *et al.*, 1997). This task consists of the categorization of blends of emotional facial expressions, created by morphing two expressions together (Bérubé *et al.*, 2020; Daudelin-Peltier *et al.*, 2017; Fiset *et al.*, 2017; Léveillé *et al.*, 2017; Turgeon *et al.*, 2020).

Stimuli consisted of photographs of a male face depicting the six basic emotional facial expressions (angry, disgusted, fearful, happy, sad, surprised), taken from the Radboud Faces Database (Langner *et al.*, 2010). A single male identity was used for all emotional facial expressions since the original task stimuli consisted of a series of facial expressions from the same man, but also to avoid identity effects and differences in emotional expressiveness between the sexes. The facial stimuli were transformed into grayscale and put on a neutral gray background. Each inner feature (eyes, nose, mouth) was aligned to the average position of that feature across all facial expression stimuli using a homemade MATLAB program applying rotations, translations, and/or scaling. The mean luminance and the spatial frequency spectrum were also equated across stimuli using the SHINE toolbox (Willenbockel *et al.*, 2010). The emotional facial expressions were morphed with each other in all possible pairwise combinations, for a total of 15 continuums of blend (anger/disgust, anger/fear, anger/happiness, and so on), using FantaMorph 5.0 (Abrosoft Co., 2002). More specifically, hundreds of points were placed on corresponding locations of two pictures of facial expressions, and the visual information corresponding to a given location on the first picture was gradually changed into the one at this same location on the second picture. The proportion of each expression in a given blend ranged from 26/74% to 74/26%, in 12% increments. These proportions corresponded to different ambiguity levels, with 26/74% and 74/26% corresponding to low ambiguity, 38/62% and 62/38% to intermediate ambiguity, and 50/50% to high ambiguity (see Figure 3.1).



Figure 3.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing anger and fear in a proportion ranging from 26/74% to 74/26%, with the corresponding ambiguity levels (low, intermediate, high). Stimuli from the Radboud Faces Database, which allows free use of the faces without permission for scientific publications as stimulus examples. Figure inspired by Wang et al. (2017).



The task included 15 blocks of 75 trials, for a total of 1125 trials. On each trial, a morph was randomly selected and presented at the center of a computer monitor (VIEWPixx / EEG, VPixx Technologies Inc., Saint-Bruno, Canada) until the participants responded. Participants were asked to choose which of six labels (angry, disgusted, fearful, happy, sad, surprised) best described the presented emotional facial expression using a forced-choice task. More specifically, they had to press a corresponding key on a computer keyboard for each label, three left-hand keys (fearful, angry, disgusted) and three right-hand keys (happy, sad, surprised). Participants were asked to respond as accurately and quickly as possible. No feedback was provided. The interstimulus interval (ISI) varied randomly between 1000 and 1500 ms and consisted of a grey background. Participants were seated on a straight-back chair in a dimly lit, electrically shielded room, with the monitor placed at a viewing distance of 60 cm such that the stimulus (about 11 cm wide by 16 cm high) subtended 10.48 by 15.19 degrees of visual angle.

Two behavioral measures were derived from the task: accuracy and reaction time (RT) (see Appendix 1 for a third measure, recognition threshold, and its results). For both these measures, only trials where an emotional facial expression was dominant in the morph (a proportion of 50% and more) were analyzed since we were interested in the effect of ambiguity for each emotion separately. So, from now on, low and intermediate ambiguities refer to trials where an expression was in a proportion of 74% and 62%,

respectively. Accuracy for each emotional facial expression (angry, disgusted, fearful, happy, sad, surprised) at each ambiguity level (low, intermediate, high) was calculated as the mean percent of correct responses on all trials in which the expression was presented at a given level. In the case of emotional facial expressions displayed at the highest ambiguity level (a proportion of 50%), both emotions presented by the expression were considered correct responses. RT for each emotional facial expression correctly identified was calculated as the mean time from stimulus onset to response on all trials in which the expression was displayed at each ambiguity level separately. Again, in the case of emotional facial expressions presented at the highest ambiguity level, both emotions displayed by the expression were scored as correct responses.

### 3.3.3 Electrophysiological recording and analysis

EEG data was collected using a BrainAmp DC system (Brain Products, GmbH, Gilching, Germany) with 64 active Ag-AgCl electrodes, positioned according to the International 10-10 system (American Electroencephalographic Society, 1994), grounded at AFz, and online referenced to FCz. In addition, horizontal electrooculogram (HEOG) was recorded from bipolar electrodes placed on the outer canthi of both eyes and vertical electrooculogram (VEOG) from the infra/supraorbital regions of the dominant eye. Impedances were kept below 15 k $\Omega$ . EEG was recorded at a sampling rate of 1000 Hz and online filtered between 0.1 and 100 Hz.

EEG data was preprocessed and analyzed with EEGLAB version 14.1.1 (Delorme et Makeig, 2004) and ERPLAB version 7.0.0 (Lopez-Calderon et Luck, 2014). The continuous (nonsegmented) data were downsampled at 500 Hz, then bandpass filtered with an infinite impulse response (IIR) Butterworth filter between 1 and 30 Hz (half-amplitude cutoff = -6 dB, slope = 12 dB/octave) to eliminate slow waves. Independent component analysis (ICA) using the Infomax algorithm was then performed to detect ocular artifacts (eye blinks, ocular saccades) and extract them from the EEG signal (Delorme et Makeig, 2004; Delorme *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2000; Plöchl *et al.*, 2012). The default parameters, as implemented in the *runica* function of EEGLAB, were used. Prior to ICA, periods without trigs for more than 30 seconds (the pauses between the blocks) were deleted to improve the algorithm, sparing 200 ms before the next trig. ICA components related to ocular artifacts were identified by visual inspection of their activations and topographic maps for each participant individually. Between 2 and 5 components ( $M = 3.14 \pm 0.80$ ) were extracted from the EEG signal for each participant.

The ocular artifact-corrected EEG signal was then re-referenced offline to the average and segmented according to stimulus type into 600-ms epochs, starting 200 ms before and ending 400 ms after stimulus onset. Epochs were baseline corrected relative to the mean signal amplitude between 200 and 0 ms before

stimulus presentation. Trials with remaining artifacts were detected with an absolute voltage threshold (a voltage exceeding  $\pm 100$  uV at any electrode) and excluded from analyses. Furthermore, trials with ocular movements before and at stimulus presentation were identified with a step function (a voltage exceeding  $\pm 50$  uV at HEOG and VEOG from -200 to 200 ms) and excluded, since artifact correction cannot account for differences in sensory input caused by these movements (i.e. exposure to different facial features in the case of saccades or no exposure at all in the case of blinks) (Luck, 2014). Finally, trials for which participants did not correctly identify the emotion were also excluded from analyses. Averages were computed for each emotion (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) at each ambiguity level (low, intermediate, high) for each participant, then grand averages were computed for all participants (total number of trials for all conditions =  $1117.22 \pm 108.43$ , range = 630-1270, see Table 3.2 in Appendix 2 for details on the number of trials per condition).

#### 3.3.4 Statistical analyses

Statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics for Windows, version 26.0 (IBM, New York, United States). Behavioral and EEG data were first converted into  $z$  scores, then descriptive statistics and histograms were computed for inspection of outliers and normality. Outliers ( $z$  scores  $< -3.29$  or  $> 3.29$ ) (Tabachnick et Fidell, 2007) were excluded pairwise for the behavioral analyses ( $M = 0.76 \pm 0.73$  cases excluded, range = 0-2), while they were excluded listwise for the electrophysiological analyses (5 cases excluded) due to the method used (see below). After exclusion of outliers, all data was normally distributed, and no transformation was needed.

For the behavioral data, repeated measures analyses of variance (ANOVAs) were conducted for accuracy and RTs with emotion (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) and ambiguity (low, intermediate, high) as within-subjects factors. The Greenhouse-Geisser (for  $\epsilon < 0.75$ ) or Huynh-Feldt (for  $\epsilon \geq 0.75$ ) correction was applied when assumptions of sphericity were violated (Verma, 2015). All statistical tests were corrected with the Bonferroni adjustment, except for the main effect of emotion as well as the interaction between ambiguity and emotion which were corrected with the Benjamini-Hochberg adjustment (Benjamini et Hochberg, 1995).  $P$  values less than .05 were considered statistically significant unless otherwise specified.

For the EEG data, mass univariate tests were conducted using the Factorial Mass Univariate ERP Toolbox (Fields, 2017). As recommended, ERPs were first downsampled from 500 to 125 Hz using a boxcar algorithm to decrease the number of tests (and thus increase power), then rebaselined from -200 to 0 ms to ensure baseline mean amplitude was 0 after downsampling (Fields, 2017; Groppe *et al.*, 2011). Repeated

measures ANOVAs with emotion and ambiguity as within-subjects factors were then performed using the recommended 10,000 permutations with an alpha of 0.05 (Blair, R. C. et Karniski, 1993; Fields, 2017; Fields et Kuperberg, 2020). These ANOVAs were conducted on the waveforms' amplitude at all electrodes (except HEOG and VEOG) from 100 to 200 ms since we were interested in early sensory ERPs (P1, N1, N170). All follow-up pairwise comparisons were corrected with the Bonferroni adjustment, except for the main effect of emotion as well as the interaction between ambiguity and emotion which were corrected with the Benjamini-Hochberg adjustment (Benjamini et Hochberg, 1995). *P* values less than .05 were considered statistically significant unless otherwise specified. The homemade MATLAB scripts for these analyses can be found at: [https://github.com/Editchka/FMUT\\_example\\_scripts](https://github.com/Editchka/FMUT_example_scripts).

Lastly, correlational analyses were performed between behavioral and electrophysiological data. Only significant electrodes and time points were correlated with corresponding accuracy scores to reduce the number of tests.

## 3.4 Results

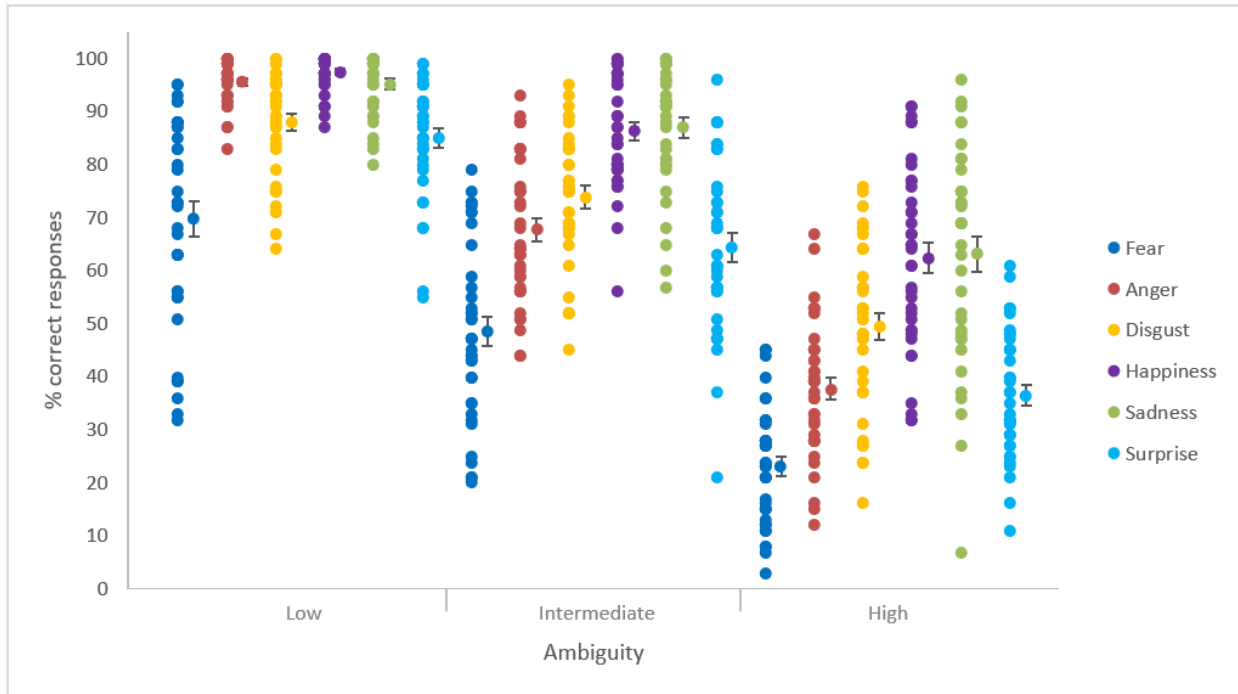
### 3.4.1 Behavioral results

#### 3.4.1.1 Accuracy

ANOVAs on accuracy revealed a significant main effect of emotion ( $F(5, 160) = 43.06, p < .001, \eta_p^2 = .57$ ). Pairwise comparisons indicated that fear ( $M = 47.50\% \pm 14.44\%$ , 95% CI = 42.61–52.39%) and surprise ( $M = 62.64\% \pm 10.75\%$ , 95% CI = 59.00–66.28%) were significantly more difficult to identify than the other emotions (all  $ps < .001$  except for the comparisons between surprise and anger where  $p = .053$  as well as surprise and disgust where  $p = .001$ ), with fear being significantly harder to recognize than surprise ( $p < .001$ ). Additionally, there was a trend towards significance for anger ( $M = 67.41\% \pm 8.44\%$ , 95% CI = 64.51–70.31%) to be more difficult to identify than disgust ( $M = 71.02\% \pm 10.73\%$ , 95% CI = 67.33–74.70%,  $p = .056$ ) and significantly harder to recognize than both happiness ( $M = 82.10\% \pm 8.88\%$ , 95% CI = 79.14–85.06%,  $p < .001$ ) and sadness ( $M = 82.33\% \pm 11.19\%$ , 95% CI = 78.55–86.12%,  $p < .001$ ). In contrast, these last two emotions were significantly easier to identify than all the others (all  $ps < .001$  except for disgust where  $ps = .001$ ), with no significant difference between them ( $p = .696$ ). There was also a significant main effect of ambiguity ( $F(2, 64) = 1707.95, p < .001, \eta_p^2 = .98$ ), showing that the least ambiguous emotions ( $M = 88.99\% \pm 5.13\%$ , 95% CI = 87.17–90.81%) were significantly easier to identify than the intermediate ones ( $M = 71.57\% \pm 5.85\%$ , 95% CI = 69.56–73.57%), which were in turn significantly easier to recognize than the most ambiguous emotions ( $M = 45.41\% \pm 3.43\%$ , 95% CI = 44.27–46.55%) (all  $ps < .001$ ). Furthermore, there was a significant interaction between emotion and

ambiguity ( $F(5.93, 189.78) = 12.69, p < .001, \eta_p^2 = .28$ ). *Post hoc* tests revealed significant differences in accuracy between ambiguity levels for each emotion (all  $ps < .001$ ). These tests also revealed that at the lowest ambiguity, fear ( $M = 69.78\% \pm 19.69\%$ , 95% CI = 63.12–76.44%) was significantly more difficult to identify than all the other emotions (all  $ps < .001$  except for surprise where  $p = .001$ ), followed by surprise ( $M = 85.03\% \pm 10.92\%$ , 95% CI = 81.33–88.72%), which was significantly harder to recognize than anger ( $M = 95.63\% \pm 4.15\%$ , 95% CI = 94.20–97.05%), happiness ( $M = 97.51\% \pm 3.42\%$ , 95% CI = 96.37–98.65%), and sadness ( $M = 95.25\% \pm 5.69\%$ , 95% CI = 93.32–97.18%) (all  $ps < .001$ ). In contrast, these last three emotions were significantly easier to identify than the others (all  $ps < .001$  except for the comparison between sadness and disgust where  $p = .001$ ), with happiness being significantly easier to recognize than anger ( $p = .038$ ). No other comparison was significant ( $ps = .114-.894$ ). At the intermediate ambiguity level, fear ( $M = 48.51\% \pm 16.91\%$ , 95% CI = 42.87–54.15%) was still significantly more difficult to identify than all the other emotions (all  $ps < .001$ ), followed by surprise ( $M = 64.41\% \pm 16.23\%$ , 95% CI = 58.99–69.82%), which was significantly harder to recognize than disgust ( $M = 73.94\% \pm 12.63\%$ , 95% CI = 69.61–78.28%,  $p = .012$ ), happiness ( $M = 86.38\% \pm 10.52\%$ , 95% CI = 82.87–89.88%,  $p < .001$ ), and sadness ( $M = 87.00\% \pm 11.49\%$ , 95% CI = 83.11–90.89%,  $p < .001$ ). In addition, anger ( $M = 67.70\% \pm 13.76\%$ , 95% CI = 63.11–72.29%) was marginally more difficult to identify than disgust ( $p = .070$ ), and significantly harder to recognize than both happiness and sadness (all  $ps < .001$ ). In contrast, these last two emotions were significantly easier to identify than all the others (all  $ps < .001$  except for the comparisons with disgust where  $ps = .001$ ), with no significant difference between them ( $p = .635$ ). There was no other significant difference ( $p = .355$  for the comparison between anger and surprise). Finally, at the highest ambiguity, fear ( $M = 23.08\% \pm 11.10\%$ , 95% CI = 19.38–26.78%) was still significantly more difficult to recognize than all the other emotions (all  $ps < .001$  except for anger where  $p = .001$ ), followed by surprise ( $M = 36.57\% \pm 11.92\%$ , 95% CI = 32.59–40.54%), which was significantly harder to identify than disgust ( $M = 49.49\% \pm 15.60\%$ , 95% CI = 44.28–54.69%), happiness ( $M = 62.41\% \pm 17.23\%$ , 95% CI = 56.66–68.15%), and sadness ( $M = 63.19\% \pm 20.49\%$ , 95% CI = 56.36–70.02%) (all  $ps < .001$ ). Additionally, anger ( $M = 37.73\% \pm 12.85\%$ , 95% CI = 33.45–42.01%) was significantly more difficult to recognize than disgust, happiness, and sadness (all  $ps < .001$ ). In contrast, these last two emotions were significantly easier to identify than all the others (all  $ps < .001$  except for the comparisons between happiness and disgust where  $p = .049$  as well as sadness and disgust where  $p = .009$ ), with no significant difference between them ( $p = .473$ ). No other comparison was significant ( $p = .817$  for the comparison between anger and surprise) (see Figure 3.2).

Figure 3.2 Accuracy for each emotion at each ambiguity level. Individual data are shown on the left, whereas the mean and standard error of the mean (SEM) are shown on the right.

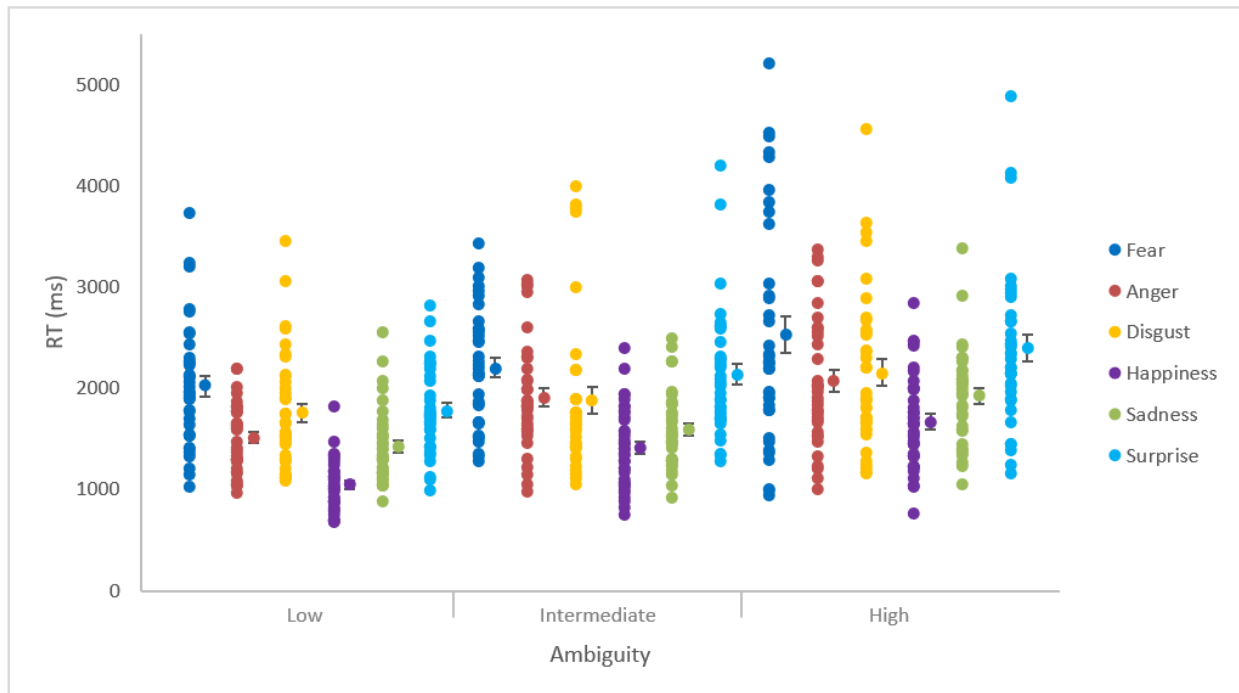


### 3.4.1.2 RT

Analysis of RTs revealed a significant main effect of emotion ( $F(5, 150) = 28.43, p < .001, \eta_p^2 = .49$ ). Pairwise comparisons indicated that RTs for fear ( $M = 2239.32 \text{ ms} \pm 614.80 \text{ ms}$ , 95% CI = 2031.30–2447.34 ms) and surprise ( $M = 2105.42 \text{ ms} \pm 550.07 \text{ ms}$ , 95% CI = 1919.31–2291.54 ms) were significantly longer than for all other emotions (all  $ps < .001$  except for the comparisons between surprise, anger, and disgust where  $ps = .005$  and  $.002$ , respectively), with no significant difference between them ( $p = .146$ ). In contrast, happiness ( $M = 1375.60 \text{ ms} \pm 339.21 \text{ ms}$ , 95% CI = 1260.83–1490.37 ms) and sadness ( $M = 1633.64 \text{ ms} \pm 353.69 \text{ ms}$ , 95% CI = 1512.14–1755.14 ms) were identified significantly faster than all the other emotions (all  $ps < .001$  except for the comparisons between sadness and anger where  $p = .028$  as well as sadness and disgust where  $p = .081$ ), with happiness being recognized significantly faster than sadness ( $p = .001$ ). There was no significant difference between anger ( $M = 1767.18 \text{ ms} \pm 400.27 \text{ ms}$ , 95% CI = 1625.25–1909.11 ms) and disgust ( $M = 1905.42 \text{ ms} \pm 643.42 \text{ ms}$ , 95% CI = 1684.40–2126.44 ms) ( $p = .529$ ). There was also a significant main effect of ambiguity ( $F(1.75, 52.40) = 82.46, p < .001, \eta_p^2 = .73$ ), indicating that RTs for the least ambiguous emotions ( $M = 1538.08 \text{ ms} \pm 272.09 \text{ ms}$ , 95% CI = 1441.60–1634.55 ms) were significantly faster than for the intermediate ones ( $M = 1761.75 \text{ ms} \pm 325.20 \text{ ms}$ , 95% CI = 1642.46–1881.03 ms), which were in turn significantly faster than for the most ambiguous emotions ( $M = 2027.69 \text{ ms} \pm$

420.31 ms, 95% CI = 1878.66–2176.73 ms) (all  $p$ s < .001). The interaction between emotion and ambiguity, however, was not significant ( $p = .235$ ) (see Figure 3.3 and Table 3.3 in Supplementary Materials).

Figure 3.3 RTs for each emotion at each ambiguity level. Individual data are shown on the left, whereas the mean and SEM are shown on the right.



### 3.4.2 Electrophysiological results

There was no significant effect of ambiguity at any of the 64 electrodes from 100 to 200 ms (all  $p$ s > .106). However, there was a significant effect of emotion at posterior sites from 118 to 134 ms as well as from 158 to 198 ms (see Figure 3.4 for FMUT main results and Table 3.1 for significant pairwise follow-up tests results). Pairwise follow-up tests revealed a significant difference between anger and disgust at Oz from 118 to 126 ms ( $p$ s = .027 and .012, respectively), with the amplitude for anger (118 ms:  $M = 2.86 \pm 3.04$  uV, 95% CI = 1.76–3.96 uV, 126 ms:  $M = 3.14 \pm 3.03$  uV, 95% CI = 2.05–4.24 uV) being significantly greater than that for disgust (118 ms:  $M = 1.95 \pm 3.12$  uV, 95% CI = 0.82–3.07 uV, 126 ms:  $M = 2.29 \pm 3.12$  uV, 95% CI = 1.16–3.42 uV) (see Figure 3.5A). Pairwise tests also revealed a significant difference between disgust and surprise at bilateral temporoparietal electrode sites at 126 ms ( $p$ s = .012-.042) that persisted at 134 ms at TP10 ( $p = .011$ ), indicating that the amplitude for disgust (at TP9 at 126 ms:  $M = 1.59 \pm 2.49$  uV, 95% CI = 0.70–2.49 uV, at TP10 at 126 ms:  $M = 1.68 \pm 2.66$  uV, 95% CI = 0.72–2.64 uV, and at TP10 at 134 ms:  $M = 0.39 \pm 2.88$  uV, 95% CI = -0.64–1.43 uV) was significantly larger than that for

surprise (at TP9 at 126 ms:  $M = 1.00 \pm 2.42$  uV, 95% CI = 0.13–1.87 uV, at TP10 at 126 ms:  $M = 1.06 \pm 2.72$  uV, 95% CI = 0.08–2.04 uV, and at TP10 at 134 ms:  $M = -0.11 \pm 2.82$  uV, 95% CI = -1.13–0.90 uV) (see Figure 3.5B).

Figure 3.4 Results of the omnibus ANOVA for the effect of emotion at all electrodes, from 100 to 200 ms. Smaller  $F$  values are represented by darker blues, while larger values are represented by lighter blues.

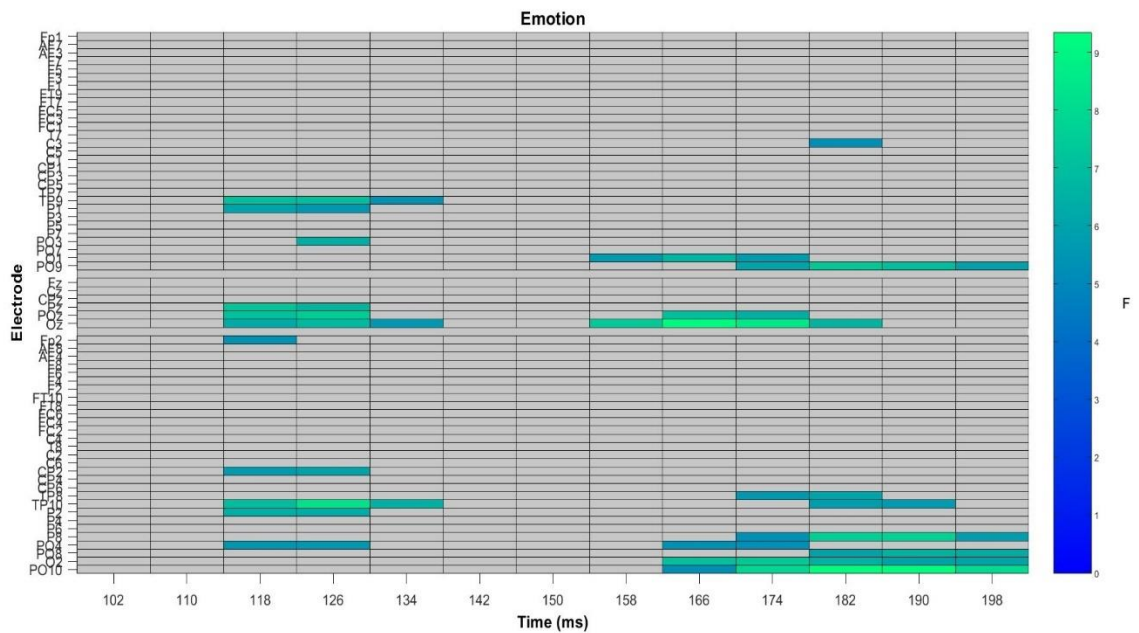


Tableau 3.1 Summary table of significant pairwise follow-up tests results ( $p < .05$ ), including the electrode sites, the time windows of significance, and the corresponding  $p$  values.

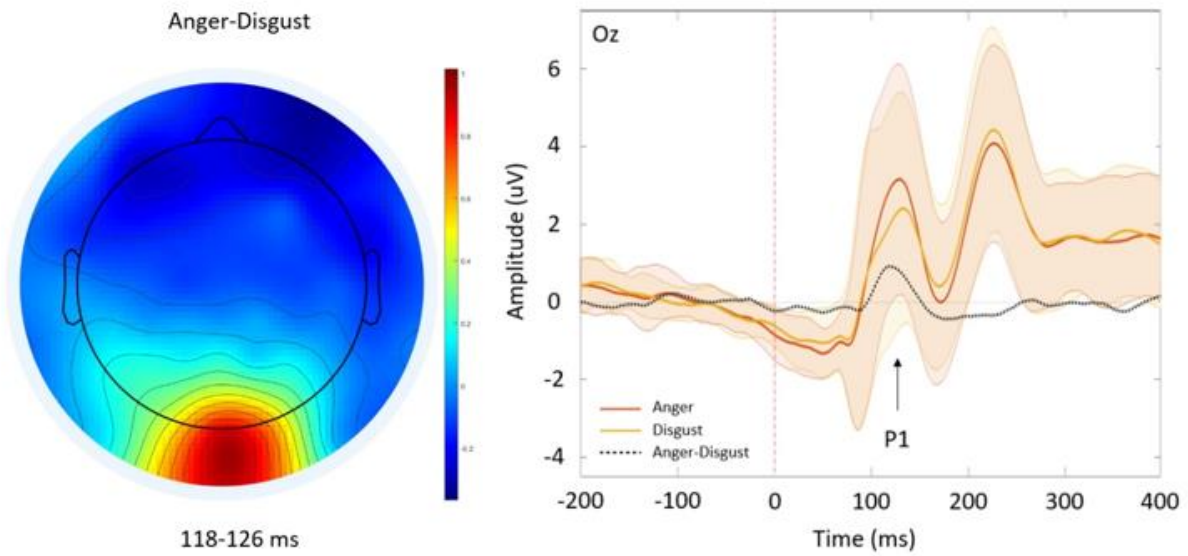
Comparison	Electrode(s)	Timing	$p$
Anger vs. disgust	Oz	118-126 ms	.012-.027
Anger vs. happiness	PO10	190 ms	.036
Anger vs. sadness	O2	182 ms	.047
	PO10	190 ms	.036
Anger vs. surprise	P8, PO10	182-198 ms	.006-.024
Disgust vs. surprise	Pz, P1, TP9	126 ms	.018-.042
	TP10	126-134 ms	.011-.012
Fear vs. surprise	PO10	190 ms	.036

Figure 3.5 A) On the left, topographic map of the difference wave between anger and disgust from 118 to 126 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for anger and disgust as well as the difference wave at Oz with SEM. B) On the left,

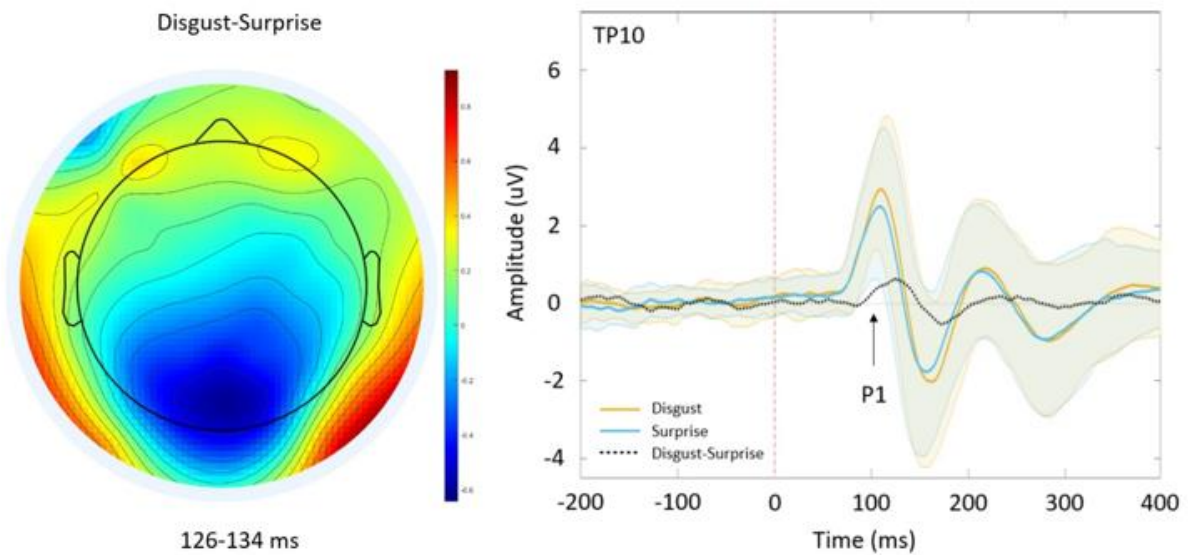


topographic map of the difference wave between disgust and surprise from 126 to 134 ms. On the right, ERPs for disgust and surprise as well as the difference wave at TP10 with SEM.

A)

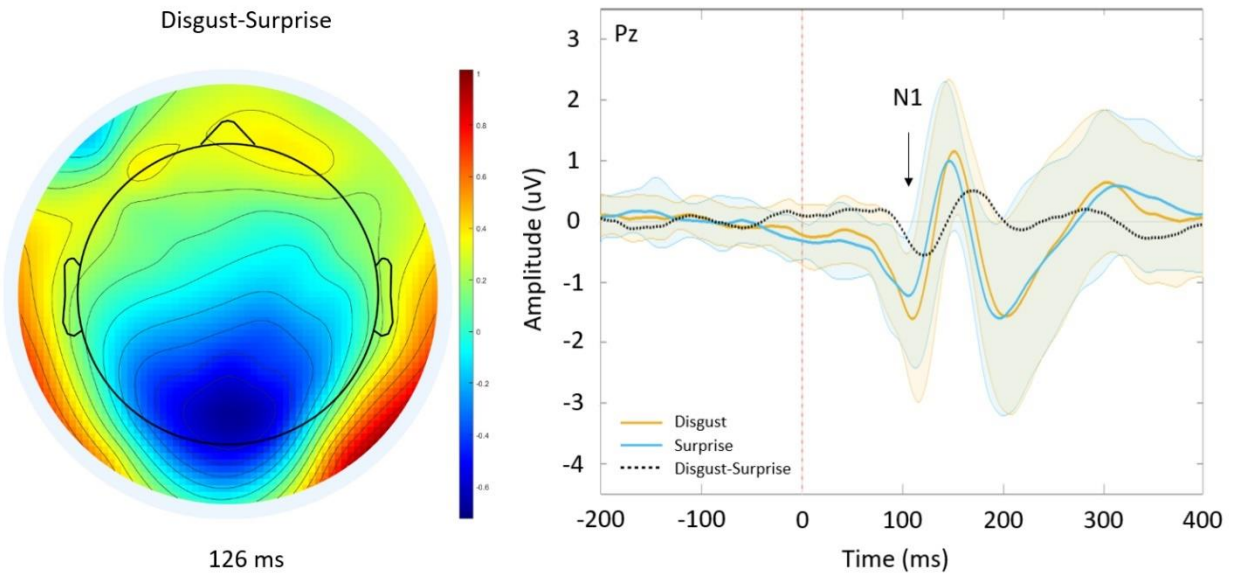


B)



In addition to these effects at electrode sites and time points corresponding to the P1, there were significant differences between disgust and surprise at midline and left parietal electrodes at 126 ms ( $p_s = .018$  and  $.042$ , respectively), corresponding to the posterior N1. More specifically, the amplitude of the N1 at this time point and these sites was significantly greater for disgust (Pz:  $M = -0.67 \pm 1.80$  uV, 95% CI =  $-1.31$ – $-0.02$  uV, P1:  $M = -0.41 \pm 1.56$  uV, 95% CI =  $-0.97$ – $-0.16$  uV) than for surprise (Pz:  $M = -0.13 \pm 1.72$  uV, 95% CI =  $-0.75$ – $-0.49$  uV, P1:  $M = 0.03 \pm 1.56$  uV, 95% CI =  $-0.53$ – $-0.60$  uV) (see Figure 3.6).

Figure 3.6 On the left, topographic map of the difference wave between disgust and surprise at 126 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for disgust and surprise as well as the difference wave at Pz with SEM.

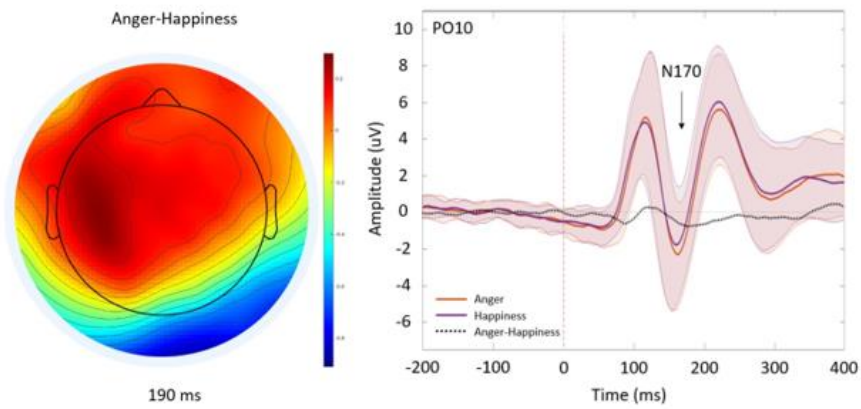


In the second cluster of electrode sites and time points (158 to 198 ms) corresponding to the N170, pairwise follow-up tests revealed significant differences in the amplitude in response to anger compared to happiness, sadness, and surprise at right occipital, parietal, and parieto-occipital electrodes from 182 to 198 ms ( $p = .006-.047$ ), with the greatest effect being between anger and surprise at PO10 at 190 ms (anger:  $M = 1.99 \pm 2.89$  uV, 95% CI = 0.95–3.03 uV, surprise:  $M = 2.78 \pm 3.04$  uV, 95% CI = 1.68–3.87 uV,  $p = .006$ ) (see Figure 3.7A-C). Pairwise tests also revealed a significant difference between fear and surprise at PO10 at 190 ms ( $p = .036$ , fear:  $M = 2.12 \pm 3.09$  uV, 95% CI = 1.00–3.23 uV, surprise:  $M = 2.78 \pm 3.04$  uV, 95% CI = 1.68–3.87 uV).

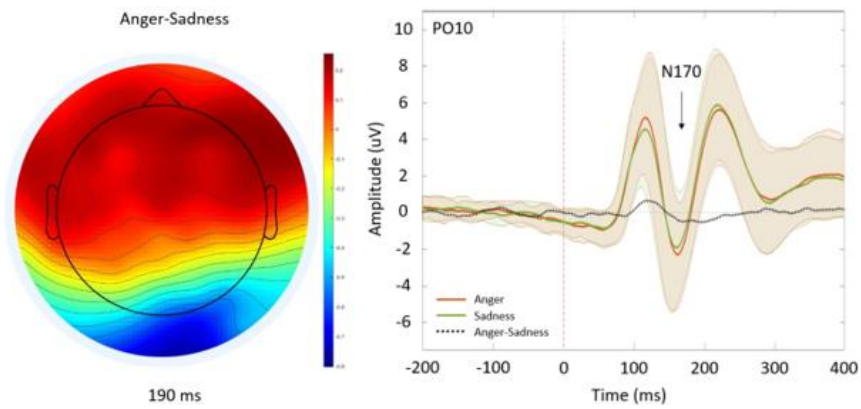
Figure 3.7 A) On the left, topographic map of the difference wave between anger and happiness at 190 ms. Warmer colors represent higher, more positive amplitude values, while cooler colors represent lower, more negative values. On the right, ERPs for anger and happiness as well as the difference wave at PO10 with SEM. B) On the left, topographic map of the difference wave between anger and sadness at 190 ms. On the right, ERPs for anger and sadness as well as the difference wave at PO10 with SEM. C) On the left, topographic map of the difference wave between anger and

surprise from 182 to 198 ms. On the right, ERPs for anger and surprise as well as the difference wave at PO10 with SEM.

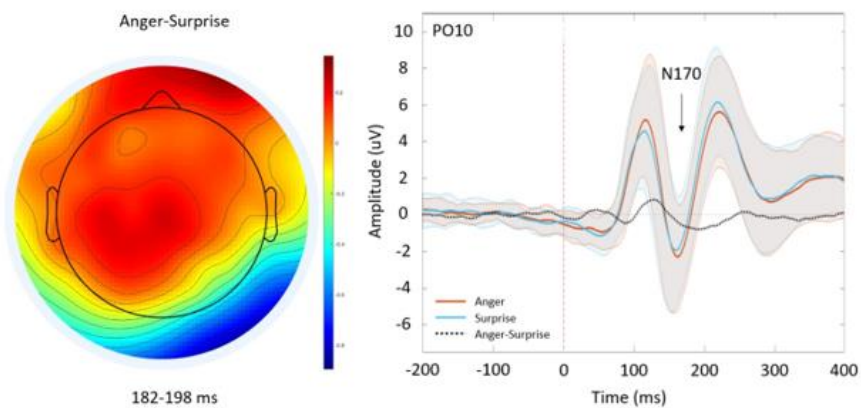
A)



B)

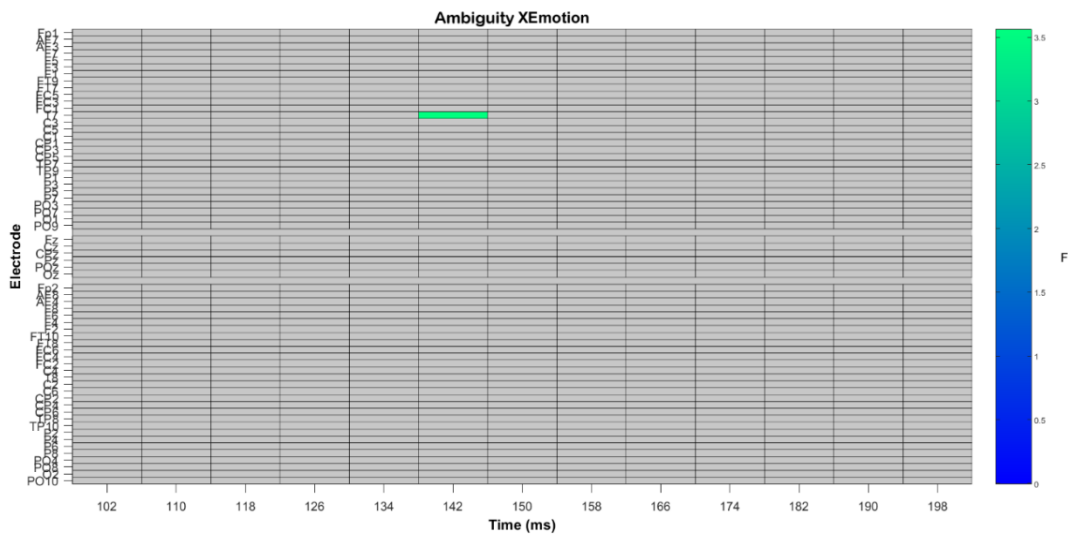


C)



Finally, there was a trend for an interaction between ambiguity and emotion at T7 at 142 ms ( $F = 3.56$ ,  $p = .050$ ) (see Figure 3.8), but as expected, follow-up tests failed to reveal any significant differences or trends (all  $ps > .05$ ).

Figure 3.8 Results of the omnibus ANOVA for the interaction between ambiguity and emotion at all electrodes, from 100 to 200 ms. Smaller  $F$  values are represented by darker blues, while larger values are represented by lighter blues.



### 3.4.3 Correlational analyses

There were significant negative correlations between the accuracy for anger and the amplitude for the latter emotion at PO10 from 182 ms ( $r = -0.42$ ,  $p = .020$ ) to 190 ms ( $r = -0.40$ ,  $p = .030$ ). There was also a trend towards significance for a negative correlation at 198 ms ( $r = -0.36$ ,  $p = .051$ ). However, after correction for multiple comparisons, none of these correlations remained significant. No other correlation was significant (all  $ps > .05$ ) (see Table 3.4 in Supplementary Materials).

### 3.5 Discussion

The current study is one of the few to systematically investigate the effects of the six basic emotions and emotional ambiguity on the behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task in healthy participants. As expected, the behavioral results revealed significant effect of emotion on accuracy and RTs, with fear and surprise being the hardest emotions to identify, whereas sadness and happiness were the easiest to recognize. The results also revealed significant effect of emotional ambiguity for these two behavioral measures, which indicated that emotion recognition became more accurate and faster with decreasing ambiguity. Finally, an interaction between emotion and emotional

ambiguity was observed for accuracy, indicating that the recognition of emotions varied with ambiguity: at the highest and intermediate ambiguity levels, fear and surprise were the most difficult emotions to identify, followed by anger, disgust, happiness, and sadness. At the lowest ambiguity, fear and surprise were still the hardest emotions to recognize, but these were followed by disgust, sadness, anger, and happiness. In parallel, the electrophysiological results revealed that the P1, N1, and N170 were all significantly affected by emotion, with greater amplitudes for some emotional facial expressions than for others. However, there was no significant emotional ambiguity effect, nor interaction between emotion and ambiguity for any of these components.

Interestingly, we found that early sensory ERPs such as the P1, N1, and N170 were all influenced by emotion, albeit differently. Regarding the P1, we showed that its amplitude was greater for anger and fear than disgust at midline occipital and parieto-occipital electrode sites. We also showed that it was larger for anger and disgust than surprise at temporo-parietal electrodes. Similar to the P1, the amplitude of the N1 was greater for disgust than surprise at parietal sites. These results are partially consistent with those of several studies which have found enhanced responses of the P1 and N1 to angry, disgusted, and fearful expressions than to happy and/or neutral faces (Aguado *et al.*, 2012; Holmes *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2010; Proverbio *et al.*, 2006; Rellecke *et al.*, 2012; Smith, E. *et al.*, 2013; Zhang, D. *et al.*, 2013). The emotional modulation of the P1 and N1 has been interpreted as a negativity bias in the allocation of attentional resources to stimuli in the extrastriate cortex, with more attention resources dedicated to negative than to positive and neutral stimuli (Carretié *et al.*, 2006; Carretié *et al.*, 2004; Delplanque *et al.*, 2004; Olofsson *et al.*, 2008; Smith, N. K. *et al.*, 2003). In addition to this negativity bias for angry and disgusted facial expressions, our results extend those of past research by showing differences among negative emotions, with larger P1 amplitudes to angry and fearful than disgusted expressions. However, we did not find any difference between fear or other negative emotions and happiness for P1 or N1, contrary to what has been previously reported (Aguado *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2010; Pourtois *et al.*, 2004; Pourtois *et al.*, 2005; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006). The differences between our results and those of previous studies could be explained by the stimuli used: we included the six basic emotions, which allowed us to compare them with each other, whereas these studies generally used only one negative emotion (anger or fear) which was compared to happy and/or neutral faces. Furthermore, we used stimuli morphing two emotional facial expressions in different proportions (ranging from 26% to 74%) rather than one emotion expressed at full intensity (100%). It is therefore possible that our stimuli, which were more ambiguous, caused certain emotions to not be completely discriminated in the brain, at least in the early stages of emotional processing, causing their electrophysiological responses to be similar. Future research using the full continuum of morphs, ranging from 0% to 100%, could help confirm this hypothesis.

As for the N170, we found that it was also affected by emotion, with amplitude differences for anger compared to happiness, sadness, and surprise at right occipital, parietal, and parieto-occipital electrode sites. There were also differences between fear and surprise at parieto-occipital sites. These results are partially in agreement with past research showing enhanced N170 responses to angry, disgusted, and fearful facial expressions than to happy and/or neutral expressions (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Blau *et al.*, 2007; Rellecke *et al.*, 2011; Roberge *et al.*, 2019; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017), and more recent research also suggesting increased responses to happy than to neutral faces (Hinojosa *et al.*, 2015; Kolassa *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2010; Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006). Moreover, the emotional effect on the N170 in our study was observed in the right hemisphere, as previously reported (Itier et Taylor, 2002, 2004a; Joyce et Rossion, 2005; Krombholz *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2010; Pourtois *et al.*, 2004; Rossion et Jacques, 2012). However, it was observed at around 190 ms, which is slightly later than what has been reported (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012) and could be related to the different statistical methods used. Indeed, most studies used classical statistical analyses of ERPs, which consist of averaging the amplitude across a time window, while we used mass univariate statistics, which allowed us to test amplitude differences at several individual time points (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011). In a recent study using this statistical method, Durston, A. J. et Itier (2021) also found an emotional modulation of the N170 with maximal effects after its peak, at around 190 ms.

In contrast to the emotional effect on the P1, N1, and N170, we found no significant effect of emotional ambiguity, nor interaction with emotion for any of these ERP components, unlike previously reported (Kaminska *et al.*, 2020). In the only EEG study that examined the effect of emotional ambiguity on early sensory ERPs, Kaminska *et al.* (2020) found that the frontal midline N1 was affected by ambiguity, with more negative amplitudes to “pure” (100%) than ambiguous (50/50%) emotional facial expressions. They postulated that the N1 could reflect the same cognitive process as the P1, the two components representing the two ends of the same dipole. Thus, the more negative amplitudes of the N1 for pure facial expressions could suggest more positive P1 amplitudes for the same expressions. The authors then interpreted the N1/P1 ambiguity effect as reflecting a match of basic, low-level visual features, with pure expressions offering a better template match than ambiguous expressions. However, the emotional facial expressions used in the latter study were presented at higher intensities (up to 100%) than in the present study (maximum of 74%), so it is possible that our stimuli were not sufficiently intense or unambiguous to modulate the early sensory ERPs such as the P1 and N1. Similarly to our study, the N170 in the study of Kaminska *et al.* (2020) was not influenced by emotional ambiguity. It is thus possible that this component reflects the perception of faces, regardless of the ambiguity of their emotional expressions.

As for the behavioral responses, our results are concordant with those of several studies which have shown that the recognition of negative emotions such as anger, disgust, and fear is more difficult than that of positive emotions such as happiness (Eimer *et al.*, 2003; Humphreys *et al.*, 2007; Kerestes *et al.*, 2009; Kolassa *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2010; Recio *et al.*, 2014; Utama *et al.*, 2009). Two main explanations have been proposed to account for this emotional valence effect. First, there are fewer positive than negative emotions, which may make it more difficult to distinguish negative emotions from each other than positive emotions (Adolphs *et al.*, 1996). Adolphs *et al.* (1996) even suggested that happiness is the only positive emotion among basic emotions and therefore, identifying it is easier than recognizing negative emotions. Second, happiness is the only emotion to be expressed by a smile, whereas negative emotions share many facial features such as a frown, furrowed brows, and widened jaws, which may make them harder to distinguish (Adolphs *et al.*, 1996; Recio *et al.*, 2014; Smith, M. L. *et al.*, 2005).

While several studies have examined the effect of emotion on behavioral responses, fewer have investigated the influence of emotional ambiguity and its interaction with emotion on these responses (Calder, Young, Perrett, *et al.*, 1996; de Gelder *et al.*, 1997; Etcoff et Magee, 1992; Kaminska *et al.*, 2020; Young *et al.*, 1997). These studies have generally found that emotion recognition improved (in terms of correct responses and/or RTs) with decreasing ambiguity, as in the current study (Calder, Young, Perrett, *et al.*, 1996; de Gelder *et al.*, 1997; Etcoff et Magee, 1992; Kaminska *et al.*, 2020; Young *et al.*, 1997). However, they did not look at the possible interaction between emotion and emotional ambiguity on the behavioral responses. Our results extend those of past research by showing that although the accuracy for fear and surprise was lowest regardless of ambiguity, the accuracy for other emotions varied with ambiguity levels: at higher ambiguities (50% and 62%), fear and surprise were the most difficult emotions to identify, followed by anger, disgust, happiness, and sadness. At the lowest ambiguity (74%), fear and surprise were still the hardest emotions to recognize, but these were followed by disgust, sadness, anger, and happiness. Thus, it seems that some emotions are more affected by ambiguity, possibly due to certain combinations of emotions being more easily confused with each other than other combinations (e.g. fear is more easily confused with surprise than with happiness due to their common facial features). Although it would have been interesting to analyze all combinations of emotions separately, we grouped all combinations of a single emotion together for the sake of simplicity, but also because of the insufficient number of trials for ERP analyses. Taken together, our results are partially in accordance with those of Recio *et al.* (2014) who showed that the recognition of fear was lowest at all intensities (their stimuli combined a neutral with an emotional facial expression), whereas that of anger and sadness varied among them with intensity, with anger being less well identified than sadness at the lowest intensity (60%) but better recognized at higher intensities (80% and 100%). However, unlike these authors, we found that the accuracy for surprise was among the lowest at all

ambiguity levels and that the recognition of disgust and happiness varied with ambiguity. We also failed to find a significant interaction between emotion and emotional ambiguity for RTs, unlike other studies (Kaminska *et al.*, 2020; Kolassa *et al.*, 2009; Müller-Bardorff *et al.*, 2016). Again, the differences between our results and those of these studies could be explained by the methodology used such as the task (whether it emphasized accuracy, RTs, or both), the stimuli (whether the morphs were a combination of a neutral and an emotional facial expression or of two emotional expressions, how many emotions and intensities/ambiguities were included and which ones), and the measures (number of correct responses/errors and/or RTs).

There are several methodological limitations to this study. First of all, our stimuli did not include neutral facial expressions, which would have allowed us to create difference waves between emotional and neutral expressions to better isolate ERP components associated with emotional processing (and not visual or face processing in general). Similarly, although our stimuli are faces and the topography and timing of the N170 are consistent with those previously reported (Durstun, A. J. et Itier, 2021; Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012), the fact that we did not use non-face stimuli such as cars or houses limits our interpretation of the results for the N170. Additionally, we used the emotional facial expressions of a single man to avoid identity effects and differences in emotional expressiveness between the sexes, but this limits the generalization of our results to other identities and sexes. Finally, it would have been interesting to include single, full intensity (100%) emotional facial expressions to examine the effect of each emotion (without contamination by the others), but also to better compare our results with those of previous studies.

In summary, the present study found that behavioral responses were affected by emotion, with fear and surprise being the hardest emotions to identify, whereas sadness and happiness were the easiest to recognize. Behavioral responses were also affected by emotional ambiguity, with emotion recognition becoming more accurate and faster with decreasing ambiguity. Finally, an interaction between emotion and ambiguity was observed for accuracy, indicating that fear and surprise were the most difficult emotions to identify regardless of ambiguity, which could be explained by their shared facial features, whereas ambiguity differently affected the recognition of the other emotions. As for the electrophysiological responses, this study showed that the P1, N1, and N170 were all significantly affected by emotion, with greater amplitudes for some emotional facial expressions than for others. However, they were not influenced by emotional ambiguity, nor by an emotion and ambiguity interaction. Taken together, these findings suggest that the computation of emotional facial expressions (regardless of their ambiguity) occurs from the early stages of brain processing. Since the current study has shown that this morphed emotion recognition task can reveal effects of emotion and/or emotional ambiguity on both behavioral and electrophysiological responses, future



research could use it to help understand the neural mechanisms underlying sex-related differences in emotion perception, with women being generally better and faster than men at recognizing emotional facial expressions (Campbell *et al.*, 2002; Hall et Matsumoto, 2004; Hampson *et al.*, 2006; Montagne *et al.*, 2005; Rahman *et al.*, 2004; Thayer et Johnsen, 2000). It could also be helpful in revealing subtle changes in emotional processing in clinical populations that have more diffuse, widespread disturbances such as those found in concussed athletes, who have been shown to recruit compensatory neural networks to achieve normal performance on cognitive tasks (Ledwidge et Molfese, 2016; McAllister *et al.*, 2001; McDonald, B. C. *et al.*, 2012; Molfese, 2015).

### 3.6 Author note

The authors declare no conflict of interest. This work was supported by a doctoral training award from the Fonds de recherche du Québec – Santé to Edith Léveillé and the Caroline Durand Research Chair on Acute Traumatology of the University of Montreal awarded to Louis De Beaumont. Preliminary results were presented at local scientific meetings as well as the 2019 Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping in Rome, Italy. The authors would like to thank all the participants for their participation in the study and Hugues Leduc for his sound advice on statistical analyses.

### 3.7 Appendices

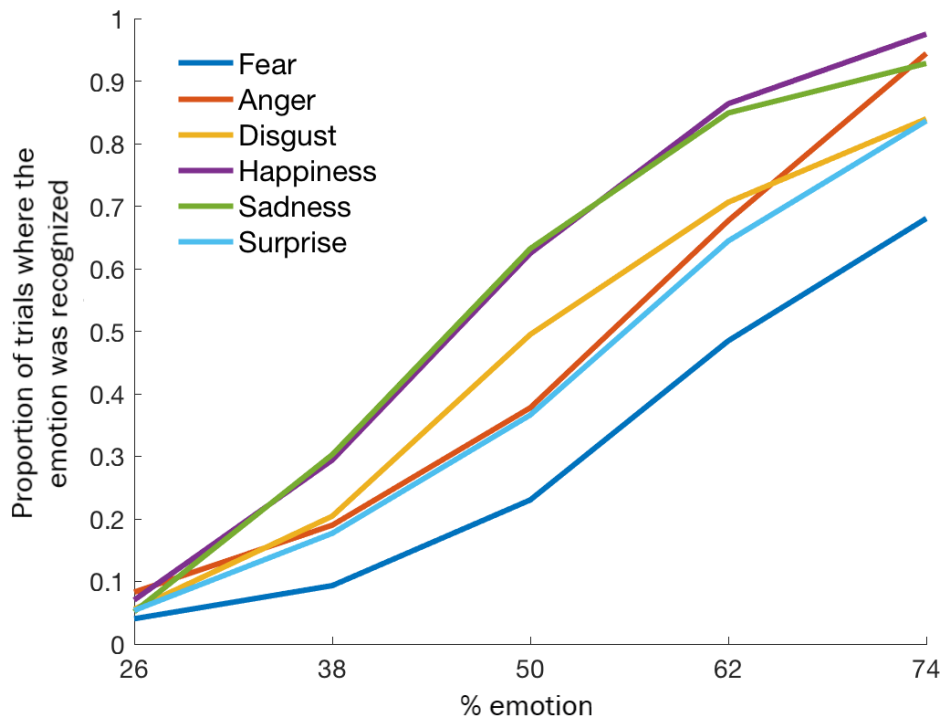
#### 3.7.1 Appendix 1. Recognition threshold analysis and results.

This appendix presents the methods used to calculate and analyze the third behavioral measure, recognition threshold. It also presents the results for this measure.

The following procedure was used to compute the recognition threshold at which each emotion was detected on at least 50% of trials in which it was presented. First, all the blend continuums containing the emotion under analysis were pooled together. The proportion of trials in which the emotional facial expression was detected was then calculated for each percentage of that expression, from 26% to 74%, and a sigmoid curve was fitted on the proportions of detection across percentages. The recognition threshold was obtained using the sigmoid parameters that best fitted the results. A repeated measures ANOVA was then performed on this measure with emotion as a within-subjects factor. All follow-up pairwise comparisons were corrected with the Benjamini-Hochberg adjustment (Benjamini et Hochberg, 1995). *P* values less than .05 were considered statistically significant unless otherwise specified.

Analysis of recognition threshold revealed a significant main effect of emotion ( $F(5, 165) = 36.09, p < .001, \eta_p^2 = .52$ ). Pairwise comparisons indicated that the threshold for fear ( $M = 65.12\% \pm 9.84\%$ , 95% CI = 61.88–68.48%) was significantly higher than for all the other emotions (all  $ps < .001$ ), meaning that it was detected when it was displayed at a higher percentage than the other emotions. In contrast, the thresholds for happiness ( $M = 45.56\% \pm 6.48\%$ , 95% CI = 43.40–47.72%) and sadness ( $M = 45.44\% \pm 6.72\%$ , 95% CI = 43.16–47.72%) were significantly lower than for all the other emotions (all  $ps < .001$  except for the comparisons with disgust where  $ps = .006$  and  $.003$ , respectively), with no significant difference between them ( $p = .768$ ). Moreover, the threshold for disgust ( $M = 51.08\% \pm 5.64\%$ , 95% CI = 49.16–53.12%) was significantly lower than for anger ( $M = 53.96\% \pm 4.44\%$ , 95% CI = 52.40–55.40%,  $p = .014$ ) and surprise ( $M = 55.64\% \pm 5.76\%$ , 95% CI = 53.72–57.68%,  $p = .003$ ), meaning that it was detected when it was presented at a lower percentage than these two emotions. There was no significant difference between these last two emotions ( $p = .211$ ) (see Figure 3.9).

Figure 3.9 Proportion of trials where the emotional facial expression was detected for each percentage of that expression, from 26% to 74%.



### 3.7.2 Appendix 2. Number of trials for ERP analysis per condition.

Tableau 3.2 Number of trials for ERP analysis for each emotion at each ambiguity level (M ± SD).

Ambiguity level	Emotion	Nb. of trials
Low	Fear	51.66 ± 15.25
	Anger	70.88 ± 5.41
	Disgust	65.13 ± 11.78
	Happiness	73.34 ± 2.97
	Sadness	69.66 ± 12.66
	Surprise	62.38 ± 10.73
Intermediate	Fear	37.41 ± 12.59
	Anger	49.97 ± 10.42
	Disgust	54.78 ± 12.93
	Happiness	64.47 ± 7.88
	Sadness	63.22 ± 13.24
	Surprise	47.88 ± 12.34
High	Fear	65.69 ± 5.94
	Anger	69.66 ± 5.31
	Disgust	68.41 ± 8.08
	Happiness	70.56 ± 3.99
	Sadness	69.16 ± 7.98
	Surprise	67.16 ± 8.81

### 3.8 Supplementary Materials

Tableau 3.3 RTs (in ms) for each emotion at each ambiguity level (M  $\pm$  SD).

Ambiguity	Fear	Anger	Disgust	Happiness	Sadness	Surprise
Low	2022.92 $\pm$ 611.53	1513.20 $\pm$ 336.29	1756.25 $\pm$ 570.39	1047.26 $\pm$ 251.61	1425.34 $\pm$ 371.43	1781.99 $\pm$ 427.71
Intermediate	2203.35 $\pm$ 583.07	1910.67 $\pm$ 542.77	1885.79 $\pm$ 794.70	1414.16 $\pm$ 397.81	1594.91 $\pm$ 379.88	2138.48 $\pm$ 628.46
High	2531.15 $\pm$ 1123.32	2074.84 $\pm$ 641.71	2156.49 $\pm$ 788.74	1667.67 $\pm$ 465.25	1927.61 $\pm$ 478.53	2395.81 $\pm$ 789.27

Tableau 3.4 Correlations between significant electrodes and time points with corresponding accuracy scores (*r* and *p* values).

Time point	Electrode	Emotion	Fear		Anger		Disgust		Happiness		Sadness		Surprise	
			<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
118 ms	Oz	Anger			0.13	0.494								
		Disgust					-0.20	0.269						
	Oz	Anger			0.09	0.639								
		Disgust					-0.25	0.179						
126 ms	P1	Disgust					0.13	0.481						
		Surprise										-0.01	0.967	
	Pz	Disgust					0.12	0.511						
		Surprise											0.02	0.913
	TP9	Disgust					-0.25	0.167						
		Surprise											0.11	0.562
134 ms	TP10	Disgust					-0.15	0.422						
		Surprise											0.01	0.960
	Oz	Anger			-0.01	0.963								
		Disgust					-0.25	0.183						
174 ms	O2	Disgust					-0.17	0.363						
		Surprise											-0.04	0.833
182 ms	O2	Anger			-0.21	0.267								
		Sadness									-0.20	0.271		
	O2	Anger			-0.23	0.229								
		Sadness									-0.16	0.400		
190 ms	P8	Anger			-0.15	0.425								
		Surprise			-0.11	0.545							0.04	0.829
	PO10	Anger			-0.42	0.020								
		Happiness							0.20	0.279				
190 ms	O2	Anger			-0.24	0.196								
		Sadness									-0.11	0.573		
	P8	Anger			-0.20	0.278								
		Surprise											0.09	0.623
	PO10	Fear	0.31	0.088										

198 ms	P8	Anger	-0.40	0.030				
		Happiness			0.23	0.201		
		Sadness					-0.08	0.660
		Surprise						-0.20 0.276
	PO10	Anger	-0.22	0.246				
		Surprise						0.10 0.589
		Anger	-0.36	0.051				
		Happiness			0.25	0.169		

## CHAPITRE 4

### ARTICLE 3

#### Sex-Related Differences in Early Visual Processing of Emotional Facial Expressions in Multi-Concussed Athletes<sup>3</sup>

Edith Léveillé<sup>1, 2</sup>, Martine Desjardins<sup>1, 2</sup>, Gaëlle Dumel<sup>1, 2</sup>, Caroline Blais<sup>3</sup>, Dave Saint-Amour<sup>1, 4</sup>, Peter Scherzer<sup>1</sup>, & Louis De Beaumont<sup>2, 5</sup>

<sup>1</sup> Département de psychologie, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup> Centre de recherche, Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>3</sup> Département de psychoéducation et de psychologie, Université du Québec en Outaouais, Gatineau, Québec, Canada

<sup>4</sup> Centre de recherche, Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine, Montréal, Québec, Canada

<sup>5</sup> Département de chirurgie, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

---

<sup>3</sup> Article soumis au *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* en 2023. Référence complète : Léveillé, E., Desjardins, M., Dumel, G., Blais, C., Saint-Amour, D., Scherzer, P., & De Beaumont, L. (soumis). Sex-Related Differences in Early Visual Processing of Emotional Facial Expressions in Multi-Concussed Athletes. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*.

#### 4.1 Abstract

**Objective:** Recent research has revealed sex-related differences in emotion recognition in multi-concussed athletes, with males having difficulties identifying negative emotions. However, the neural correlates of these difficulties in male concussed athletes as well as the biological substrates of sex differences in emotion recognition in concussed athletes are poorly understood. The objective of this study was therefore to investigate sex-related differences in behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task in multi-concussed athletes as well as to explore the associations between these responses and sex hormones. **Methods:** We tested 37 control athletes (19 males) and 35 asymptomatic, multi-concussed athletes (18 males) more than three months since their last concussion. Participants completed psychological questionnaires, neuropsychological tests, and face perception control tasks. They also completed a morphed emotion recognition task while electroencephalography (EEG) was recorded. Photographs of a male face expressing the six basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) morphed with another emotion in different proportions (ranging from 26 to 74%, in 12% increments) were randomly presented. After each face presentation, participants were asked to identify the facial emotion. They were also asked to provide saliva samples to measure sex hormone concentrations. **Results:** There was no significant effect of group, nor interaction with sex for any of the behavioral measures. In contrast, there was a significant sex by group interaction for the amplitude of the P1, with male concussed athletes having a significantly smaller P1 than male controls. There was also a significant group effect for the N170 amplitude, with concussed athletes having a significantly larger N170 than controls. However, there was no significant correlation between behavioral or electrophysiological responses and sex hormone levels in male and female concussed or control athletes after correction for multiple comparisons. **Conclusions:** Our findings suggest cumulative and long-term effects of concussions on early visual processing of emotional facial expressions. They also suggest sex-related differences in brain processing of emotions in multi-concussed athletes, but these do not seem to be related to sex hormones on the day of testing.

**Keywords:** emotion, event-related potential (ERP), P1, N170, concussion, gender differences



## 4.2 Introduction

Sports-related concussion is defined as a traumatic brain injury (TBI) induced by biomechanical forces applied directly or indirectly (e.g. neck) to the head (McCroory *et al.*, 2017). It can result in somatic (e.g. headache, dizziness, nausea, vomiting), cognitive (e.g. attention and memory difficulties, slowed information processing), and/or emotional symptoms (e.g. emotional lability, nervousness, sadness), physical signs (e.g. amnesia, loss of consciousness), balance impairment (e.g. gait unsteadiness), behavioral changes (e.g. irritability), and/or sleep/wake disturbances (e.g. somnolence) (Harmon *et al.*, 2013; McCroory *et al.*, 2017; Radhakrishnan *et al.*, 2016).

Although these symptoms usually resolve within seven to 10 days, the cumulative and long-term effects of multiple concussions are now well known (De Beaumont, Beauchemin, *et al.*, 2013; De Beaumont, Brisson, *et al.*, 2007; De Beaumont, Henry, *et al.*, 2012; Manley *et al.*, 2017; McAllister et McCrea, 2017; Theriault *et al.*, 2009; Theriault *et al.*, 2011). Athletes with a history of concussion have a greater risk of sustaining another concussion than those without a history (Colvin *et al.*, 2009; Delaney *et al.*, 2002; Guskiewicz *et al.*, 2003; Guskiewicz *et al.*, 2000; Putukian *et al.*, 2021; Schulz *et al.*, 2004). These athletes also report more symptoms and take longer to recover (Bruce et Echemendia, 2004; Cancelliere *et al.*, 2014; Colvin *et al.*, 2009; Guskiewicz *et al.*, 2003; Iverson *et al.*, 2004; Schatz *et al.*, 2011; Slobounov *et al.*, 2007). Furthermore, they have a higher risk of experiencing persistent post-concussion symptoms, including anxiety and depression (Decq *et al.*, 2016; Didehbani *et al.*, 2013; Esopenko *et al.*, 2017; Guskiewicz, Marshall, *et al.*, 2007; Hutchison *et al.*, 2018; Kerr *et al.*, 2018; Rice *et al.*, 2018; Roberts *et al.*, 2019). They also present with chronic cognitive and motor impairments, decades after their last concussion (Broglia *et al.*, 2012; De Beaumont, Henry, *et al.*, 2012; De Beaumont *et al.*, 2009; De Beaumont, Tremblay, *et al.*, 2013; Guskiewicz *et al.*, 2005; Martini et Broglia, 2018).

In the last few years, sex-related differences in the incidence and recovery from a concussion have been revealed (Covassin *et al.*, 2018; Dick, 2009; Koerte *et al.*, 2020; Kutcher et Eckner, 2010; Merritt *et al.*, 2019; Niemeier, 2019; Resch *et al.*, 2017). In sports played by both sexes, female athletes sustain more concussions than their male counterparts (Black *et al.*, 2017; Chandran *et al.*, 2017; Covassin *et al.*, 2016; Davis-Hayes *et al.*, 2017; Foss *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2018; Schallmo *et al.*, 2017). They also report more symptoms of greater severity and a longer recovery than males (Baker *et al.*, 2016; Benedict *et al.*, 2015; Chand *et al.*, 2020; D'Lauro *et al.*, 2018; Iverson *et al.*, 2017; Kostyun et Hafeez, 2015; Stone *et al.*, 2017). In addition to subjective symptoms, they perform worse on objective neurocognitive testing following a concussion (Broshek *et al.*, 2005; Colvin *et al.*, 2009; Covassin, Elbin, Bleecker, *et al.*, 2013; ElleMBERG *et al.*, 2007; Sandel *et al.*, 2017; Sicard *et al.*, 2018; Tanveer *et al.*, 2017).

Sex hormones, especially estrogen and progesterone, have been proposed as one of the mechanisms that may explain these sex differences in sports concussions (Bramlett et Dietrich, 2001; Dick, 2009; Djebaili *et al.*, 2005; Emerson *et al.*, 1993; Roof *et al.*, 1994; Roof *et al.*, 1993; Roof et Hall, 2000a, 2000b; Webster *et al.*, 2015). Indeed, several studies have suggested that differences in sex hormones at the time of trauma could underlie the worse outcome after a concussion or a mild traumatic brain injury (mTBI) in women (Bazarian *et al.*, 2010; Dick, 2009; Farace et Alves, 2000; Gallagher *et al.*, 2018; Gupte *et al.*, 2019; Merritt *et al.*, 2019; Reddy et Collins, 2009). One study, in particular, found that women who suffered a mTBI during the luteal phase of their menstrual cycle, which is characterized by peaking progesterone levels, have a poorer outcome and lower quality of life than those injured during the follicular phase or those taking oral contraceptives (Wunderle *et al.*, 2014). This has been attributed to the “withdrawal hypothesis” that a sudden drop of progesterone (which is neuroprotective) in luteal-phase women causes them to experience worse outcomes than men or follicular-phase women, who have low progesterone levels, or those taking synthetic progestins as birth control, who consistently have high progesterone levels (Wunderle *et al.*, 2014). In support of this hypothesis, it has recently been shown that concussions can affect subcortical structures such as the hypothalamus and pituitary gland and thus result in hormonal disturbances such as amenorrhea in women (Bigler, 2018; Colantonio *et al.*, 2010; Cytowic *et al.*, 1986; Ripley *et al.*, 2008; Snook *et al.*, 2017).

In parallel, several studies have shown that TBI patients are impaired at recognizing emotions (Binder *et al.*, 2019; Genova *et al.*, 2015; Mancuso *et al.*, 2015; McDonald, S. *et al.*, 2018; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2017; Rigon *et al.*, 2018), especially negative emotions such as anger, fear, disgust, and sadness (Binder *et al.*, 2019; Drapeau, J. *et al.*, 2017; Mancuso *et al.*, 2015; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2018; Spikman *et al.*, 2013; Zupan *et al.*, 2014). However, the majority of these studies focused on moderate to severe TBI and the few that included patients with mTBI pooled them with other TBI patients of greater severity, which precludes examining whether these milder injuries are also associated with emotion recognition impairments (Borgaro *et al.*, 2004; Ietswaart *et al.*, 2008; Milders *et al.*, 2006; Milders *et al.*, 2008).

Furthermore, most of the aforementioned studies focused on males and very few investigated sex-related differences in emotion recognition deficits after TBI (Rigon *et al.*, 2016; Turkstra *et al.*, 2020; Zupan *et al.*, 2017), although sex differences in emotion recognition are well known, with women being more accurate and faster than men at recognizing emotions (Hall et Matsumoto, 2004; Hampson *et al.*, 2006; Montagne *et al.*, 2005; Petrovic *et al.*, 2019; Saylik *et al.*, 2018; Thompson et Voyer, 2014; Wingenbach *et al.*, 2018). Similar to sex differences in sports concussions, variations in sex hormone levels have been suggested as a possible explanation for these sex differences in emotion recognition (Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Lusk *et al.*, 2017; Marečková *et al.*, 2014; Pearson

et Lewis, 2005). However, research on sex hormones and emotion recognition yielded mixed results, with some finding an effect of menstrual cycle phase and/or hormonal contraception use on behavioral and neural responses to an emotional task (Derntl *et al.*, 2013; Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Osório *et al.*, 2018; Pearson et Lewis, 2005), while others failed to find such results (Pahnke *et al.*, 2019; Radke et Derntl, 2016; Shirazi *et al.*, 2020).

To our knowledge, only two studies investigated sex-related differences in emotion recognition in asymptomatic, multi-concussed athletes tested more than three months since their last concussion (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Léveillé *et al.*, 2017). In one of these studies, we found that male multi-concussed athletes had more difficulty recognizing negative emotions and needed more emotional intensity to identify these emotions than male controls, whereas female concussed and control athletes performed similarly (Léveillé *et al.*, 2017). However, we did not include neuroimaging methods to investigate the neural correlates of emotion perception after concussion, so the neural substrates of this emotion recognition alteration in male concussed athletes remain unknown.

Among neuroimaging techniques, electroencephalography (EEG) can provide valuable information about the timing of neural processes underlying emotion perception due to its high temporal resolution. Indeed, early sensory event-related potentials (ERPs) such as the P1 and N170 have been found to be sensitive to emotional facial expressions (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Luo *et al.*, 2010; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2012; Rigoulot *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006).

The visual P1 is the first positive-going deflection recorded at lateral occipital electrode sites peaking at approximately 100-130 ms after stimulus onset (Luck, 2014). This component is associated with the processing of low-level visual features of stimuli such as size, contrast, and luminance (Luck, 2014). It is also associated with attention (Hillyard *et al.*, 1998; Luck *et al.*, 2000; Vogel et Luck, 2000) and emotion (Carretié *et al.*, 2006; Carretié *et al.*, 2004; De Cesarei et Codispoti, 2006; Delplanque *et al.*, 2004; Hot *et al.*, 2006; Olofsson *et al.*, 2008; Smith, N. K. *et al.*, 2003). Several studies found an emotional modulation of the P1, with greater amplitudes in response to angry, disgusted, and fearful expressions than to happy and/or neutral faces (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Luo *et al.*, 2010; Pourtois *et al.*, 2004; Rellecke *et al.*, 2012; Smith, E. *et al.*, 2013; Williams, L. M. *et al.*, 2006), although some others did not show such a modulation (Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Meeren *et al.*, 2005; Schindler *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2017; Turano *et al.*, 2017).

Following the P1, the N170 is a negative-going deflection observed at bilateral occipitotemporal sites, with greater amplitudes in the right hemisphere (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012). This component arises around 140 ms and peaks at approximately 160-170 ms post-stimulus (Luck, 2014; Rossion et Jacques, 2012). The N170 is more negative to faces than to non-face stimuli and has therefore been associated with the perceptual processing of faces (Bentin *et al.*, 1996; Bentin et Deouell, 2000; Rossion et Jacques, 2012). As with the P1, the N170 is also modulated by emotion, with larger amplitudes to emotional relative to neutral facial expressions (Luo *et al.*, 2010; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006), although some studies failed to find such an effect (Ashley *et al.*, 2004; Eimer et Holmes, 2002; Eimer *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2003; Holmes *et al.*, 2005; Wild-Wall *et al.*, 2008). Among the studies reporting an emotional modulation, several showed greater N170 to angry, disgusted, and/or fearful expressions than to happy and/or neutral faces (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Blau *et al.*, 2007; Rellecke *et al.*, 2011; Roberge *et al.*, 2019; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017), and more recent research also suggested larger N170 to happy compared to neutral expressions (Hinojosa *et al.*, 2015; Kolassa *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2010; Müller-Bardorff *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2014; Rellecke *et al.*, 2012; Williams, L. M. *et al.*, 2006).

In addition to emotion, ERPs have also been shown to be sensitive to the cumulative and long-term effects of concussions (Broglia *et al.*, 2009; De Beaumont, Beauchemin, *et al.*, 2013; De Beaumont, Brisson, *et al.*, 2007; De Beaumont, Henry, *et al.*, 2012; De Beaumont *et al.*, 2009; Moore, Broglia, *et al.*, 2014; Moore, Hillman, *et al.*, 2014; Pontifex *et al.*, 2009; Theriault *et al.*, 2011). While most of these studies focused on late ERPs associated with attention and working memory such as the P3 (Baillargeon *et al.*, 2012; Broglia *et al.*, 2009; De Beaumont, Brisson, *et al.*, 2007; De Beaumont *et al.*, 2009; Dupuis *et al.*, 2000; Gosselin *et al.*, 2012; Gosselin *et al.*, 2006; Lavoie *et al.*, 2004; Moore, Hillman, *et al.*, 2014; Moore *et al.*, 2017; Theriault *et al.*, 2009), very few investigated the effect of an mTBI or concussions on early sensory ERPs such as the P1 and N170 in response to emotional facial expressions (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2019; Zuj *et al.*, 2017). Overall, these studies found smaller amplitudes of the P1, N1, and/or N170 in mTBI patients compared to healthy controls, despite normal performance on emotion recognition tasks (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2019; Zuj *et al.*, 2017). Interestingly, Carrier-Toutant *et al.* (2018) showed sex-related differences in the neural processing of emotional facial expressions in multi-concussed athletes, with male concussed athletes having a significantly smaller N1 than male controls and female concussed athletes. However, all of these studies used conventional emotion recognition tasks with only one emotion from each category (one positive and one negative) displayed at full intensity (100%), which limits their sensitivity. In contrast, the only study to reveal alterations in emotion recognition in multi-concussed athletes used a morphed emotion recognition

task, which includes the six basic emotions and combines them in different proportions (ranging from 14 to 86%) (Léveillé *et al.*, 2017). Furthermore, none of these studies included measurements of sex hormone concentrations at the time of testing to further characterize the biological underpinnings of sex differences in concussion and emotion recognition.

This study had therefore two objectives. The first was to investigate the effect of multiple concussions on the behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task. Based on our previous studies (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Léveillé *et al.*, 2017), we hypothesized that multi-concussed athletes would have more difficulty identifying emotions, especially negative ones, than healthy control athletes, and that these difficulties would be reflected in smaller amplitudes of the P1 and N170. The second objective was to study sex-related differences in emotion recognition in concussed athletes and explore the potential mediating effects of sex hormones measured on the day of testing. We hypothesized that male and female concussed athletes would show a different pattern of behavioral and electrophysiological alterations, with males having poorer performance on the emotion recognition task and smaller P1 and N170 amplitudes than females (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Léveillé *et al.*, 2017). We also predicted that these alterations would be correlated with sex hormone levels, particularly estrogen and progesterone.

### 4.3 Material and Methods

#### 4.3.1 Participants

All 80 participants (40 males, age =  $23.84 \pm 3.65$  years, range = 18-33 years, education =  $15.19 \pm 1.99$  years, range = 11-21 years) were athletes from recreational, college, university, or national sports teams (hockey, football, rugby, soccer, basketball, volleyball, cheerleading, ski or snowboard, boxing or martial arts, and water or non-contact sports) (voir l'Annexe B pour le nombre et le pourcentage d'athlètes par groupe pratiquant chaque sport). Participants were included if they met all of the following criteria: age between 18 and 35 years, normal or corrected to normal vision, no history of alcohol and/or substance abuse, no condition requiring daily medication, no history of psychiatric or neurological disorder, no current anxiety and/or depression as assessed by the Beck Anxiety Inventory (Beck et Steer, 1993) and the Beck Depression Inventory-II (Beck *et al.*, 1996), respectively, no learning disability, and no concussion or TBI (for the control athletes), and no TBI unrelated to sports (for the concussed athletes). For the concussed athletes, they had to have at least two sports-related concussions, the last being at least three months before testing. One concussed female athlete was excluded due to neurological disorder under investigation at the time of testing, three participants (one male control, one female control, and one female concussed) due to clinical anxiety, two male concussed athletes due to clinical depression, one control female athlete due to learning disability diagnosed after the study, and another control female athlete due to excessive movements during

EEG recording, resulting in a final sample of 72 participants (37 males, age =  $24.08 \pm 3.72$  years, range = 18-33 years, education =  $15.29 \pm 1.99$  years, range = 11-21 years). This study was approved by the local ethics committee, and all participants gave written informed consent prior to testing. They received financial compensation of \$80 CDN for their participation in the study.

The study included four groups. The first group consisted of 18 male athletes who reported at least two sports-related concussions (number of concussions ranged from 2 to 6) that had occurred at least three months before testing (time elapsed since the last concussion ranged from 3 to 174 months). The second group included 19 male athletes who had no history of concussion. The third group consisted of 17 female athletes who reported at least two sports concussions (number of concussions ranged from 2 to 6) that had occurred at least three months prior to testing (time elapsed since the last concussion ranged from 3 to 132 months). The fourth group included 18 female athletes who had no history of concussion. Concussion diagnosis was performed by a trained graduate student in clinical neuropsychology and was based on the definition of concussion proposed in the 5<sup>th</sup> Consensus statement on concussion in sport, including the assessment of a range of domains such as clinical symptoms, physical signs, cognitive impairment, neurobehavioral features, and sleep disturbances, among others (McCrory *et al.*, 2017). There was a significant interaction between sex and group for age,  $F(1, 68) = 4.60, p = .036, \eta_p^2 = .06$ , indicating that male concussed athletes were significantly older than male control athletes ( $p = .009$ ) and female concussed athletes ( $p = .037$ ). There was also a significant group difference in Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS),  $F(1, 64) = 6.62, p = .012, \eta_p^2 = .09$ , and BDI-II scores,  $F(1, 64) = 6.73, p = .012, \eta_p^2 = .10$ , indicating that concussed athletes reported significantly more post-concussion and depression symptoms than control athletes. However, there were no significant differences in education level and anxiety symptoms across groups (all  $ps > .05$ ), nor in the number of concussions and the time elapsed since the last concussion between male and female concussed athletes (all  $ps > .05$ ) (see Table 4.1).

Tableau 4.1 Sociodemographic and clinical characteristics of male and female concussed and control participants (M  $\pm$  SD).

Sociodemographic and clinical characteristics	Males		Females	
	Concussed (n = 18)	Controls (n = 19)	Concussed (n = 17)	Controls (n = 18)
Age (years)	26.06 $\pm$ 3.72	22.89 $\pm$ 2.79	23.47 $\pm$ 3.89	23.94 $\pm$ 3.92
Education (years)	15.83 $\pm$ 2.31	14.79 $\pm$ 1.23	14.94 $\pm$ 2.11	15.61 $\pm$ 2.15
Nb. of concussions	3.50 $\pm$ 1.42	0	3.29 $\pm$ 1.26	0
Time since the last concussion (months)	52.28 $\pm$ 50.64	-	34.47 $\pm$ 38.88	-
PCSS	11.35 $\pm$ 10.21	9.06 $\pm$ 5.81	17.70 $\pm$ 11.77	8.56 $\pm$ 8.29
BAI	4.18 $\pm$ 3.26	3.47 $\pm$ 3.98	5.47 $\pm$ 4.41	3.86 $\pm$ 3.61

## 4.3.2 Materials

### 4.3.2.1 Concussion history form and Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS)

Concussion history was assessed with a standardized concussion history form including questions on the number of previous concussions (if any), approximate dates and descriptions of each concussion, nature and duration of post-concussion symptoms (e.g. confusion and/or disorientation, anterograde and/or retrograde amnesia, loss of consciousness), and time before return to play. The Post-Concussion Symptoms Scale (PCSS) (Maroon *et al.*, 2000) was then used to evaluate the presence/absence and severity of post-concussion symptoms at the time of testing. This scale consists of 21 symptoms commonly experienced after a concussion and categorized in three different domains. The first domain includes somatic symptoms such as headaches, dizziness, nausea, vomiting, and balance problems. The second domain consists of cognitive symptoms such as attention and memory difficulties, reduced processing speed, and feeling like “in a fog”. The third domain includes neuropsychiatric symptoms such as irritability, sadness, nervousness, and anxiety. Participants were asked to rate on a scale from 0 (no symptom) to 6 (severe symptom) the 21 symptoms, for a maximum score of 126. At the time of testing, most concussed athletes were asymptomatic, reporting few, if any post-concussion symptoms ( $M = 14.33 \pm 11.26$ , range = 0-47). However, some concussed athletes were still symptomatic (symptom threshold was fixed at 25) (see Statistical Analyses for more information on how this was taken into consideration).

### 4.3.2.2 Neuropsychological testing

A neuropsychological test battery was used to assess multiple aspects of cognitive functioning. This battery included the Bells Test (assessing visual scanning and attention), the Rey Auditory Verbal Learning Test (RAVLT) and the Brief Visuospatial Memory Test-Revised (BVMT-R; evaluating verbal and visual episodic memory, respectively), the Symbol Digit Modalities Test (SDMT; measuring processing speed), the Ruff 2 & 7 Selective Attention Test (assessing attention), the Auditory Consonant Trigrams (evaluating short-term and working memory), the Trail Making Test (TMT; measuring visual scanning and mental flexibility), the Stroop test (assessing inhibition and mental flexibility), and the Controlled Oral Word Association Test (COWAT; evaluating verbal fluency and word retrieval) from the Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS). Research has shown the validity, reliability, and sensitivity of these tests in the assessment of cognitive impairments in concussed athletes (Belanger et Vanderploeg, 2005; Echemendia *et al.*, 2013; Echemendia et Julian, 2001; Echemendia *et al.*, 2001; Feddermann-Demont *et al.*, 2017;

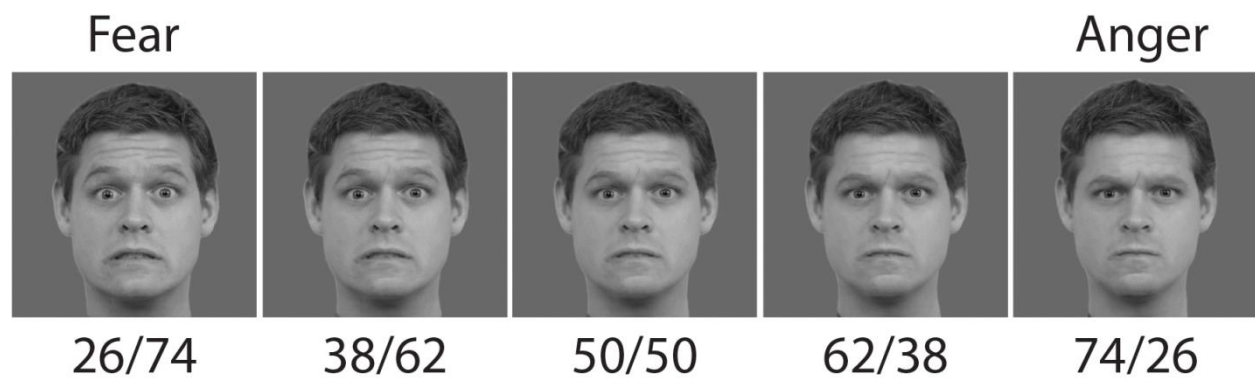
Macciocchi *et al.*, 1996; Maroon *et al.*, 2000) as well as in the general population (Lezak *et al.*, 2012; Strauss *et al.*, 2006).

#### 4.3.2.3 Morphed emotion recognition task

A morphed emotion recognition task inspired by the “facial expression megamix paradigm” (Young *et al.*, 1997) was used to evaluate emotion recognition. This task consists of the categorization of blends of emotional facial expressions, created by morphing two expressions together. It has been used in previous studies in concussed athletes as well as in other clinical populations (Bérubé *et al.*, 2020; Daudelin-Peltier *et al.*, 2017; Fiset *et al.*, 2017; Léveillé *et al.*, 2017; Turgeon *et al.*, 2020).

Briefly, stimuli consisted of photographs of a male face expressing the six basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise), taken from the Radboud Faces Database (Langner *et al.*, 2010). The stimuli were transformed into grayscale and put on a neutral gray background. The emotional facial expressions were morphed with each other in all possible pairwise combinations using FantaMorph 5.0 (Abrosoft Co., 2002). The proportion of each expression in a given blend varied from 26/74% to 74/26%, in 12% increments. A total of 15 continuums of blend were thereby created (anger/disgust, anger/fear, anger/happiness, and so on) (see Figure 4.1).

Figure 4.1 Example of facial stimuli used in this study, expressing anger and fear from 26/74% to 74/26%.



The task was composed of 15 blocks of 75 trials, for a total of 1125 trials. On each trial, a morph was randomly selected and presented at the center of a computer monitor (VIEWPixx / EEG, VPixx Technologies Inc., Saint-Bruno, Canada) until the participants responded. Participants were asked to choose which of six labels (angry, disgusted, fearful, happy, sad, surprised) best described the presented emotional



facial expression using a forced-choice task. More specifically, they had to press a corresponding key on a computer keyboard for each label. They were asked to respond as accurately and quickly as possible. No feedback was provided. The interstimulus interval (ISI) varied randomly between 1000 and 1500 ms and consisted of a grey background. Participants were seated on a straight-back chair in a dimly lit, electrically shielded room, with the monitor placed at a viewing distance of 60 cm such that the stimulus (about 11 cm wide by 16 cm high) subtended 10.48 by 15.19 degrees of visual angle.

Three behavioral measures were derived from the task: accuracy, intensity threshold, and reaction time (RT). Accuracy for each emotional facial expression displayed at each intensity (of at least 50%) was calculated as the mean percent of correct responses on all trials in which the expression was presented at a given intensity (50%, 62%, 74%). In the case of emotional facial expressions displayed at 50% intensity, both emotions presented by the expression were considered correct responses. In order to compute the intensity threshold at which an emotional facial expression was detected on at least 50% of the presented trials, the following procedure was used for each expression separately. First, all the blend continuums containing the expression under analysis were pooled together. The proportion of trials in which the expression was detected was then calculated for each intensity, and a sigmoid curve was fitted on the proportions of detection across intensities. The intensity threshold was obtained using the sigmoid parameters that best fitted the results. Finally, RT for each emotional facial expression correctly identified was calculated as the mean time from stimulus onset to response on all trials in which the expression was displayed at a given intensity (50%, 62%, 74%). Again, in the case of emotional facial expressions presented at 50% intensity, both emotions displayed by the expression were scored as correct responses.

#### 4.3.2.4 Face perception control tasks

Two control tasks were used to ensure that face perception was normal in all participants and that potential emotion recognition deficits could not be accounted for by abnormal face perception. The Cambridge Face Perception Test (CFPT) is a computerized sorting task in which participants were asked to sort six facial images according to their similarity to a target face (Duchaine *et al.*, 2007). The facial images were created by morphing six different individuals with the target face in a proportion varying from 28% to 88%, in 12% increments. Eight different facial images were created, and each was presented upright once and inverted once. The task was therefore composed of two practice trials and 16 test trials, half in which upright faces were presented and the other half in which inverted faces were presented. On each trial, a  $\frac{3}{4}$  profile view of a target face above frontal views of six men's faces was randomly presented and participants were asked to sort the faces according to their similarity to the target face. They had one minute per trial. Scores for each

trial were calculated by summing the deviations from the correct position for each face and were computed for all trials as well as the upright and inverted trials separately.

The Glasgow Face Matching Test (GFMT) is a computerized matching task composed of 40 trials, half in which two photographs of the same person are presented side by side (same-face trials) and the other half in which the image of one of the people is presented alongside a similar face (different-face trials) (Burton *et al.*, 2010). For the same- and different-face trials, the two photographs always came from different cameras. On each trial, a pair of faces was presented and participants had to determine whether the faces represented the same person or not by pressing keys on a computer keyboard. There was no time limit. Scores were calculated by summing the number of correct responses for all trials.

#### 4.3.2.5 Sex hormone measures

Participants were asked to provide saliva samples to measure sex hormone concentrations on the day of testing. The saliva was analyzed with a high sensitivity enzyme immune assay kit from Salimetrics (State College, PA), catalog number 1-3702 for estradiol and 1-1502 for progesterone. For testosterone, the saliva was analyzed with an expanded range enzyme immune assay kit from Salimetrics (State College, PA), catalog number 1-2402. The samples were brought to room temperature to be centrifuged at 1500 xg (3000 rpm) for 15 minutes. The standards, controls, and unknowns were placed into a micro plate pre-coated with monoclonal antibodies to each hormone. The antibodies compete with each hormone bound to horseradish peroxidase for the binding sites on the plate. After a one-hour incubation period for progesterone and testosterone and a two-hour incubation period for estradiol, the unbound portion was washed away. Tetramethylbenzidine was added to stain the bound portion blue. After a second incubation of 30 minutes, this reaction was stopped with a 2-molar solution of sulphuric acid creating a yellow colour. Within five minutes, the optical density of the yellow reaction was measured on a plate reader at 450 nm with a correction at 630 nm for estradiol and at 492 nm for both progesterone and testosterone. The intensity of colour measured indicates the level of horseradish peroxidase or hp bound to the plate and therefore, is inversely proportional to the level of each hormone present. The detection range is 1 to 32 pg/mL for the estradiol assay, 10 to 2430 pg/mL for the progesterone, and 6.1 to 600 pg/mL for the testosterone. The lower limit of detection is 0.1 pg/mL, 5 pg/mL, and 1.0 pg/mL for the estradiol, progesterone, and testosterone assays, respectively.

In addition to the saliva samples, female participants were asked whether or not they used a hormonal contraceptive method (e.g. birth control pill, hormonal intrauterine device [IUD], vaginal ring). If applicable, they were asked about the method used, the brand of the hormonal contraceptive, the hormone(s) in this

contraceptive and their dose (voir l'Annexe C pour le nombre d'athlètes féminines par groupe ayant un cycle naturel ou prenant une contraception hormonale).

#### 4.3.3 Electrophysiological recording and analysis

EEG was recorded using a BrainAmp DC system (Brain Products, GmbH, Gilching, Germany) with 64 active Ag-AgCl electrodes, positioned according to the International 10-10 system (American Electroencephalographic Society, 1994), grounded at AFz, and online referenced to FCz. In addition, horizontal electrooculogram (HEOG) was recorded from bipolar electrodes placed on the outer canthi of both eyes and vertical electrooculogram (VEOG) from the infra/supraorbital regions of the dominant eye. Impedances were kept below 15 k $\Omega$ . EEG was recorded at a sampling rate of 1000 Hz and online filtered between 0.1 and 100 Hz.

EEG data was preprocessed and analyzed with EEGLAB version 14.1.1 (Delorme et Makeig, 2004) and ERPLAB version 7.0.0 (Lopez-Calderon et Luck, 2014). The continuous (nonsegmented) data was downsampled at 500 Hz, then bandpass filtered with an infinite impulse response (IIR) Butterworth filter between 1 and 30 Hz (half-amplitude cutoff = -6 dB, slope = 12 dB/octave) to eliminate slow waves. Independent component analysis (ICA) was then performed to detect ocular artifacts (eye blinks, ocular saccades) and extract them from the EEG signal (Delorme et Makeig, 2004; Delorme *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2000; Plöchl *et al.*, 2012).

The ocular artifact-corrected EEG signal was then re-referenced offline to the average and segmented according to stimulus type into 600-ms epochs, starting 200 ms before and ending 400 ms after stimulus onset. Epochs were baseline corrected relative to the mean signal amplitude between 200 and 0 ms before stimulus presentation. Trials for which participants did not correctly identify the emotion were excluded from further analyses. Moreover, trials with remaining artifacts were detected with an absolute voltage threshold (a voltage exceeding  $\pm 100$   $\mu$ V at any electrode) and excluded from analyses. Lastly, trials with ocular movements before and at stimulus presentation were identified with a step function (a voltage exceeding  $\pm 50$   $\mu$ V at HEOG and VEOG from -200 to 200 ms) and excluded, since artifact correction cannot account for differences in sensory input caused by these movements (i.e. exposure to different facial features in the case of saccades or no exposure at all in the case of blinks). Averages were computed for each emotion (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) at each intensity (50%, 62%, 74%) for each participant, then grand averages were computed for all participants (total number of trials for all conditions = 1123.06  $\pm$  90.48, range = 630-1270).

Early sensory ERP components (P1, N170) were measured at the electrodes where brain activity was maximal in each hemisphere, as determined using grand average ERP waveforms and scalp topographies of brain activity for each of these components. As recommended in international ERP guidelines (Picton *et al.*, 2000), latencies were taken at the electrode where amplitude was maximal over each hemisphere, and amplitudes were measured at the latter latency at other electrodes from the same hemisphere. P1 was thereby quantified as the mean amplitude recorded at posterior parieto-occipital electrodes PO9 and PO10 between 100 and 130 ms post-stimulus onset, whereas N170 was quantified as the mean amplitude recorded at posterior temporo-parietal electrodes TP9 and TP10 between 140 and 180 ms post-stimulus onset (see Figure 4.7 in Supplementary Materials). These electrodes and time windows are consistent with those reported in the literature for these components (Batty et Taylor, 2003; Bayer et Schacht, 2014; Itier et Taylor, 2002, 2004a; Rellecke *et al.*, 2012; Tortosa *et al.*, 2013).

#### 4.3.4 Procedure

Potential participants were first administered a general health questionnaire and the concussion history form to verify study eligibility. If eligible, they then completed two testing sessions, one of three hours and the other of one hour. On the first session, participants completed a visual acuity test (i.e. Snellen chart), the face perception control tasks as well as the emotion recognition task during which EEG was recorded. At the end of this session, they provided a saliva sample for sex hormones and were given questionnaires (i.e. PCSS, BAI, BDI-II) to complete at home. On the second session, they completed the neuropsychological test battery. Testing was performed by a trained graduate student in clinical neuropsychology ensuring that the administration, test procedures, and scoring were standardized and uniform across all participants.

#### 4.3.5 Statistical analyses

Statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics for Windows, version 26.0 (IBM, New York, United States). All data was first converted into  $z$  scores, then descriptive statistics and histograms were computed for inspection of outliers and normality for each group (male concussed, male control, female concussed, and female control athletes) separately. Outliers ( $z$  scores  $< -3.29$  or  $> 3.29$ ) (Tabachnick et Fidell, 2007) were excluded ( $M = 2.52 \pm 1.46$  cases excluded, range = 0-5) and data not normally distributed was transformed using either logarithmic or probit function. Given the statistically significant differences in depression and post-concussion symptoms between groups and their potential effects on the results, BDI-II and PCSS scores were entered as covariates in all analyses. However, age was not included as a covariate since the difference was minimal and unlikely to influence the results.

For the behavioral data, univariate analyses of covariance (ANCOVAs) or mixed factorial ANCOVAs were conducted for neuropsychological tests and face perception control tasks with sex (male, female) and group (concussed, control) as between-subjects factors and BDI-II and PCSS scores as covariates. Mixed factorial ANCOVAs were also performed for accuracy and RTs on the emotion recognition task with sex and group as between-subjects factors, emotion (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) and intensity (50%, 62%, 74%) as within-subjects factors as well as BDI-II and PCSS scores as covariates. Similarly, a mixed factorial ANCOVA was conducted for intensity threshold with sex and group as between-subjects factors, emotion as a within-subjects factor, and BDI-II and PCSS scores as covariates.

For the EEG data, mixed factorial ANCOVAs were performed for P1 and N170 mean amplitude with sex and group as between-subjects factors, emotion, intensity, and hemisphere (left, right) as within-subjects factors as well as BDI-II and PCSS scores as covariates. For both the behavioral and electrophysiological analyses, the Greenhouse-Geisser (for  $\epsilon < .75$ ) or Huynh-Feldt (for  $\epsilon \geq .75$ ) correction was applied when assumptions of sphericity were violated (Verma, 2015). All pairwise follow-up tests were corrected with the Bonferroni adjustment, except for the interactions involving the emotion factor, which were corrected with the Benjamini-Hochberg adjustment (Benjamini et Hochberg, 1995). For the sake of parsimony and since this study focused on the effects of sex and concussions on emotion recognition, only the main effects of sex and group as well as the interactions with these factors are reported in this article. The reader interested in the main effects of emotion and emotional intensity as well as their interaction can refer to the article by Léveillé *et al.* (2022).

Finally, correlations between clinical variables (number of concussions, time since the last concussion) as well as behavioral (accuracy) and EEG data (P1 and N170 mean amplitude) for each emotional facial expression displayed at each intensity (50%, 62%, 74%) were computed for concussed and control athletes separately. Correlations were also computed between clinical variables, sex hormones as well as behavioral and EEG data for each group separately (male concussed, male controls, female concussed, female controls) and according to hormonal contraception use in female participants (i.e. for those naturally cycling and those taking hormonal contraception separately).

For all analyses,  $p$  values less than .05 were considered statistically significant unless otherwise specified.

## 4.4 Results

### 4.4.1 Neuropsychological tests

There was no significant main effect of sex or group, nor any interaction with sex and/or group for the number of correct responses on the immediate and delayed recall of the RAVLT, execution and total time on the Bells Test, number of correct responses on the SDMT, accuracy for the Automatic Detection and Controlled Search of the Ruff 2&7 Selective Attention Test, number of correct responses on the Auditory Consonant Trigrams as well as total time on the TMT A&B and Stroop test (all  $F$ s < 3.51, all  $p$ s > .065) (see Table 4.2). There was also no significant main effect of sex or group for the number of correct responses on the immediate total recall and delayed recall of the BVMT-R as well as on the COWAT (all  $F$ s < 3.26, all  $p$ s > .075).

However, there was a significant sex by group interaction for the immediate total recall of the BVMT-R,  $F(1, 62) = 12.97, p = .001, \eta_p^2 = .17$ . Female controls ( $M = 33.11 \pm 1.45, 95\% \text{ CI} = 32.39\text{--}33.83$ ) recalled significantly more items than female concussed ( $M = 29.53 \pm 3.52, 95\% \text{ CI} = 27.58\text{--}31.48, p = .004$ ) and male control athletes ( $M = 29.39 \pm 4.42, 95\% \text{ CI} = 27.19\text{--}31.59, p = .001$ ). No other comparison reached statistical significance (all  $p$ s > .05). There was also a significant sex by group interaction for the delayed recall of this test,  $F(1, 62) = 6.40, p = .014, \eta_p^2 = .09$ , with female controls ( $M = 11.78 \pm 0.55, 95\% \text{ CI} = 11.51\text{--}12.05$ ) again recalling significantly more items than female concussed ( $M = 10.60 \pm 1.12, 95\% \text{ CI} = 9.98\text{--}11.22, p = .004$ ) and male control athletes ( $M = 10.78 \pm 1.17, 95\% \text{ CI} = 10.20\text{--}11.36, p = .004$ ). There was no other significant difference (all  $p$ s > .459). Furthermore, a significant interaction between condition and group was observed for the COWAT,  $F(1, 62) = 5.52, p = .022, \eta_p^2 = .08$ . As expected, both concussed (phonemic:  $M = 33.00 \pm 9.80, 95\% \text{ CI} = 29.47\text{--}36.53$ , semantic:  $M = 45.50 \pm 7.88, 95\% \text{ CI} = 42.66\text{--}48.34$ ) and control participants (phonemic:  $M = 36.94 \pm 8.17, 95\% \text{ CI} = 34.18\text{--}39.71$ , semantic:  $M = 43.69 \pm 9.29, 95\% \text{ CI} = 40.55\text{--}46.84$ ) generated significantly more words in the semantic than the phonemic condition ( $p < .001$  and  $p = .001$  for the concussed and control participants, respectively). Controls also generated marginally more words than concussed athletes in the phonemic condition ( $p = .070$ ). No other comparison was significant ( $p > .272$ ). A significant interaction between sex and group was also observed for this test,  $F(1, 62) = 4.09, p = .047, \eta_p^2 = .06$ , with female controls ( $M = 42.53 \pm 6.09, 95\% \text{ CI} = 39.50\text{--}45.55$ ) generating slightly more words than female concussed ( $M = 37.30 \pm 8.10, 95\% \text{ CI} = 32.82\text{--}41.78, p = .087$ ) and male control athletes ( $M = 38.11 \pm 6.04, 95\% \text{ CI} = 35.11\text{--}41.12, p = .070$ ). There was no other significant difference (all  $p$ s > .289), nor any other significant interaction with sex and/or group (all  $F$ s < 0.20, all  $p$ s > .661).

Tableau 4.2 Performance on the neuropsychological tests and face perception control tasks for male and female concussed and control participants (M ± SD).

Test	Males		Females	
	Concussed	Controls	Concussed	Controls
<b>Bells Test</b>				
Execution time (sec)	62.12 ± 20.24	59.67 ± 17.59	50.40 ± 13.34	55.89 ± 14.56
Total time (sec)	83.94 ± 25.70	85.22 ± 22.39	80.40 ± 27.76	90.61 ± 41.99
<b>RAVLT</b>				
Immediate recall (/15)	12.41 ± 1.42	12.11 ± 2.05	13.00 ± 1.81	13.28 ± 1.90
Delayed recall (/15)	12.41 ± 1.54	12.50 ± 1.98	13.13 ± 2.03	13.28 ± 1.64
<b>BVMT-R</b>				
Immediate total recall (/36)**	31.59 ± 2.81	29.39 ± 4.42	29.53 ± 3.52	33.11 ± 1.45
Delayed recall (/12)*	11.00 ± 1.00	10.78 ± 1.17	10.60 ± 1.12	11.78 ± 0.55
<b>SDMT</b>				
	61.82 ± 9.93	58.94 ± 8.81	64.40 ± 9.30	61.83 ± 8.63
<b>Ruff 2&amp;7</b>				
Automatic Detection accuracy (%)	98.59 ± 1.20	97.28 ± 2.10	97.32 ± 2.17	96.86 ± 2.22
Controlled Search accuracy (%)	94.01 ± 3.23	92.11 ± 4.26	92.33 ± 5.92	93.85 ± 4.18
<b>Auditory Consonant Trigrams</b>				
0 sec (/15)	15.00 ± 0.00	14.94 ± 0.24	15.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
9 sec (/15)	12.47 ± 1.55	12.50 ± 1.72	12.33 ± 2.02	13.06 ± 1.73
18 sec (/15)	11.76 ± 2.70	10.33 ± 2.38	10.73 ± 2.84	10.67 ± 2.03
36 sec (/15)	11.76 ± 2.39	10.94 ± 2.34	10.53 ± 1.55	10.72 ± 2.40
<b>TMT</b>				
Trail A (sec)	21.00 ± 5.79	24.22 ± 9.17	21.67 ± 7.84	21.94 ± 6.84
Trail B (sec)	48.88 ± 11.35	60.78 ± 20.78	49.80 ± 21.60	43.94 ± 10.51
<b>Stroop</b>				
Color naming (sec)	26.35 ± 3.74	26.22 ± 2.96	25.53 ± 3.20	27.11 ± 5.26
Word reading (sec)	20.12 ± 2.55	18.94 ± 3.19	19.13 ± 2.90	20.89 ± 4.80
Inhibition (sec)	44.00 ± 9.87	44.67 ± 8.68	44.67 ± 9.98	42.89 ± 9.13
Inhibition/switching (sec)	50.18 ± 5.64	50.94 ± 8.75	49.47 ± 5.36	53.39 ± 12.44
<b>COWAT*</b>				
Phonemic fluency	34.41 ± 9.40	35.22 ± 7.50	31.40 ± 10.32	38.67 ± 8.66
Semantic fluency	47.53 ± 6.91	41.00 ± 7.87	43.20 ± 8.50	46.39 ± 10.02
<b>CFPT</b>				
Upright	4.60 ± 2.00	4.81 ± 1.97	4.36 ± 1.25	4.15 ± 1.38
Inverted	8.16 ± 1.63	8.42 ± 2.15	8.06 ± 1.64	7.67 ± 1.55
<b>GFMT</b>				
	0.87 ± 0.06	0.84 ± 0.11	0.86 ± 0.09	0.87 ± 0.06

\**P* values < .05

\*\**P* values < .01

#### 4.4.2 Face perception control tasks

Analyses on the CFPT and GFMT did not reveal a significant sex or group main effect, nor any sex and/or group interaction (all *F*s < 1.50, all *p*s > .226) (see Table 4.2).

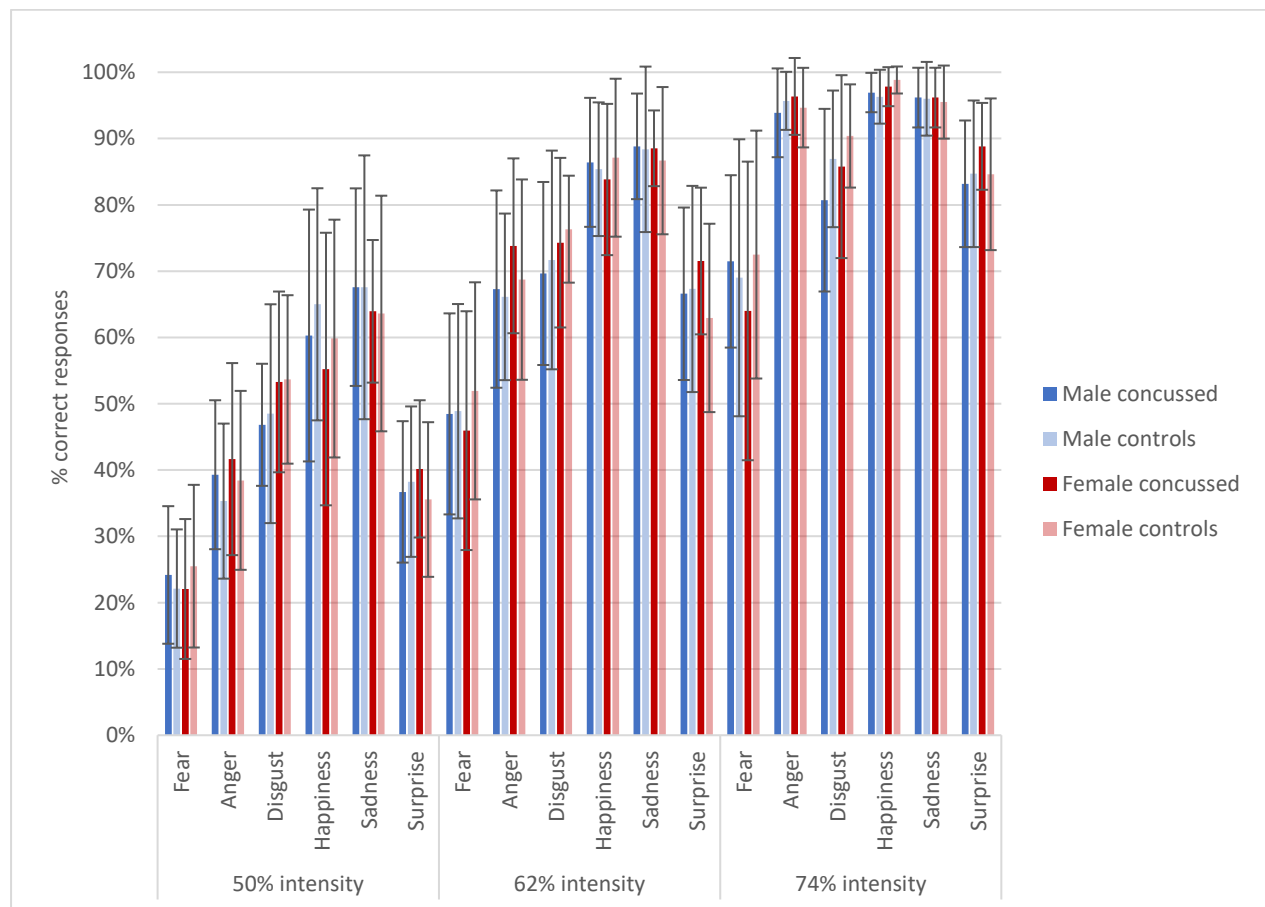
### 4.4.3 Emotion recognition

#### 4.4.3.1 Behavioral results

##### 4.4.3.1.1 Accuracy

There was no significant main effect of sex or group, nor any interaction with sex and/or group for accuracy on the emotion recognition task (all  $F_s < 1.93$ , all  $p_s > .072$ ) (see Figure 4.2).

Figure 4.2 Accuracy (in %) for each emotion at each intensity level for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ).

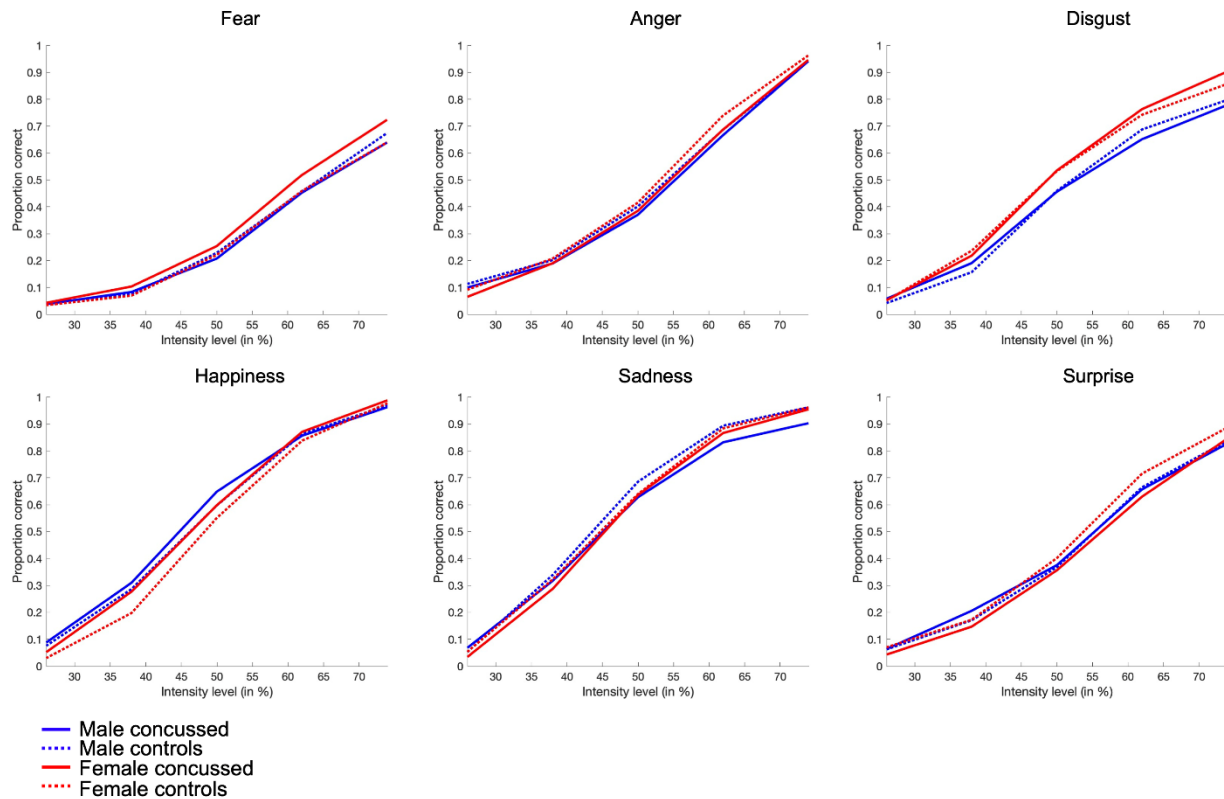


##### 4.4.3.1.2 Intensity threshold set at 50%

A mixed factorial ANCOVA on intensity threshold did not yield a significant sex or group main effect, nor any sex and/or group interaction (all  $F_s < 1.02$ , all  $p_s > .410$ ) (see Figure 4.3).



Figure 4.3 Intensity threshold for each emotion for male and female concussed and control participants ( $M \pm SD$ ).



#### 4.4.3.1.3 RT

There was a significant main effect of sex for RTs on the emotion recognition task,  $F(1, 61) = 7.37, p = .009$ ,  $\eta_p^2 = .11$ , indicating that women ( $M = 1777.32 \pm 349.68$  ms, 95% CI = 1657.20–1897.43 ms) were significantly faster at recognizing emotions than men ( $M = 2064.02 \pm 511.90$  ms, 95% CI = 1890.82–2237.22 ms). However, there was no significant main effect of group, nor any interaction with sex and/or group (all  $F_s < 2.52$ , all  $p_s > .085$ ) (see Table 4.3 in Supplementary Materials).

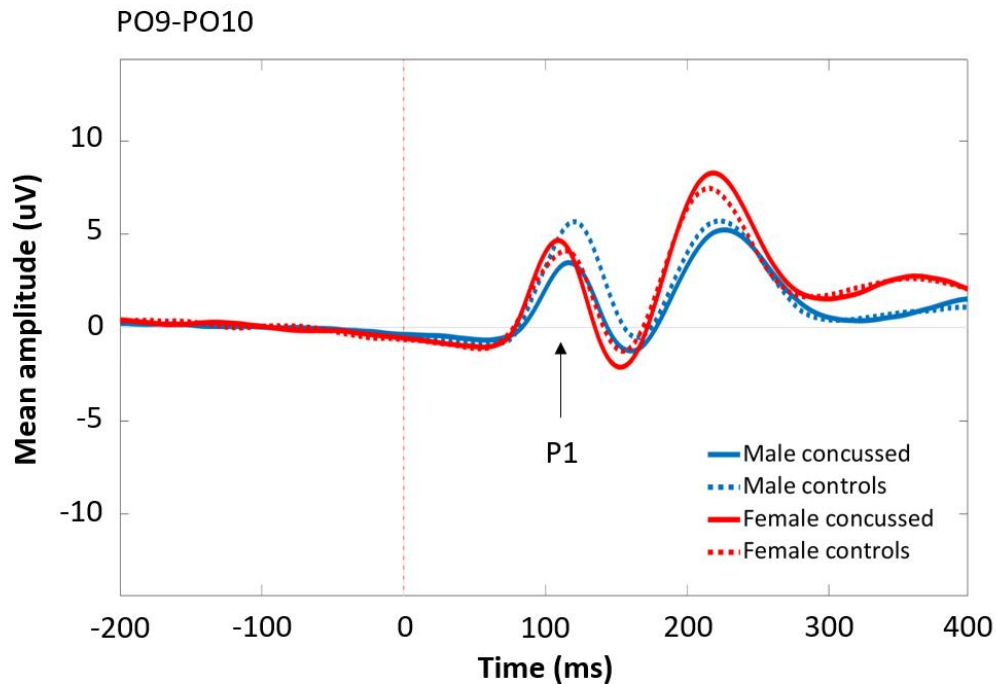
#### 4.4.3.2 Electrophysiological results

##### 4.4.3.2.1 P1

Analyses on the mean amplitude of the P1 did not reveal a significant sex or group main effect (all  $F_s < 2.24$ , all  $p_s > .140$ ). However, they yielded a significant sex by group interaction,  $F(1, 59) = 5.98, p = .017$ ,  $\eta_p^2 = .09$ , with the amplitude of the P1 of male controls ( $M = 5.31 \pm 3.15$  uV, 95% CI = 3.74–6.87 uV) being significantly greater than that of male concussed athletes ( $M = 2.98 \pm 3.17$  uV, 95% CI = 1.35–4.61 uV,  $p = .005$ ) and marginally larger than that of female controls ( $M = 4.07 \pm 2.53$  uV, 95% CI = 2.77–5.37 uV,  $p$

= .052) (see Figure 4.4). No other comparison was significant (all  $ps > .131$ ), nor any other sex and/or group interaction (all  $Fs < 3.11$ , all  $ps > .083$ ).

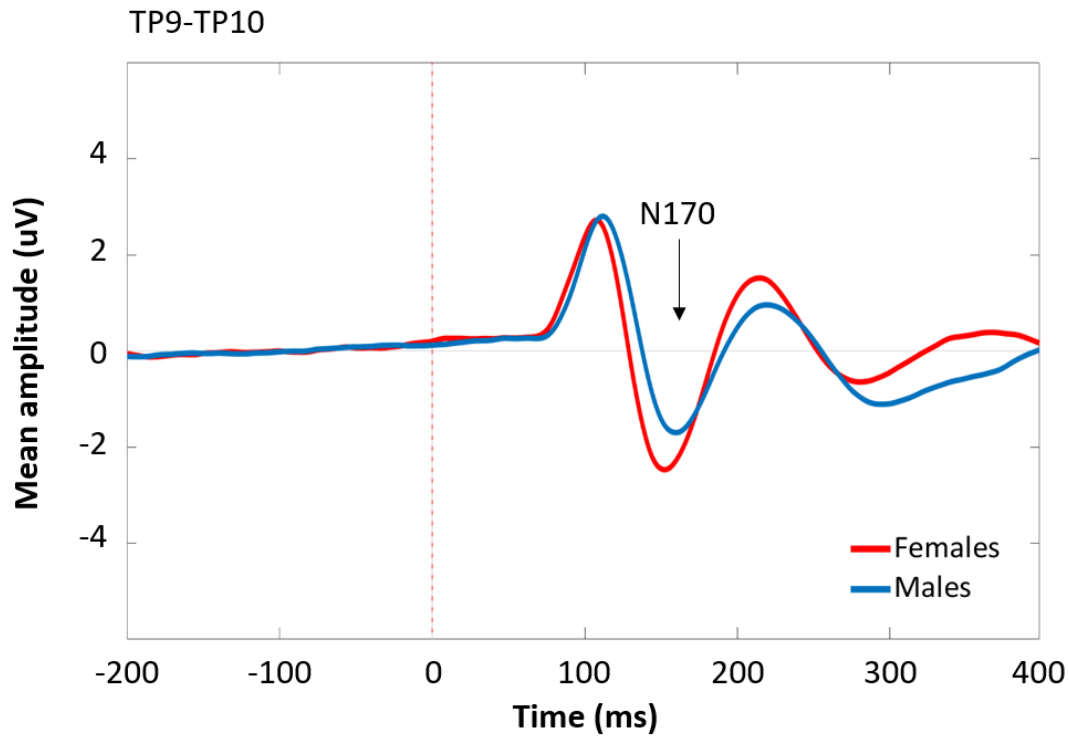
Figure 4.4 ERPs at bilateral parieto-occipital electrode sites (PO9, PO10) showing the P1 from 100 to 130 ms for male and female concussed and control participants.



#### 4.4.3.2.2 N170

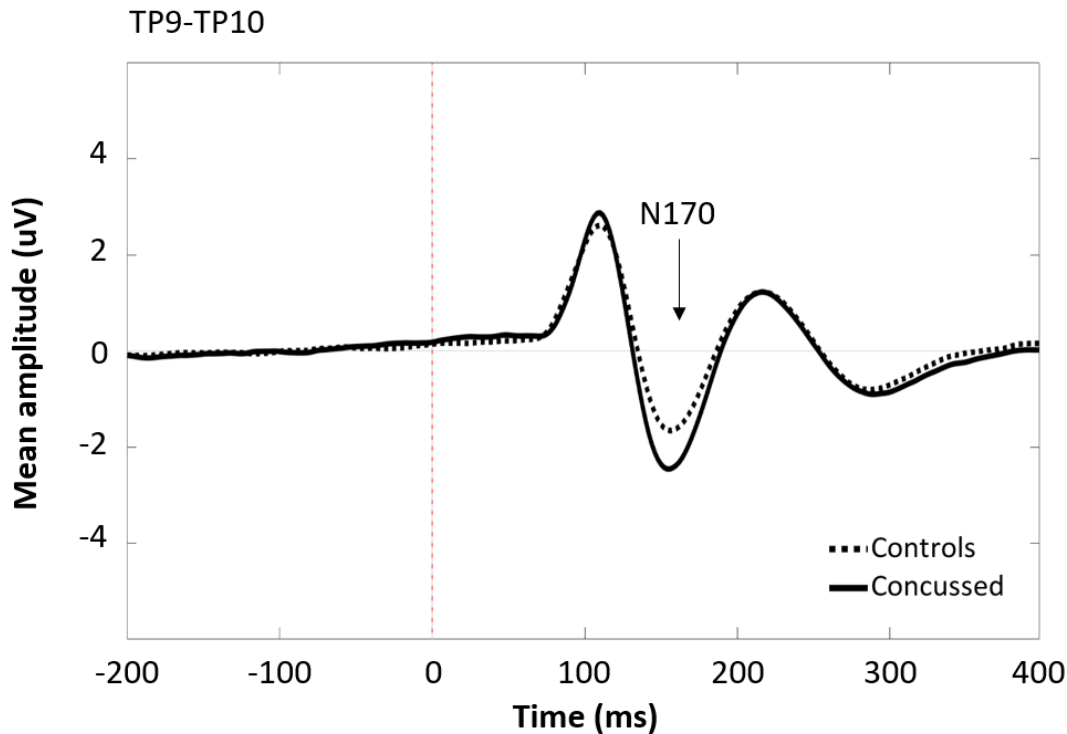
There was a significant main effect of sex for the N170 mean amplitude,  $F(1, 59) = 4.10$ ,  $p = .047$ ,  $\eta_p^2 = .06$ , indicating that women ( $M = -2.03 \pm 1.88$  uV, 95% CI =  $-2.68$ – $-1.37$  uV) had a significantly greater N170 than men ( $M = -1.16 \pm 1.33$  uV, 95% CI =  $-1.62$ – $-0.70$  uV) (see Figure 4.5).

Figure 4.5 ERPs at bilateral temporo-parietal electrode sites (TP9, TP10) showing the N170 from 140 to 180 ms for male and female participants.



There was also a significant main effect of group,  $F(1, 59) = 4.47, p = .039, \eta_p^2 = .07$ , showing that the N170 amplitude of concussed participants ( $M = -2.09 \pm 1.73$  uV, 95% CI = -2.71–-1.48 uV) was significantly larger than that of controls ( $M = -1.12 \pm 1.49$  uV, 95% CI = -1.64–-0.61 uV) (see Figure 4.6).

Figure 4.6 ERPs at bilateral temporo-parietal electrode sites (TP9, TP10) showing the N170 from 140 to 180 ms for concussed and control participants.



Finally, a significant three-way interaction between emotion, hemisphere, and sex was observed for the N170,  $F(5, 295) = 2.51, p = .030, \eta_p^2 = .04$  (see Table 4.4 in Supplementary Materials). To compare male and female participants, two separate sets of mixed factorial ANCOVAs were conducted. The first set was computed on each hemisphere with sex as a between-subjects factor, emotion and intensity as within-subjects factors as well as BDI-II and PCSS scores as covariates. This did not reveal a significant emotion by sex interaction for any hemisphere (all  $F_s < 1.78$ , all  $p_s > .118$ ). The second set of analyses was performed on each emotion with sex as a between-subjects factor, intensity and hemisphere as within-subjects factors as well as BDI-II and PCSS scores as covariates. Again, this did not yield a significant hemisphere by sex interaction for any emotion (all  $F_s < 0.79$ , all  $p_s > .381$ ).

There was no other significant interaction with sex and/or group for the mean amplitude of the N170 (all  $F_s < 1.61$ , all  $p_s > .101$ ).

#### 4.4.4 Correlational analyses

There were significant correlations between sex hormone levels and behavioral as well as electrophysiological responses in male and female concussed and control athletes (see Tables 4.5-4.10 in

Supplementary Materials). However, none of these correlations remained significant after correction for multiple comparisons.

#### 4.5 Discussion

The current study is one of the few to examine sex-related differences in behavioral and electrophysiological responses to a morphed emotion recognition task in asymptomatic, multi-concussed athletes tested more than three months since their last concussion. Results revealed significant, persistent alterations in early sensory ERP components in response to emotional facial expressions in concussed participants, despite normal performance on the emotion recognition task, with concussed athletes having a significantly greater N170 than controls. Results also revealed significant sex differences in the electrophysiological responses of concussed participants to the emotional task, with male concussed athletes having a significantly smaller P1 than male controls.

Interestingly, we found no emotion recognition impairment in concussed athletes. These results contrast with those of our previous study showing negative emotion recognition alterations in male concussed athletes (Léveillé *et al.*, 2017), but are consistent with those from other studies reporting no such alterations in this group of athletes or patients with mTBI (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Drapeau, J. *et al.*, 2019). Although apparently contradictory, these discrepancies in results could be explained by differences in the characteristics of the task and recruited participants. The majority of studies used traditional emotion recognition tasks with only one emotion per category (positive, negative, neutral) displayed at full intensity (100%), which typically have a ceiling effect and are therefore not sensitive to the subtle emotion recognition impairments in concussed athletes or mTBI patients (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Drapeau, J. *et al.*, 2019). In contrast, in our previous study, we used a task with the six basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) presented at different intensities (from 14 to 86%), which has been shown to be sensitive to the effects of concussions and other clinical conditions on emotion recognition (Bérubé *et al.*, 2020; Daudelin-Peltier *et al.*, 2017; Fiset *et al.*, 2017; Léveillé *et al.*, 2017; Turgeon *et al.*, 2020). However, in the present study, we removed intensities to adapt the task to EEG recording and analysis, which may have decreased its sensitivity (Léveillé *et al.*, 2022). Furthermore, in male concussed athletes from this study, the time elapsed since the last concussion was twice as long as in male concussed athletes tested in our previous study, which may also have contributed to the lack of effect in this group (Léveillé *et al.*, 2017).

In contrast to behavioral responses, we found persistent, significant electrophysiological alterations in response to emotional facial expressions in concussed athletes as a whole, but also in male concussed

athletes in particular. Our finding of a smaller amplitude of the P1 in male concussed athletes is in accordance with past research reporting a decrease in P1/N1 amplitude following a concussion or mTBI (Broglio *et al.*, 2011; Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Desjardins *et al.*, 2021; Drapeau, J. *et al.*, 2019; Gosselin *et al.*, 2006; Moore, Broglio, *et al.*, 2014; Moore *et al.*, 2017). In particular, Carrier-Toutant *et al.* (2018) showed a reduction in the amplitude of the P1 in concussed athletes compared to controls. They also showed a suppression of the frontal N1 amplitude in male concussed athletes relative to male control and female concussed participants. Although the latter result is for the anterior N1 and not the posterior P1, some authors proposed that these two components could represent the two ends of the same dipole and therefore, the same cognitive process (Kaminska *et al.*, 2020; Rossion *et al.*, 1999). Thus, the decrease in P1/N1 amplitude in male concussed athletes could reflect impaired visual processing of stimuli, which could lead to difficulties in discriminating the shared facial features of negative emotions and disproportionate impairments of these emotions as found in our previous study and those on TBI (Binder *et al.*, 2019; Drapeau, J. *et al.*, 2017; Léveillé *et al.*, 2017; Mancuso *et al.*, 2015; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2018; Zupan *et al.*, 2014).

Unlike the P1, our finding of a greater amplitude of the N170 in concussed athletes contrasts with past research reporting a smaller amplitude of this component or no significant differences between mTBI patients and healthy participants (D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2019; Zuj *et al.*, 2017). While conjectural, the larger N170 in concussed athletes despite normal performance on the emotion recognition task could suggest a compensatory mechanism by which these athletes recruit additional neural resources to meet task demands (Ledwidge et Molfese, 2016; McAllister *et al.*, 2001; McDonald, B. C. *et al.*, 2012; Molfese, 2015; Ozen *et al.*, 2013). According to the model proposed by Molfese (2015), neural networks become spatially and temporally unstable after a concussion, which affects their functioning as reflected in the accuracy and speed of performance. To compensate for this post-injury loss of efficiency, new local and distal networks are formed during the months following the concussion and are recruited during a task, which results in increased electrophysiological responses as reported in the study by Ledwidge et Molfese (2016). In support of this hypothesis, there was a significant negative correlation between accuracy on the emotion recognition task and the amplitude of the N170 in concussed athletes ( $r = -.38, p = .027$ ), but not in controls, suggesting that concussed athletes who had a more negative N170 amplitude were also those who performed better on the task. Future research using source localization to study brain activation patterns would be helpful in confirming this hypothesis.

In addition to the effect of concussions on the N170, we found an effect of sex for this component, with women having a greater N170 than men. We also found an interaction between emotion, hemisphere, and sex for this component, but there were no significant differences between men and women for any emotion,

nor hemisphere. These results are concordant with those of previous studies showing that women have a more negative N170 in response to emotional facial expressions than men (Choi *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2018). However, unlike previously reported, hemispheric lateralization for face processing did not differ according to sex (Godard *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2016; Proverbio *et al.*, 2006; Stasch *et al.*, 2018). These results discrepancies may be related to methodological differences such as the task used (e.g. face perception vs. emotion recognition task) and the participants tested (e.g. normal vs. clinical population).

Similar to the effect of sex on the N170, we found sex-related differences in reaction times, with women being faster at recognizing emotions than men. This is consistent with past research showing superior emotion recognition in women (Hall et Matsumoto, 2004; Hampson *et al.*, 2006; Montagne *et al.*, 2005; Petrovic *et al.*, 2019; Saylik *et al.*, 2018; Thompson et Voyer, 2014; Wingenbach *et al.*, 2018). However, accuracy and intensity threshold did not differ across sex, which could again be explained by differences in task (e.g. conventional vs. morphed emotion recognition, whether it emphasized accuracy, speed or both) and participants characteristics (e.g. normal vs. clinical population).

To further examine sex differences in emotion recognition, we investigated the influence of sex hormones measured on the day of testing on the behavioral and electrophysiological responses to the emotion recognition task in male and female concussed and control participants. However, there were no significant correlations after correction for multiple comparisons. Previous studies on the effects of sex hormones on emotion recognition yielded mixed results, with some finding an influence of menstrual cycle phase and/or hormonal contraception on the behavioral and neural responses during an emotional task (Derntl *et al.*, 2013; Derntl, Kryspin-Exner, *et al.*, 2008; Derntl, Windischberger, *et al.*, 2008; Guapo *et al.*, 2009; Osório *et al.*, 2018; Pearson et Lewis, 2005) and others not showing such results (Pahnke *et al.*, 2019; Radke et Derntl, 2016; Shirazi *et al.*, 2020). This variability across studies may be related to methodological limitations such as study design, samples, and measures. Most studies focused on small samples of women naturally cycling or taking hormonal contraceptives and used cross-sectional designs instead of longitudinal ones, which may be underpowered to detect behavioral changes associated with sex hormone shifts throughout the menstrual cycle (Gangestad *et al.*, 2016; Gonzales et Ferrer, 2016; Shirazi *et al.*, 2020). Moreover, they used self-report measures rather than sex hormone assays to determine menstrual cycle phase, which may have led to classification errors and unreliable results (Gangestad *et al.*, 2016; Gonzales et Ferrer, 2016; Shirazi *et al.*, 2020). In our study, and although we measured objectively and precisely sex hormone concentrations with assays, we were limited by our cross-sectional design, the small size of our groups, and the fact that the majority of our female participants were using hormonal contraceptives. More studies are therefore needed to better understand the possible associations between sex hormones, emotion recognition, and concussions.

Finally, we found effects of concussions and sex-related differences on the neuropsychological tests. Female controls performed slightly better on the verbal fluency, whereas concussed athletes performed significantly worse on the phonemic condition of this test, in accordance with past research showing a female advantage for verbal tests as well as negative effects of concussions on executive functions (Covassin *et al.*, 2010; Covassin, Elbin, Larson, *et al.*, 2012; Covassin *et al.*, 2006; Lezak *et al.*, 2012; Sicard *et al.*, 2018; Strauss *et al.*, 2006). Additionally, female concussed athletes performed significantly worse on the immediate and delayed recall of a visual memory test, which is also concordant with previous studies reporting that female concussed athletes have more difficulties on visual memory tests (Covassin, Elbin, Bleecker, *et al.*, 2013; Covassin, Elbin, Harris, *et al.*, 2012; Covassin *et al.*, 2007; Kontos *et al.*, 2012; Tanveer *et al.*, 2017).

There are several methodological limitations to the current study. First, our stimuli consisted of photographs of a male face and did not include a female face, which could have contributed to the sex differences reported in this study. Second, our sample was relatively small and consisted of asymptomatic, multi-concussed athletes tested in the chronic phase, which limits the generalization of our results to that subgroup of the concussed population. Third, we used self-reports to document concussion history, which are less reliable than medical records and therefore may have led to errors in concussion history. Fourth, and as already mentioned, most of our female participants were taking hormonal contraceptives, which limited us in our exploratory analyses of sex hormones and emotion recognition. Lastly, the cross-sectional nature of our study limits our interpretation of the causal relationships between concussions, emotion recognition, and sex hormones. Large-scale, longitudinal studies on single and multi-concussed athletes, including women naturally cycling and others using hormonal contraceptives, are therefore necessary to validate the results of the present study. Nevertheless, our study provides evidence for cumulative and long-term effects of concussions on early visual processing of emotional facial expressions, with concussed athletes having a greater N170 than controls. It also provides evidence for sex-related differences in brain processing of emotions in concussed athletes, with male concussed athletes having a smaller P1 than male controls.

#### 4.6 Acknowledgements

The authors declare no conflict of interest. This work was supported by a doctoral training award from the Fonds de recherche du Québec – Santé to Edith Léveillé and the Caroline Durand Research Chair on Acute Traumatology of the University of Montreal awarded to Louis De Beaumont. Preliminary results were presented at local scientific meetings as well as the 2019 Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping in Rome, Italy. The authors would like to thank all the participants for their participation in the study as well as Hugues Leduc for his sound advice on statistical analyses.



## 4.7 Supplementary Materials

Figure 4.7 Scalp topographies for the P1 (left) from 100 to 130 ms and the N170 (right) from 140 to 180 ms showing the mean amplitude of these two components in response to all emotions presented from 50 to 74% intensity.

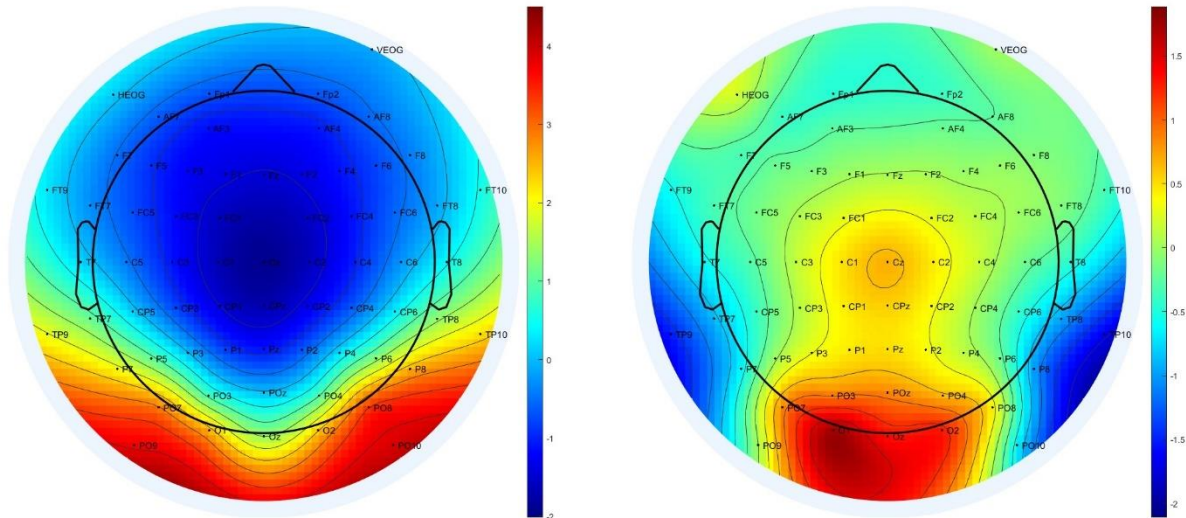


Tableau 4.3 RTs (in ms) for each emotion at each intensity level for male and female concussed and control participants (M ± SD).

Intensity	Emotion	Males		Females	
		Concussed	Controls	Concussed	Controls
50%	Fear	2624.05 ± 779.17	2786.15 ± 1311.27	2629.11 ± 896.09	2261.99 ± 837.97
	Anger	2408.83 ± 1032.12	2202.17 ± 669.83	1950.33 ± 477.51	1940.44 ± 599.76
	Disgust	2444.63 ± 795.46	2651.77 ± 1182.11	2141.54 ± 749.89	1838.52 ± 468.68
	Happiness	1675.25 ± 379.24	1909.44 ± 929.20	1849.82 ± 549.62	1602.22 ± 384.53
	Sadness	2148.58 ± 461.42	2214.09 ± 773.82	1874.24 ± 461.51	1776.33 ± 395.78
	Surprise	2850.58 ± 1217.24	2743.57 ± 1153.26	2300.89 ± 723.41	2210.34 ± 575.61
62%	Fear	2369.17 ± 470.60	2407.62 ± 858.98	2173.23 ± 653.18	2154.38 ± 631.59
	Anger	2138.34 ± 568.02	2466.01 ± 1546.40	2008.10 ± 641.62	1798.45 ± 489.32
	Disgust	1942.78 ± 411.91	2335.70 ± 1116.06	1877.83 ± 562.94	1561.00 ± 270.25
	Happiness	1465.82 ± 247.64	1424.23 ± 423.51	1512.23 ± 522.63	1403.54 ± 380.77
	Sadness	1720.95 ± 471.14	1850.97 ± 689.71	1583.49 ± 390.26	1549.74 ± 438.67
	Surprise	2126.51 ± 538.58	2507.75 ± 1216.37	1901.99 ± 416.20	1995.48 ± 483.12
74%	Fear	2065.08 ± 608.16	2346.19 ± 1099.99	1939.08 ± 529.47	1901.38 ± 525.63
	Anger	1664.90 ± 473.73	1700.25 ± 576.57	1462.27 ± 363.88	1498.32 ± 391.51
	Disgust	1796.01 ± 402.97	1980.34 ± 659.05	1577.02 ± 324.92	1519.70 ± 337.18
	Happiness	1137.43 ± 229.87	1181.00 ± 374.85	1038.59 ± 200.04	971.59 ± 193.06
	Sadness	1452.65 ± 391.61	1555.75 ± 488.53	1456.58 ± 352.94	1376.28 ± 399.20
	Surprise	1879.00 ± 572.32	2000.45 ± 625.39	1727.77 ± 490.90	1675.80 ± 438.48

Tableau 4.4 N170 mean amplitude (in uV) in each hemisphere for each emotion for male and female participants (M  $\pm$  SD).

Emotion	Males		Females	
	Right hemisphere	Left hemisphere	Right hemisphere	Left hemisphere
Fear	-1.20 $\pm$ 1.39	-1.33 $\pm$ 1.47	-2.07 $\pm$ 2.57	-1.93 $\pm$ 1.77
Anger	-1.18 $\pm$ 1.48	-1.29 $\pm$ 1.62	-2.33 $\pm$ 2.50	-1.90 $\pm$ 1.78
Disgust	-1.18 $\pm$ 1.41	-1.21 $\pm$ 1.65	-2.32 $\pm$ 2.63	-1.98 $\pm$ 1.82
Happiness	-0.95 $\pm$ 1.45	-1.09 $\pm$ 1.54	-2.05 $\pm$ 2.60	-1.83 $\pm$ 1.79
Sadness	-1.17 $\pm$ 1.45	-1.20 $\pm$ 1.64	-2.34 $\pm$ 2.64	-1.96 $\pm$ 1.87
Surprise	-1.05 $\pm$ 1.32	-1.09 $\pm$ 1.63	-1.81 $\pm$ 2.54	-1.82 $\pm$ 1.70

Tableau 4.5 Significant correlations ( $p$  values in parentheses) between clinical variables as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in concussed athletes.

			Nb. of concussions	N170 mean amplitude at TP9 for happiness at 62%
Accuracy for happiness at 62%				-0.37 (.032)
	50%	PO10	-0.40 (.018)	
		PO9	-0.47 (.005)	
Fear	62%	PO10	-0.42 (.015)	
		PO9	-0.36 (.037)	
	74%	PO10	-0.45 (.007)	
	50%	PO10	-0.37 (.033)	
		PO9	-0.51 (.003)	
Anger	62%	PO10	-0.51 (.002)	
		PO9	-0.44 (.009)	
	74%	PO10	-0.46 (.007)	
	50%	PO10	-0.35 (.046)	
		PO9	-0.45 (.007)	
Disgust	62%	PO10	-0.38 (.027)	
		PO9	-0.39 (.026)	
P1 mean amplitude	74%	PO10	-0.38 (.030)	
	50%	PO10	-0.38 (.029)	
		PO9	-0.43 (.012)	
Happiness	62%	PO10	-0.46 (.006)	
		PO9	-0.38 (.027)	
	74%	PO10	-0.39 (.023)	
		PO9	-0.46 (.007)	
Sadness	62%	PO10	-0.53 (.002)	
		PO9	-0.50 (.003)	
	74%	PO10	-0.41 (.018)	
		PO9	-0.53 (.001)	
Surprise	62%	PO10	-0.49 (.004)	
		PO9	-0.41 (.017)	
	74%	PO10	-0.46 (.007)	
N170 mean amplitude	Fear	62%	TP9	-0.36 (.035)

Tableau 4.6 Significant correlations (*p* values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception.

A)

				Estradiol	Progesterone	Testosterone	N170 mean amplitude at TP10 for happiness at 74%
Accuracy	Happiness		74%				.70 (.016)
	Surprise		62%			.61 (.047)	
P1 mean amplitude	PO9	Surprise		62%			-.65 (.042)
				50%		.63 (.037)	
N170 mean amplitude	TP9	Fear		62%	.69 (.020)	.78 (.005)	
				74%		.79 (.004)	
		Anger		50%		.75 (.008)	
				62%	.69 (.019)	.70 (.017)	
		Disgust		62%		.70 (.016)	
				74%		.75 (.007)	
				50%	.71 (.014)	.72 (.012)	
		Happiness		62%	.69 (.020)	.77 (.006)	
				74%	.83 (.001)	.70 (.017)	
		Sadness		50%		.74 (.010)	
	Surprise		62%		.63 (.038)		
			74%	.65 (.030)	.70 (.016)		

B)

				Estradiol	Progesterone	Testosterone	P1 mean amplitude at PO9 for anger at 74%
Accuracy	Fear		50%			-0.53 (.013)	0.44 (.044)
	Anger		74%				
	Disgust		50%	-0.46 (.037)			
			62%	-0.53 (.013)			
	Happiness		50%	0.51 (.019)	0.44 (.044)		
			62%	0.62 (.003)	0.46 (.036)		
	Sadness		50%			-0.44 (.049)	
	Surprise		74%			0.43 (.049)	

Tableau 4.7 Significant correlations (*p* values in parentheses) between clinical variables, sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female concussed athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception.

A)

				Nb. of concussions	Time since the last concussion	Estradiol	Progesterone	Testosterone	P1 mean amplitude at PO10 for happiness at 74%	N170 mean amplitude at TP9 for fear at 62%	N170 mean amplitude at TP10 for anger at 74%
Accuracy		Fear	62%								
		Anger	74%								
		Disgust	50%								
			74%								
		Happiness	50%								
			74%								
P1 mean amplitude	PO10	Surprise	50%								
		74%									
N170 mean amplitude	TP9	Surprise	62%								
		Anger	62%								
		Disgust	50%								
		Happiness	62%								
		Surprise	74%								

B)

		Nb. of concussions	Time since the last concussion	Estradiol	Testosterone	P1 mean amplitude at PO10 for fear at 62%	P1 mean amplitude at PO9 for anger at 50%	N170 mean amplitude at TP10 for surprise at 74%
Accuracy	Fear	62%				-0.75 (.008)		
		50%					.74 (.010)	
	Anger	62%	.60 (.049)					
		74%	.80 (.003)					
	Disgust	50%	.66 (.028)					
		62%	.63 (.038)		-.61 (.047)			
	Happiness	62%			.69 (.019)			
	Sadness	50%				-.63 (.037)		
P1 mean amplitude	PO9	Surprise	74%					-.64 (.033)
N170 mean amplitude	TP9	Happiness	74%		.65 (.032)			
		Fear	50%	-.61 (.047)				
		Disgust	50%	-.63 (.037)				

Tableau 4.8 Significant correlations (*p* values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in female control athletes (A) naturally cycling and (B) those taking hormonal contraception.

A)

			Estradiol	Progesterone	Testosterone	N170 mean amplitude at TP10 for sadness at 74%
Accuracy	Fear	62%			0.82 (.025)	
	Anger	50%	.90 (.005)			
		62%	.78 (.040)			
	Disgust	74%			-0.76 (.048)	
	Sadness	74%				.77 (.043)
N170 mean amplitude	TP9	Surprise	-0.87 (.010)			
		50%		.86 (.013)		
	Happiness	62%		.79 (.033)		
		74%	.77 (.043)	.77 (.041)		



B)

				Estradiol	Progesterone	Testosterone	P1 mean amplitude at PO10 for fear at 62%	P1 mean amplitude at PO10 for anger at 62%	N170 mean amplitude at TP10 for fear at 50%	N170 mean amplitude at TP10 for fear at 62%	N170 mean amplitude at TP10 for fear at 74%
Accuracy	Fear	50%							.64 (.047)		
		62%			.78 (.008)				.66 (.040)		
		74%								.69 (.027)	
	Anger	62%									
		50%									
		50%									
Happiness	50%										
	50%										
	74%										
Surprise	74%										
	74%										
	74%										
P1 mean amplitude	PO10	Disgust	62%								
	PO9	Surprise	62%								
N170 mean amplitude	TP9	Disgust	62%								

Tableau 4.9 Significant correlations (*p* values in parentheses) between sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in male athletes.

			Estradiol	Progesterone	N170 mean amplitude at TP9 for surprise at 74%	
Accuracy	Disgust	50%	-0.35 (.039)	-0.54 (.001)		
		62%		-0.44 (.010)		
		74%		-0.42 (.013)		
P1 mean amplitude	PO9	Surprise 74%	-0.34 (.045)		-0.34 (.040)	
		Anger 74%				
		Sadness 74%				
		TP9				Fear 74%
						TP10
		Anger 62%				
		N170 mean amplitude				TP9
Disgust 50%						
50%						
Happiness 62%						
74%						
50%						
Sadness 62%						
74%						
50%						
Surprise 74%						
74%						

Tableau 4.10 Significant correlations (*p* values in parentheses) between clinical variables, sex hormone levels as well as emotion recognition behavioral and electrophysiological responses in male A) concussed and B) control athletes.

A)

			Nb. of concussions	Estradiol	Testosterone	P1 mean amplitude at PO10 for surprise at 74%	N170 mean amplitude at TP10 for happiness at 50%	N170 mean amplitude at TP9 for happiness at 62%	N170 mean amplitude at TP10 for happiness at 62%	N170 mean amplitude at TP9 for happiness at 74%	N170 mean amplitude at TP10 for happiness at 74%	N170 mean amplitude at TP9 for sadness at 74%
Accuracy	Happiness	50%					-0.52 (.034)					
		62%						-0.66 (.004)	-0.70 (.002)			
		74%								-0.53 (.028)	-0.61 (.009)	
	Sadness	74%										-0.59 (.013)
		50%		.55 (.022)								
Surprise	62%		.74 (.001)									
	74%		.66 (.004)			-0.54 (.026)						
PO9	Fear	50%	-0.52 (.033)									
		PO10	50%	-0.60 (.011)								
PO9	Fear	62%	-0.58 (.015)									
		PO10	62%	-0.61 (.010)	-0.51 (.039)							
PO9	Fear	74%	-0.67 (.003)									
		PO10	74%	-0.68 (.003)		.52 (.033)						
PO9	Anger	50%	-0.52 (.034)									
		PO10	50%	-0.57 (.017)								
PO9	Anger	62%	-0.61 (.010)									
		PO10	62%	-0.59 (.012)								
PO9	Anger	74%	-0.66 (.004)									
		PO10	74%	-0.67 (.003)								
PO9	Disgust	50%	-0.51 (.037)									
		PO10	50%	-0.59 (.013)								
PO9	Disgust	62%	-0.67 (.003)									
		PO10	62%	-0.63 (.007)								
PO9	Disgust	74%	-0.60 (.012)									

	PO10							
	PO9							
	PO10	50%						
	PO9							
	PO10	Happiness	62%					
	PO9							
	PO10		74%					
	PO9							
	PO10		50%					
	PO9							
	PO10	Sadness	62%					
	PO9							
	PO10		74%					
	PO9							
	PO10		50%					
	PO9							
	PO10	Surprise	62%					
	PO9							
	PO10		74%					
	TP9							.52 (.035)
	TP10		50%					
	TP9							
	TP10	Fear	62%					
	TP9							
	TP10		74%					
	TP9							
	TP10		50%					
	TP9							
	TP10	Anger	62%					
	TP9							
	TP10		74%					
	TP9							
	TP10		50%					
	TP9							
	TP10	Disgust	62%					
	TP9							
	TP10							
N170								
mean								
amplitude								

TP9					
TP10		74%			
			- .60 (.011)		.58 (.016)
TP9					
TP10		50%			
			- .52 (.032)		.54 (.026)
TP9	Happiness				
TP10		62%			
					.63 (.007)
TP9					
TP10		62%			
					.64 (.006)
TP9					
TP10		50%			
					.57 (.016)
TP9	Sadness				
TP10		62%			
			- .51 (.036)		.50 (.040)
TP9					
TP10		74%			
					.54 (.026)
TP9					
TP10		50%			
			- .56 (.021)		.55 (.022)
TP9	Surprise				
TP10		62%			
					.66 (.004)
TP9					
TP10		74%			
					.59 (.012)
					.50 (.043)

---

B)

				Estradiol	Progesterone	Testosterone	N170 mean amplitude at TP9 for surprise at 74%
Accuracy		Fear	62%				
		Disgust	50%				
		Surprise	74%				
P1 mean amplitude	PO9	Fear	74%				
		Happiness	50%				
			50%				
		Sadness	62%				
			74%				
		Surprise	62%				
			74%				
N170 mean amplitude	TP9	Fear	62%				
		Happiness	74%				
			50%				
		Sadness	74%				
		Surprise	50%				

## **CHAPITRE 5**

### **DISCUSSION GÉNÉRALE**

#### 5.1 Résumé des principaux résultats

La présente thèse porte sur les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions ainsi que les différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez des athlètes multi-commotionnés, asymptomatiques et testés au moins trois mois depuis leur dernière commotion. En utilisant des mesures plus complexes et qui se sont montrées sensibles dans différentes populations (e.g. tâche émotionnelle, enregistrement et analyse des données EEG), elle a permis de révéler des effets distincts sur les réponses comportementales et électrophysiologiques d'athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à une tâche de reconnaissance des émotions qui ont été rapportés dans trois articles différents et dont les résultats sont résumés dans les sous-sections suivantes.

##### 5.1.1 Article 1 – Différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales à une tâche de reconnaissance des émotions

Les résultats du premier article (chapitre 2) ont révélé des altérations comportementales de la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles chez les athlètes multi-commotionnés de sexe masculin, mais pas féminin. Ces altérations étaient observées pour les expressions négatives telles que la peur, la colère, le dégoût et la tristesse. Plus précisément, les athlètes commotionnés masculins avaient plus de difficultés à identifier ces expressions et avaient besoin d'une plus grande intensité émotionnelle pour les reconnaître lorsqu'elles étaient présentées, comparativement aux athlètes contrôles masculins et aux athlètes féminines commotionnées. Pour leur part, les athlètes féminines commotionnées et contrôles performaient de façon comparable à la tâche. Cet article a été le premier à suggérer des différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles, les athlètes multi-commotionnés masculins présentant des altérations comportementales de la reconnaissance des expressions négatives, alors que celles de sexe féminin ne montraient pas de telles altérations.

##### 5.1.2 Article 2 – Adaptation et validation de la tâche de reconnaissance des émotions en EEG

Le deuxième article (chapitre 3) rapporte les effets de l'émotion et de l'ambiguïté émotionnelle sur les réponses comportementales et électrophysiologiques de participants en santé à la tâche de reconnaissance des émotions adaptée à l'EEG.

Sur le plan comportemental, des effets de l'émotion ont été observés pour la précision et les temps de réaction, suggérant que la peur et la surprise étaient les émotions les plus difficiles à identifier, alors que la joie et la tristesse étaient les plus faciles. Des effets de l'ambiguïté émotionnelle ont aussi été observés pour ces deux mesures comportementales, la reconnaissance des émotions devenant plus précise et rapide avec la diminution de l'ambiguïté. Finalement, une interaction entre l'émotion et l'ambiguïté émotionnelle a été observée pour la précision des réponses, indiquant que la reconnaissance des émotions variait avec l'ambiguïté. Plus spécifiquement, la peur et la surprise étaient les émotions les plus difficiles à reconnaître, peu importe leur ambiguïté, et elles étaient suivies (en ordre croissant) par la colère, le dégoût, la joie et la tristesse à ambiguïté modérée à élevée, alors qu'elles étaient suivies par le dégoût, la tristesse, la colère et la joie à faible ambiguïté.

Sur le plan électrophysiologique, des effets de l'émotion ont été rapportés pour toutes les composantes ERP sensorielles précoces. En ce qui concerne la P1, son amplitude était plus grande pour les expressions faciales à prédominance de colère et de peur que pour celles de dégoût aux électrodes occipitales et pariéto-occipitales de la ligne médiane. Elle était aussi plus grande pour les expressions à prépondérance de colère et de dégoût que pour celles de surprise aux électrodes temporo-pariétales. De façon semblable, la N1 était plus ample pour les expressions prédominantes de dégoût que pour celles de surprise aux électrodes pariétales. Pour ce qui est de la N170, des différences d'amplitude ont été observées pour les expressions faciales à prépondérance de colère comparativement à celles de joie, de tristesse et de surprise aux électrodes occipitales, pariétales et pariéto-occipitales droites. Il n'y avait toutefois pas d'effet de l'ambiguïté émotionnelle, ni d'interaction entre l'émotion et l'ambiguïté pour aucune de ces composantes. Ces résultats suggèrent que le traitement des expressions faciales émotionnelles, peu importe leur ambiguïté, se produit de façon précoce dans le cerveau.

### 5.1.3 Article 3 – Différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche de reconnaissance des émotions validée en EEG

Contrairement au premier article (chapitre 2), les résultats du dernier article (chapitre 4) n'ont pas montré de différences dans les réponses comportementales des athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin à la tâche de reconnaissance des émotions adaptée à l'EEG. Ils ont toutefois révélé des effets des commotions cérébrales multiples sur les composantes ERP sensorielles précoces en réponse à des expressions faciales émotionnelles, l'amplitude de la N170 des athlètes commotionnés étant plus grande que celle des contrôles. Ils ont également révélé des différences liées au sexe dans les réponses électrophysiologiques des athlètes multi-commotionnés, l'amplitude de la P1 des athlètes commotionnés masculins étant plus petite que celle des contrôles du même sexe. Ces différences sexuelles ne semblaient



toutefois pas expliquées par des variations dans les concentrations des hormones sexuelles chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin.

Dans l'ensemble, ces trois articles de thèse ont des implications importantes sur les plans clinique et théorique. Sur le plan clinique, ils soulignent la pertinence d'évaluer la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés à l'aide de mesures sensibles et de prendre en considération le sexe de l'athlète, les athlètes commotionnés masculins et féminins présentant des patrons différents d'altérations comportementales et électrophysiologiques. Sur le plan théorique, ils soulèvent des questions sur les mécanismes responsables des effets observés (e.g. hormones sexuelles, réorganisation fonctionnelle), mais également sur les aspects méthodologiques pouvant contribuer aux différences dans les résultats entre les études sur les émotions (e.g. stimuli, analyses statistiques des données EEG). Bien que certains éléments aient déjà été abordés dans les articles, les sections suivantes en discuteront de façon plus détaillée afin d'approfondir la réflexion et apporter de nouveaux éléments de réponse, souligner les limites de ce projet de recherche et suggérer des pistes de recherches futures.

## 5.2 Implications

### 5.2.1 Mécanismes responsables des différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur la reconnaissance des émotions

Les résultats du premier article (chapitre 2) ont révélé des différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses comportementales à la tâche de reconnaissance des émotions, les athlètes multi-commotionnés masculins ayant plus de difficultés à identifier les émotions négatives et nécessitant une plus grande intensité émotionnelle pour les reconnaître que les contrôles du même sexe, alors qu'il n'y avait pas de différences dans la performance entre les athlètes féminines commotionnées et contrôles. Ces résultats sont cohérents avec ceux de recherches récentes qui ont rapporté des différences sexuelles dans la reconnaissance émotionnelle chez les patients TCC modéré à sévère (Rigon *et al.*, 2016; Turkstra *et al.*, 2020; Zupan *et al.*, 2017). Dans une de ces études, il a été observé que les hommes qui avaient subi un TCC modéré à sévère performaient moins bien que les participants contrôles à une tâche de reconnaissance des émotions, alors que les femmes TCC et contrôles performaient de façon comparable (Rigon *et al.*, 2016). Les femmes TCC surpassaient également leurs homologues masculins sur la tâche émotionnelle. Dans une autre de ces études, les femmes étaient meilleures que les hommes à reconnaître la peur et les expressions faciales émotionnelles présentées à intensité élevée après un TCC sévère (Zupan *et al.*, 2017).

Afin d'expliquer ces différences liées au sexe, il a été proposé que les femmes seraient « protégées » des effets potentiellement négatifs des TCC sur la reconnaissance des émotions en raison de leur meilleure capacité à identifier les émotions avant une atteinte cérébrale traumatique, ce qui leur permettrait de mieux performer aux tâches émotionnelles après un TCC (Rigon *et al.*, 2016; Zupan *et al.*, 2017). Des analyses additionnelles sur la performance des participants contrôles du premier article (chapitre 2) n'ont cependant pas permis de confirmer cette hypothèse. En effet, les résultats de ces analyses n'ont pas révélé de différences significatives dans la précision des réponses, ni le seuil d'intensité entre les hommes et les femmes contrôles (tous les  $F_s < 1.61$ , tous les  $p_s > .209$ ) (voir les tableaux 5.1 et 5.2 dans les Annexes D et E pour les statistiques descriptives pour la précision et le seuil d'intensité, respectivement). De façon semblable, les résultats des analyses sur la performance des participants en santé du deuxième article (chapitre 3) n'ont pas non plus révélé de différences significatives dans la précision des réponses, le seuil d'intensité, ni les temps de réaction entre les hommes et les femmes (tous les  $F_s < 1.75$ , tous les  $p_s > .183$ ) (voir les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5 dans les Annexes F, G et H pour les statistiques descriptives pour la précision, les temps de réaction et le seuil d'intensité, respectivement).

Plus récemment, il a été suggéré que les hormones sexuelles pourraient contribuer aux différences liées au sexe dans les commotions cérébrales (Covassin et Elbin, 2011; Covassin, Elbin, Crutcher, *et al.*, 2013; Covassin *et al.*, 2018; Dick, 2009; Merritt *et al.*, 2019; Reddy et Collins, 2009; Resch *et al.*, 2017) et la reconnaissance des émotions (Kret et De Gelder, 2012; Saylik *et al.*, 2018). Les résultats du troisième article (chapitre 4) n'ont toutefois pas révélé d'associations significatives entre la performance à la tâche de reconnaissance émotionnelle et les concentrations des hormones sexuelles chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin, autant chez celles cyclant naturellement que celles prenant des contraceptifs hormonaux. Plusieurs facteurs méthodologiques peuvent néanmoins avoir contribué à l'absence de corrélations significatives dans notre étude (e.g. petit échantillon, manque de puissance statistique, exacerbation de ces enjeux avec la stratification des athlètes féminines selon la prise de contraception hormonale, devis transversal vs. longitudinal, mesures hormonales prises dans la phase chronique des commotions) (Gangestad *et al.*, 2016; Gonzales et Ferrer, 2016; Shirazi *et al.*, 2020). Plus d'études, notamment des recherches longitudinales (e.g. mesures hormonales dans les phases aiguë, subaiguë et chronique des commotions cérébrales) portant sur de plus grands échantillons d'athlètes commotionnés, incluant des femmes cyclant naturellement et d'autres utilisant des contraceptifs hormonaux, sont donc nécessaires afin de mieux comprendre les associations entre les commotions, la reconnaissance des émotions et les hormones sexuelles.

Alternativement, il est possible que des différences liées au sexe dans les effets des commotions cérébrales sur le traitement neuronal des émotions puissent sous-tendre les difficultés de reconnaissance des émotions négatives observées chez les athlètes commotionnés masculins dans le premier article (chapitre 2). Les résultats du troisième article (chapitre 4) ont en effet révélé des différences sexuelles dans les effets des commotions cérébrales multiples sur les réponses électrophysiologiques à la tâche de reconnaissance émotionnelle, les athlètes multi-commotionnés masculins présentant une diminution de l'amplitude de la P1 comparativement aux contrôles du même sexe, alors qu'il n'y avait pas de différences entre les athlètes féminines commotionnées et contrôles. La P1 visuelle étant associée à l'attention et la perception visuelles (Hillyard *et al.*, 1998; Luck, 2014; Luck *et al.*, 2000; Vogel et Luck, 2000), la diminution de l'amplitude de cette composante chez les athlètes commotionnés masculins pourrait refléter des difficultés à porter attention et traiter les caractéristiques visuelles des stimuli, dans ce cas-ci des expressions faciales émotionnelles, lesquelles pourraient contribuer aux difficultés de reconnaissance des émotions rapportées dans la première étude. Les émotions négatives (i.e. peur, colère, dégoût, tristesse) seraient particulièrement affectées en raison de leurs caractéristiques faciales communes (e.g. sourcils froncés, mâchoire élargie), les rendant plus difficiles à distinguer (Smith, M. L. *et al.*, 2005). L'origine de cette altération électrophysiologique spécifique aux athlètes commotionnés masculins reste cependant à déterminer, les analyses supplémentaires n'ayant pas révélé de différences significatives dans l'amplitude de la P1 entre les athlètes contrôles de sexe masculin et féminin (tous les  $F_s < 2.46$ , tous les  $p_s > .092$ ), ni d'associations significatives avec les concentrations des hormones sexuelles. Il a toutefois été proposé que les régions et structures impliquées dans la reconnaissance des émotions pourraient être préférentiellement touchées chez les hommes TCC (Rigon *et al.*, 2016). Des recherches futures utilisant des méthodes de neuroimagerie avancées (e.g. imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ou en tenseur de diffusion) chez des hommes et des femmes TCC permettront de tester cette hypothèse.

### 5.2.2 Modèle théorique des différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions

Dans une récente revue de la littérature, Turkstra *et al.* (2020) ont proposé un modèle théorique afin d'expliquer les différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions. Ces auteurs ont suggéré un modèle mettant l'accent sur les facteurs socioculturels, c'est-à-dire les différences dans la socialisation des jeunes garçons et filles pour expliquer les différences sexuelles dans les habiletés sociocognitives d'une part et d'autre part, les différences dans les attentes sociétales en termes de comportements socialement acceptables chez les hommes et les femmes après un TCC. Selon ce modèle, la socialisation des jeunes filles leur conférerait un léger avantage sur le plan des habiletés sociocognitives et ainsi, une plus grande « résistance » aux effets des TCC sur la cognition sociale. Cependant, l'étendue des

comportements socialement admis serait plus étroite chez les femmes, ce qui ferait en sorte qu'elles se percevraient (de même que leurs proches les percevraient) comme étant moins adaptées dans les rôles traditionnels féminins après un TCC. À l'inverse, la socialisation des jeunes garçons ne leur confèreraient pas un tel avantage sur le plan des habiletés sociocognitives et par conséquent, ils seraient plus vulnérables aux effets des TCC sur la cognition sociale. Cette vulnérabilité accrue serait toutefois compensée par la plus grande étendue des comportements socialement acceptables chez les hommes. Ainsi, les résultats de cette interaction entre les différences sexuelles dans la socialisation et les comportements socialement admis après un TCC pourraient révéler des différences entre les scores objectifs d'une personne aux tâches sociocognitives ainsi que son évaluation subjective et celle de ses proches à des échelles mesurant le fonctionnement social.

Cependant, et bien que cette hypothèse soit intéressante, les résultats des premier et dernier articles de thèse (chapitres 2 et 4) ne semblent pas supporter ce modèle théorique misant sur des facteurs socioculturels pour expliquer les différences liées au sexe dans les effets des TCC sur la reconnaissance des émotions. En effet, et tel que mentionné précédemment, les analyses additionnelles sur la performance (i.e. précision des réponses, seuil d'intensité et temps de réaction) des participants contrôles n'ont pas révélé de différences significatives entre les hommes et les femmes (voir les Annexes D à H). Il est alors possible que les effets des TCC et les différences sexuelles dans les effets des TCC sur la reconnaissance émotionnelle puissent s'expliquer par des facteurs davantage biologiques, les régions et structures principalement affectées par ces atteintes étant aussi celles impliquées dans le traitement des émotions (e.g. régions frontotemporales, structures du système limbique telles que l'amygdale et l'hippocampe) (D'Hondt *et al.*, 2017; Dal Monte *et al.*, 2013; Drapeau, 2011; Genova *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2011; McDonald, S., 2013; Rigon *et al.*, 2017). Ces régions et structures pourraient être préférentiellement touchées chez les hommes, mais cette hypothèse reste à investiguer avec plus d'études de neuroimagerie (Rigon *et al.*, 2016).

### 5.2.3 Mécanismes compensatoires chez les athlètes commotionnés

Dans le troisième article de thèse (chapitre 4), les athlètes commotionnés présentaient une augmentation de l'amplitude de la N170 comparativement aux contrôles, malgré une performance normale à la tâche de reconnaissance des émotions (i.e. précision des réponses, temps de réaction, seuil d'intensité). Tel que mentionné dans la discussion de l'article, ces résultats pourraient suggérer un mécanisme compensatoire chez les athlètes commotionnés par lequel ils recruteraient des ressources neuronales additionnelles afin d'atteindre un certain niveau de performance à la tâche émotionnelle. Cette hypothèse est partiellement supportée par la corrélation significative entre l'amplitude de la N170 et la précision des réponses chez les athlètes commotionnés, mais pas les contrôles, indiquant que les athlètes commotionnés qui avaient une

plus grande amplitude de la N170 étaient aussi ceux qui performaient le mieux à la tâche. Dans l'ensemble, ces résultats sont cohérents avec le modèle théorique de Molfese (2015) qui propose que les réseaux neuronaux deviennent spatialement et temporellement instables après une commotion cérébrale, altérant leur fonctionnement (e.g. vitesse et précision de la performance). Pour compenser cette altération fonctionnelle post-commotion, de nouveaux réseaux neuronaux locaux et distaux seraient alors formés et recrutés lors de l'exécution de tâches, résultant en des réponses neuronales différentes chez les athlètes commotionnés et les personnes qui ont subi un TCCL (e.g. augmentation de l'amplitude et de la latence de composantes ERP, différences dans les patrons d'activations cérébrales).

En plus d'être cohérents avec ce modèle théorique, nos résultats sont concordants avec ceux d'études empiriques qui ont rapporté des effets des commotions cérébrales et des TCCL sur les réponses comportementales et neuronales lors de tâches cognitives pouvant suggérer une réorganisation fonctionnelle ou des mécanismes compensatoires (Chen *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2004; Desjardins *et al.*, 2021; Hudac *et al.*, 2018; Ledwidge et Molfese, 2016; Shah-Basak *et al.*, 2018). Dans une première étude, Ledwidge et Molfese (2016) ont observé que les joueurs de football avec et sans historique de commotions performaient de façon comparable à une tâche *oddball* (i.e. précision des réponses, temps de réaction). Cependant, les athlètes commotionnés avaient une plus grande amplitude de la N2 et de la P3b ainsi qu'une plus longue latence de la P3b que les contrôles. Ils présentaient aussi une plus grande activité dans le gyrus pariétal inférieur gauche, une région impliquée dans l'attention et la mémoire de travail, suggérant le recrutement de ressources neuronales compensatoires pour répondre aux demandes cognitives de la tâche. Dans une deuxième étude, ces auteurs ont rapporté des résultats semblables (Hudac *et al.*, 2018). En dépit d'une performance normale sur une tâche de mémoire de travail, les joueurs de football avec un historique de commotions cérébrales présentaient une augmentation de l'amplitude de la P1 et de la P3 ainsi que de la latence de la P1 comparativement à ceux sans antécédents. Ils présentaient également une augmentation des activations dans le lobule pariétal supérieur gauche, une région associée à la manipulation de l'information en mémoire de travail, lorsque la tâche devenait plus difficile. Ces résultats ont récemment été répliqués dans un échantillon de jeunes adultes et de personnes âgées ayant subi un TCCL (Desjardins *et al.*, 2021). Dans cette étude, les participants avec et sans TCCL performaient de façon comparable à une tâche d'attention visuo-spatiale. Toutefois, alors que les participants contrôles présentaient une plus grande activité dans l'hémisphère droit que gauche lors de la tâche, les patients TCCL montraient le patron d'activations opposé, avec une plus grande activité dans l'hémisphère gauche que droit, suggérant une réorganisation fonctionnelle. Bien que nous n'ayons pas effectué d'analyses de latence ou de localisation de sources, les résultats de notre troisième étude vont dans le sens de celles susmentionnées, lesquelles suggèrent que l'augmentation des réponses neuronales (e.g. augmentation de l'amplitude et de la latence

des composantes ERP ainsi que des activations cérébrales) pourrait indiquer le recrutement de ressources neuronales compensatoires afin de répondre aux demandes des tâches et ainsi, atteindre un certain niveau de performance.

#### 5.2.4 Sensibilité des tâches de reconnaissance des émotions

Les difficultés de reconnaissance des émotions négatives chez les athlètes commotionnés masculins observées dans le premier article (chapitre 2) contrastent avec les résultats de deux autres études qui n'ont pas rapporté de telles difficultés chez des athlètes commotionnés et des patients TCCL simple, ce qui pourrait s'expliquer par des différences dans les tâches émotionnelles employées (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; Drapeau, J. *et al.*, 2017). Dans l'une de ces études, Carrier-Toutant *et al.* (2018) ont utilisé une tâche de reconnaissance des émotions composée de visages neutres ainsi que d'expressions faciales de joie et de colère présentées à intensité maximale (i.e. 100%) auprès d'athlètes commotionnés et contrôles. Il est possible que ces auteurs n'aient pas observé de différences dans la performance (i.e. précision des réponses, temps de réaction) entre les athlètes commotionnés et contrôles en raison de la facilité de la tâche, qui ne demandait que de discriminer des expressions faciales neutres et émotionnelles ainsi que de différencier deux émotions de valence opposée (i.e. joie pour les émotions positives et colère pour les négatives) à pleine intensité. Dans l'autre étude, Drapeau, J. *et al.* (2017) ont présenté des expressions faciales de joie, de peur et de tristesse à intensité maximale à des participants en santé, des patients TCCL simple et complexe ainsi que des patients TCC modéré à sévère. Ces auteurs ont rapporté que les patients TCCL complexe et TCC modéré à sévère avaient plus de difficultés à identifier les expressions de peur que ceux qui avaient subi un TCCL simple et les participants contrôles, ce qui pourrait s'expliquer par l'inclusion de deux émotions négatives, rendant leur discrimination plus difficile. Cependant, la tâche n'était toujours pas suffisamment sensible pour différencier les patients TCCL simple des contrôles.

Contrairement à ces deux études, nous avons utilisé une tâche de reconnaissance des émotions plus complexe consistant en la présentation de mélanges d'expressions faciales émotionnelles (e.g. peur/colère, dégoût/joie) dans différentes proportions (e.g. 26/74%, 38/62%, 50%) dans notre premier article (chapitre 2). Cette tâche permet d'évaluer plusieurs aspects de la performance (e.g. précision des réponses, temps de réaction, confusion entre les émotions), dont certains sont plus sensibles à de légers changements dans la reconnaissance émotionnelle (i.e. seuil d'intensité). Elle est aussi plus sensible en raison de sa difficulté, car elle demande de discriminer entre six émotions (i.e. peur, colère, dégoût, joie, tristesse, surprise) présentées à sept intensités différentes (i.e. 14%, 26%, 38%, 50%, 62%, 74%, 86%). Ainsi, la difficulté de la tâche combinée à la sensibilité de ses mesures ont permis de révéler des altérations comportementales de la

reconnaissance des émotions négatives chez les athlètes commotionnés masculins dans le premier article (chapitre 2).

Cependant, et tel que mentionné précédemment, ces altérations n'étaient plus observées dans le troisième article (chapitre 4), ce qui pourrait s'expliquer par les modifications apportées à la tâche pour l'adapter à l'EEG (i.e. avoir une tâche d'une durée raisonnable tout en ayant un nombre suffisant d'essais par condition à analyser). En effet, nous avons enlevé les intensités les plus faible et élevée (i.e. 14/86%) afin de conserver les expressions faciales émotionnelles les plus ambiguës (i.e. 26/74%, 38/62%, 50%), qui nous semblaient mieux discriminer les athlètes commotionnés des contrôles. Il est toutefois possible qu'en ce faisant, nous avons retiré les intensités pour lesquelles des différences étaient observées, les expressions plus ambiguës étant plus difficiles à reconnaître pour tous les participants. Zupan *et al.* (2017) ont d'ailleurs rapporté des différences entre les hommes et les femmes TCC sévère pour les intensités les plus élevées, mais pas celles plus faibles. Afin de tester cette hypothèse, des analyses additionnelles ont été effectuées sur les données du premier article (chapitre 2). Les résultats de ces analyses ont révélé une interaction significative entre l'intensité et le sexe,  $F(1.97, 90.57) = 3.87, p = .025, \eta_p^2 = .08$ , indiquant que les femmes étaient significativement meilleures que les hommes à identifier les émotions présentées à 62%, 74% et 86% d'intensité (précision des réponses des femmes pour les émotions présentées à 62% :  $75.53 \pm 5.07\%$ , à 74% :  $90.87 \pm 4.51\%$  et à 86% :  $94.25 \pm 3.69\%$ , précision des hommes pour les émotions présentées à 62% :  $72.56 \pm 5.97\%$ , à 74% :  $88.46 \pm 5.69\%$  et à 86% :  $91.59 \pm 5.38\%$ ,  $ps = .020-.032$ ), alors qu'il n'y avait pas de différences significatives pour celles présentées à 50% (femmes :  $46.06 \pm 2.28\%$ , hommes :  $45.39 \pm 3.31\%$ ,  $p = .592$ ) (voir le tableau 5.6 dans l'Annexe I pour les statistiques descriptives pour la précision des réponses selon l'intensité chez les hommes et les femmes). Bien que non-significative, une tendance semblable a été observée entre l'intensité et le groupe,  $F(1.97, 90.57) = 2.37, p = .101, \eta_p^2 = .05$ , suggérant que les athlètes commotionnés avaient plus de difficultés à reconnaître les émotions présentées à 62%, 74% et 86% d'intensité (précision des réponses des athlètes commotionnés pour les émotions présentées à 62% :  $72.61 \pm 5.68\%$ , à 74% :  $88.48 \pm 5.68\%$  et à 86% :  $91.65 \pm 4.94\%$ , précision des athlètes contrôles pour les émotions présentées à 62% :  $75.17 \pm 5.52\%$ , à 74% :  $90.60 \pm 4.74\%$  et à 86% :  $93.92 \pm 4.45\%$ , tous les  $ps = .071-.094$ ), alors qu'il n'y avait pas de différences pour celles présentées à 50% (athlètes commotionnés :  $45.42 \pm 2.98\%$ , athlètes contrôles :  $45.97 \pm 2.75\%$ ,  $p = .665$ ) (voir le tableau 5.7 dans l'Annexe J pour les statistiques descriptives pour la précision des réponses selon l'intensité chez les athlètes commotionnés et contrôles). Les résultats n'ont toutefois pas révélé d'interaction significative entre l'intensité, le sexe et le groupe ( $F = 0.39, p = .678$ ) (voir le tableau 5.8 dans l'Annexe K pour les statistiques descriptives pour la précision des réponses selon l'intensité chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin). Globalement, ces résultats suggèrent que les intensités les plus élevées étaient effectivement celles où l'on

observait le plus de différences entre les groupes, alors que les expressions faciales les plus ambiguës, celles présentées à 50% d'intensité, étaient plus difficiles à reconnaître pour tous les participants et donc, ne permettaient pas de révéler des différences dans la performance entre les groupes.

Bien qu'elle n'ait plus permis de discriminer les athlètes commotionnés des contrôles, notre tâche a néanmoins révélé des altérations électrophysiologiques de la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés dans le troisième article (chapitre 4). Ces résultats sont concordants avec ceux d'études antérieures qui ont rapporté des altérations des composantes ERP sensorielles précoces en réponse à des expressions faciales émotionnelles chez les athlètes commotionnés et les patients TCCL, en l'absence de différences dans la performance, suggérant une plus grande sensibilité de l'EEG aux effets des atteintes cérébrales traumatiques (Carrier-Toutant *et al.*, 2018; D'Hondt *et al.*, 2017; Drapeau, J. *et al.*, 2019; Zuj *et al.*, 2017).

Dans l'ensemble, les résultats des premier et dernier articles de thèse (chapitres 2 et 4) ont montré des altérations comportementales et électrophysiologiques de la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés, soulignant l'importance d'utiliser des mesures sensibles aux effets des commotions cérébrales. Notons toutefois que malgré leur sensibilité, les mesures utilisées dans ces deux études ne sont pas adaptées à la réalité clinique en raison de leur durée et du matériel nécessaire (i.e. temps d'administration de plus de 30 minutes, équipement EEG). Il serait important de développer des tâches de reconnaissance des émotions qui puissent être utilisées par des neuropsychologues cliniciens, qui sont souvent amenés à évaluer des patients présentant des difficultés socio-émotionnelles, mais qui sont limités dans leurs outils cliniques (e.g. questionnaires, tâches avec d'importantes limites méthodologiques et/ou psychométriques).

#### 5.2.5 Spécificité du déficit de reconnaissance des émotions négatives

Dans le premier article de thèse (chapitre 2), les résultats ont révélé un effet de valence émotionnelle, la reconnaissance des émotions négatives (i.e. peur, colère, dégoût, tristesse) étant altérée chez les athlètes commotionnés masculins, alors que celle des émotions positives (i.e. joie, surprise) était préservée. Ces résultats sont cohérents avec ceux de nombreuses études qui ont rapporté des déficits de reconnaissance des émotions, et plus particulièrement des émotions négatives, chez les patients TCC (Binder *et al.*, 2019; Drapeau, J. *et al.*, 2017; Mancuso *et al.*, 2015; Murphy *et al.*, 2021; Rigon *et al.*, 2018; Spikman *et al.*, 2013; Zupan *et al.*, 2014). Tel que mentionné dans la discussion de l'article, plusieurs facteurs peuvent expliquer cet effet de valence émotionnelle. Les émotions positives sont moins nombreuses que celles négatives, rendant leur discrimination plus facile (Adolphs *et al.*, 1996; Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Williams, C. et Wood, 2010). D'ailleurs, selon certains auteurs, la joie serait la seule « vraie » émotion



positive parmi les émotions de base, ce qui faciliterait sa reconnaissance (Adolphs *et al.*, 1996). La joie est aussi la seule émotion à être exprimée par le sourire, alors que les émotions négatives partagent plusieurs caractéristiques faciales (e.g. sourcils froncés, mâchoire élargie), les rendant plus difficiles à distinguer entre elles (Callahan *et al.*, 2011; Croker et McDonald, 2005; Smith, M. L. *et al.*, 2005; Williams, C. et Wood, 2010). En particulier, la peur et la surprise sont souvent confondues en raison de leurs caractéristiques communes (i.e. sourcils relevés, yeux écarquillés, bouche ouverte). Les résultats du deuxième article (chapitre 3) étayaient ces hypothèses, la peur et la surprise étant les émotions les plus difficiles à identifier alors que la joie était l'une des plus faciles.

Ainsi, les difficultés de reconnaissance des émotions négatives observées dans notre première étude et celles sur les patients TCC pourraient s'expliquer par les propriétés de ces émotions plutôt que par un déficit spécifique des émotions négatives. Des auteurs ont d'ailleurs rapporté un déficit global de reconnaissance des émotions, positives et négatives, chez les patients TCC lorsque la difficulté de la tâche était prise en considération (i.e. analyses de la performance en fonction de l'intensité de l'émotion) (Rosenberg *et al.*, 2015). Il serait intéressant de développer des tâches permettant de contourner ces limites (e.g. présentation d'émotions de base à différentes intensités et analyses selon l'intensité, inclusion d'émotions sociales) et de les utiliser pour mieux déterminer quelles émotions sont affectées après des atteintes cérébrales traumatiques et lesquelles sont préservées.

#### 5.2.6 Analyses statistiques des données EEG

Les résultats du deuxième article (chapitre 3) ont rapporté des effets de l'émotion pour toutes les composantes ERP sensorielles précoces (i.e. P1, N1, N170). Cependant, aucune de ces composantes n'était affectée par l'ambiguïté émotionnelle, ni par l'interaction entre l'émotion et l'ambiguïté. Les études antérieures portant sur les effets de l'émotion et de l'ambiguïté émotionnelle sur les composantes ERP sensorielles précoces ont révélé des résultats mitigés. En ce qui concerne l'effet de l'ambiguïté, une seule étude a observé que la N1 frontale est influencée par l'ambiguïté émotionnelle, alors que la N170 ne l'est pas (Kaminska *et al.*, 2020). Pour ce qui est de l'effet de l'émotion, plusieurs études ont montré que la P1 et la N1 sont modulées par les émotions négatives (Aguado *et al.*, 2012; Batty et Taylor, 2003; Holmes *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2010; Proverbio *et al.*, 2006; Smith, E. *et al.*, 2013; Zhang, D. *et al.*, 2013), alors que la N170 serait modulée à la fois par les émotions positives et négatives (Blau *et al.*, 2007; Hinojosa *et al.*, 2015; Rellecke *et al.*, 2011; Rellecke *et al.*, 2012; Roberge *et al.*, 2019; Schindler *et al.*, 2019; Turano *et al.*, 2017; Williams, L. M. *et al.*, 2006). Certaines études n'ont toutefois pas rapporté de modulation émotionnelle des composantes ERP sensorielles précoces (Krolak-Salmon *et al.*, 2001; Meeren *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2017), ce qui pourrait s'expliquer entre autres par des différences méthodologiques (e.g.

comparaison d'une émotion vs. de plusieurs émotions de valence positive et/ou négative avec un visage neutre) et statistiques (e.g. utilisation de méthodes conventionnelles ou plus avancées d'analyse des données EEG).

En effet, la majorité des études ont utilisé des méthodes traditionnelles d'analyse des données EEG, lesquelles consistent à effectuer un test statistique sur une amplitude moyenne. Une de ces méthodes consiste à se baser sur la recherche antérieure pour définir *a priori* une fenêtre temporelle et une ou des électrodes à analyser. Cependant, cette méthode est souvent trop rigide et diminue la puissance ou la probabilité de détecter des effets réels qui sont à l'extérieur de la fenêtre temporelle et des régions définies *a priori* (i.e. erreur de type II ou faux négatif) (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011). Une façon d'augmenter la flexibilité consiste alors à visualiser les données EEG et sélectionner l'électrode et la fenêtre temporelle où l'effet est maximal, mais est équivalente à réaliser des tests statistiques sur différentes électrodes et fenêtres temporelles et ne rapporter que celles où des différences sont observées (Fields et Kuperberg, 2020). Cette façon de faire a ainsi été associée au problème de « comparaisons multiples implicites », lesquelles augmentent la probabilité de rapporter un effet qui n'est pas réel (i.e. erreur de type I ou faux positif) (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011; Luck et Gaspelin, 2017).

Les analyses univariées de masse représentent une alternative intéressante permettant d'augmenter la flexibilité et la puissance statistique (i.e. diminuer l'erreur de type II), tout en contrôlant adéquatement l'erreur de type I (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011). Concrètement, ces analyses consistent à effectuer des tests statistiques sur l'amplitude à chaque électrode et chaque point dans le temps en corrigeant de façon appropriée pour le nombre de tests (Fields et Kuperberg, 2020; Groppe *et al.*, 2011). Cette technique d'analyse des ERP nous a ainsi permis de révéler des effets de l'émotion à des électrodes et dans des fenêtres temporelles correspondant à la P1, la N1 et la N170. Notons toutefois que l'effet de l'émotion pour la N170 était observé un peu plus tardivement que ce qui a été précédemment rapporté (i.e. de 158 à 198 ms vs. de 140 à 180 ms), ce qui pourrait s'expliquer par notre technique d'analyse. Une recherche récente ayant utilisé la même technique a elle aussi observé une modulation émotionnelle de la N170 avec un effet maximal après son pic, vers 190 ms (Durston, A. J. et Itier, 2021). Globalement, ces résultats suggèrent que les analyses univariées de masse pourraient révéler des effets dans des régions et des fenêtres temporelles autres que celles auparavant rapportées. Il faudrait cependant trouver des façons d'adapter ces techniques d'analyse à la recherche clinique, les patients présentant souvent des caractéristiques (e.g. différences de latence) qui empêchent l'utilisation de ces analyses.

### 5.3 Limites et pistes de recherches futures

Les articles de la présente thèse comportent tous des limites méthodologiques qu'il serait important d'adresser dans de futures recherches. Premièrement, dans le premier article (chapitre 2), nous n'avons pas inclus de tâches contrôles nous permettant d'exclure l'hypothèse selon laquelle les difficultés de reconnaissance des émotions négatives étaient liées à des difficultés de perception visuelle ou des visages. Nous avons aussi moyenné la performance pour les émotions présentées de 50 à 86% d'intensité et analysé les émotions positives et négatives séparément, alors que des analyses incluant toutes les émotions (i.e. peur, colère, dégoût, joie, tristesse, surprise) et les intensités (i.e. 50%, 62%, 74%, 86%) auraient été plus appropriées et nous auraient permis de mieux caractériser les difficultés observées. Ces limites du premier article ont été adressées dans les articles suivants, mais notons que plus d'études sur les effets de l'émotion et de l'ambiguïté émotionnelle sont nécessaires afin de confirmer les résultats rapportés.

Deuxièmement, dans nos premier et dernier articles (chapitres 2 et 4), l'historique de commotions cérébrales était auto-rapporté par les participants, ce qui a pu mener à une sous-estimation du nombre de commotions subies. De plus, notre échantillon était composé d'un petit nombre d'athlètes multi-commotionnés, asymptomatiques et testés dans la phase chronique des commotions cérébrales, limitant la généralisation des résultats. Le petit nombre d'athlètes féminines et le fait qu'elles prenaient majoritairement des contraceptifs hormonaux nous ont notamment limité dans nos analyses exploratoires des associations entre les hormones sexuelles, la reconnaissance des émotions et les commotions (i.e. analyses corrélationnelles vs. tests de différences de moyenne entre les groupes). Il serait important d'effectuer des études longitudinales (i.e. dans les phases aiguë, subaiguë et chronique des commotions cérébrales) sur de plus grands échantillons d'athlètes uni- et multi-commotionnés de sexe masculin et féminin, incluant des femmes cyclant naturellement et d'autres utilisant une contraception hormonale pour répliquer et étendre la portée de nos résultats. Il serait également intéressant d'investiguer les mécanismes responsables des différences liées au sexe dans les effets des commotions autres que les hormones sexuelles (e.g. mécanismes biomécaniques, socioculturels). Il serait finalement important de valider l'historique de commotions cérébrales rapporté par les participants avec les données (e.g. dossier médical) et les observations d'autres professionnels de la santé (e.g. médecins), lorsque possible.

Troisièmement, notre tâche de reconnaissance des émotions était composée de visages masculins seulement et n'incluait pas de visages féminins, ce qui pourrait avoir contribué aux différences sexuelles rapportées dans nos articles. En outre, notre tâche ne comportait pas d'expressions faciales émotionnelles présentées à intensité maximale (i.e. 100%), ce qui nous aurait permis de mieux évaluer l'effet de chaque émotion, sans contamination par les autres et ainsi, mieux comparer nos résultats avec ceux des études antérieures. Elle ne

comportait pas non plus de visages neutres, ni de stimuli autres que des visages (e.g. maisons, voitures), ce qui nous a limité dans nos analyses des données EEG (e.g. calculer des ondes de différences pour isoler les composantes ERP sensorielles précoces associées au traitement des émotions et pas des visages ou de la perception visuelle en général). Enfin, et bien que l'utilisation d'expressions faciales émotionnelles d'un seul acteur ait permis de minimiser et/ou contrôler certains biais (e.g. éviter ou diminuer l'apparition de dents « fantômes » entre la colère et les autres émotions chez certains acteurs, contrôler les effets d'identité), ce choix méthodologique peut avoir entraîné d'autres biais (e.g. habitude).

Quatrièmement, dans le dernier article (chapitre 4), nos analyses ont porté sur les composantes ERP sensorielles précoces telles que la P1, la N1 et la N170. Cependant, les composantes plus tardives telles que la P3 sont elles aussi affectées par les commotions cérébrales et modulées par les émotions. Il pourrait être intéressant de les analyser afin de déterminer si des différences liées au sexe dans les effets des commotions sont aussi observées pour ces composantes. De plus, nos résultats d'une augmentation de l'amplitude de la N170 chez les athlètes commotionnés en l'absence de différences dans la performance à la tâche de reconnaissance des émotions ont soulevé l'hypothèse de mécanismes compensatoires chez les athlètes commotionnés, hypothèse qui pourrait être testée à l'aide de différentes mesures (e.g. EEG, imagerie par résonance magnétique fonctionnelle) et analyses (e.g. de latence, de localisation de sources) dans des recherches futures.

Finalement, considérant le rôle des émotions dans l'adaptation, la communication et les relations sociales, mais également dans le développement et le maintien de certains troubles de santé mentale (e.g. anxiété, dépression), il serait important d'évaluer l'impact fonctionnel des altérations comportementales et électrophysiologiques de reconnaissance des émotions dans la vie quotidienne des athlètes commotionnés. S'il est démontré que ces altérations ont effectivement un impact sur leur qualité de vie, il pourrait être pertinent d'adapter les programmes d'intervention développés pour les patients TCC modéré à sévère à ceux qui ont subi des blessures plus légères telles que des commotions cérébrales et des TCCL ainsi que d'évaluer leur efficacité chez ces patients.

## CONCLUSION

Les femmes ont souvent été ignorées ou négligées dans la recherche clinique, les études les excluant ou les groupant avec les hommes sans prendre en considération le sexe des participants dans l'analyse des résultats, ne permettant pas d'apprécier les différences liées au sexe dans l'effet de conditions médicales ou de traitements. Cependant, dans les dernières années, la recherche sur les commotions cérébrales a commencé à s'intéresser au sexe de l'athlète et a ainsi permis de révéler des différences sexuelles dans les effets des commotions, les athlètes féminines subissant plus de commotions, rapportant plus de symptômes et prenant plus de temps pour récupérer et retourner au jeu après une commotion que leurs homologues masculins (Covassin *et al.*, 2018; Koerte *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2018; McGroarty *et al.*, 2020; Merritt *et al.*, 2019; Niemeier, 2019; Resch *et al.*, 2017).

La présente thèse s'inscrit dans la continuité de ces études. Elle a été l'une des premières à s'intéresser aux effets des commotions cérébrales multiples dans un domaine négligé par la recherche, à savoir la reconnaissance des émotions. Elle a également été l'une des premières à s'intéresser aux différences liées au sexe dans la reconnaissance émotionnelle chez les athlètes multi-commotionnés et les mécanismes responsables de ces différences. Elle a ainsi été la première à révéler des altérations comportementales de la reconnaissance des émotions négatives chez les athlètes commotionnés de sexe masculin, mais pas féminin. Ces athlètes avaient plus de difficultés à identifier les émotions négatives et nécessitaient une plus grande intensité émotionnelle pour les reconnaître que les contrôles du même sexe, alors que les athlètes féminines commotionnées et contrôles performaient de façon comparable à la tâche émotionnelle. Après avoir adapté et validé la tâche en EEG, le présent projet de recherche a aussi permis d'investiguer les corrélats neuronaux de la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés. Les résultats ont ainsi rapporté que les athlètes commotionnés masculins présentaient une diminution de l'amplitude de la P1, une composante associée à l'attention et la perception visuelles, qui pourrait expliquer leurs difficultés de reconnaissance des émotions négatives. Ils ont également rapporté que les athlètes commotionnés de sexe masculin et féminin présentaient une augmentation de l'amplitude de la N170 en l'absence de différences dans la performance à la tâche émotionnelle, suggérant un mécanisme compensatoire leur permettant de performer normalement à la tâche. Enfin, avec les mesures hormonales, le projet a permis d'explorer certains mécanismes responsables des différences sexuelles dans la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin, bien qu'aucune association significative n'ait été observée entre les hormones sexuelles ainsi que les réponses comportementales et électrophysiologiques à la tâche émotionnelle.

Somme toute, cette thèse souligne l'importance d'évaluer la reconnaissance des émotions chez les athlètes commotionnés à l'aide de mesures sensibles et de prendre en considération le sexe de l'athlète, les athlètes commotionnés de sexe masculin et féminin présentant des patrons d'altérations comportementales et électrophysiologiques différents. Elle pourrait ainsi contribuer à l'amélioration des pratiques d'évaluation et de gestion des commotions cérébrales dans le sport, mais également au développement d'interventions visant à améliorer les habiletés socio-émotionnelles des athlètes commotionnés.

## ANNEXE A

### RÉPARTITION DES PARTICIPANTS DE CHAQUE GROUPE DU PREMIER ARTICLE SELON LE SPORT PRATIQUÉ

Tableau 5.1 Nombre et pourcentage de participants par groupe du premier article pratiquant chaque sport.

Sport	Hommes commotionnés (n = 10)	Hommes contrôles (n = 15)	Femmes commotionnées (n = 12)	Femmes contrôles (n = 13)
Hockey	6 (60%)	2 (13.3%)	1 (8.3%)	0 (0%)
Football	2 (20%)	7 (46.7%)	0 (0%)	0 (0%)
Soccer	1 (10%)	4 (26.7%)	9 (75%)	4 (30.8%)
Basketball	1 (10%)	0 (0%)	2 (16.7%)	5 (38.5%)
Flagfootball	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (7.7%)
Autres (sans contact)	0 (0%)	2 (13.3%)	0 (0%)	3 (23.1%)

## ANNEXE B

### RÉPARATION DES PARTICIPANTS DE CHAQUE GROUPE DU TROISIÈME ARTICLE SELON LE SPORT PRATIQUÉ

Tableau 5.2 Nombre et pourcentage de participants par groupe du troisième article pratiquant chaque sport.

Sport	Hommes commotionnés (n = 18)	Hommes contrôles (n = 19)	Femmes commotionnées (n = 17)	Femmes contrôles (n = 18)
Hockey	4 (22.2%)	1 (5.3%)	2 (11.8%)	0 (0%)
Football ou rugby	8 (44.4%)	0 (0%)	1 (5.9%)	0 (0%)
Soccer	2 (11.1%)	2 (10.5%)	3 (17.6%)	1 (5.6%)
Sports de combat	2 (11.1%)	3 (15.8%)	4 (23.5%)	0 (0%)
Ski ou snowboard	2 (11.1%)	0 (0%)	5 (29.4%)	0 (0%)
Cheerleading	0 (0%)	1 (5.3%)	1 (5.9%)	0 (0%)
Autres (avec contact)	0 (0%)	0 (0%)	1 (5.9%)	0 (0%)
Autres (sans contact)	0 (0%)	12 (63.2%)	0 (0%)	17 (94.4%)



## ANNEXE C

### RÉPARTITION DES ATHLÈTES FÉMININES DU TROISIÈME ARTICLE SELON LA PRISE DE CONTRACEPTION HORMONALE OU NON

Tableau 5.3 Nombre et pourcentage des athlètes féminines du troisième article ayant un cycle naturel ou prenant une contraception hormonale.

	Femmes commotionnées (n = 17)	Femmes contrôles (n = 18)
Cycle naturel	4 (23.5%)	7 (38.9%)
Contraception hormonale	11 (64.7%)	10 (55.6%)
Sans information	2 (11.8%)	1 (5.5%)

**ANNEXE D**

**PRÉCISION DES RÉPONSES SELON LE SEXE DES PARTICIPANTS CONTRÔLES**

**DU PREMIER ARTICLE**

Tableau 5.4 Précision des réponses (en %) des hommes et des femmes contrôles du premier article (M ± ET).

Émotion	Intensité	Hommes	Femmes
Peur	50%	22.81 ± 9.33%	21.20 ± 11.64%
	62%	56.00 ± 13.65%	52.14 ± 19.47%
	74%	81.04 ± 8.84%	74.70 ± 15.44%
	86%	86.07 ± 8.79%	83.25 ± 14.98%
Colère	50%	44.59 ± 16.60%	44.27 ± 11.24%
	62%	73.78 ± 15.54%	72.48 ± 13.92%
	74%	95.70 ± 5.54%	96.24 ± 4.83%
	86%	97.63 ± 3.41%	99.15 ± 1.45%
Dégoût	50%	60.59 ± 11.25%	63.93 ± 12.58%
	62%	80.89 ± 11.99%	83.25 ± 9.41%
	74%	88.59 ± 12.28%	90.43 ± 10.00%
	86%	90.37 ± 12.98%	90.94 ± 11.78%
Joie	50%	51.70 ± 21.37%	45.47 ± 17.42%
	62%	80.15 ± 13.19%	82.74 ± 14.55%
	74%	97.04 ± 4.65%	96.92 ± 4.93%
	86%	98.67 ± 2.89%	99.32 ± 1.40%
Tristesse	50%	62.37 ± 14.12%	60.34 ± 12.63%
	62%	86.37 ± 12.17%	88.55 ± 7.31%
	74%	94.81 ± 6.32%	96.75 ± 5.02%
	86%	97.48 ± 4.43%	98.29 ± 2.59%
Surprise	50%	34.37 ± 11.96%	39.83 ± 10.08%
	62%	71.11 ± 17.50%	75.04 ± 14.99%
	74%	84.74 ± 12.79%	90.43 ± 10.08%
	86%	90.22 ± 11.42%	96.07 ± 3.87%

**ANNEXE E**

**SEUIL D'INTENSITÉ SELON LE SEXE DES PARTICIPANTS CONTRÔLES DU  
PREMIER ARTICLE**

Tableau 5.5 Seuil d'intensité (en %) des hommes et des femmes contrôles du premier article (M ± ET).

Émotion	Hommes	Femmes
Peur	60.68 ± 4.32%	63.80 ± 8.40%
Colère	51.20 ± 5.88%	51.80 ± 4.20%
Dégoût	49.04 ± 7.68%	47.96 ± 5.64%
Joie	49.04 ± 7.68%	50.72 ± 5.64%
Tristesse	46.40 ± 5.04%	46.52 ± 4.20%
Surprise	56.24 ± 7.44%	53.60 ± 4.44%

**ANNEXE F**  
**PRÉCISION DES RÉPONSES SELON LE SEXE DES PARTICIPANTS CONTRÔLES**  
**DU DEUXIÈME ARTICLE**

Tableau 5.6 Précision des réponses (en %) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET)

Émotion	Intensité	Hommes	Femmes
Peur	50%	20.79 ± 9.64%	25.50 ± 12.27%
	62%	45.26 ± 17.20%	51.94 ± 16.37%
	74%	67.06 ± 20.80%	72.50 ± 18.70%
Colère	50%	37.05 ± 12.54%	38.44 ± 13.50%
	62%	66.74 ± 12.69%	68.72 ± 15.11%
	74%	95.44 ± 4.73%	95.82 ± 3.56%
Dégoût	50%	45.53 ± 17.33%	53.67 ± 12.70%
	62%	71.41 ± 16.01%	76.33 ± 8.07%
	74%	85.59 ± 11.42%	90.39 ± 7.78%
Joie	50%	64.84 ± 16.64%	59.83 ± 17.93%
	62%	85.68 ± 9.28%	87.11 ± 11.91%
	74%	96.26 ± 4.01%	98.83 ± 2.04%
Tristesse	50%	62.79 ± 23.26%	63.61 ± 17.77%
	62%	87.33 ± 12.18%	86.67 ± 11.10%
	74%	95.00 ± 6.02%	95.50 ± 5.51%
Surprise	50%	37.53 ± 12.39%	35.56 ± 11.66%
	62%	65.79 ± 18.22%	62.94 ± 14.21%
	74%	85.44 ± 10.68%	84.61 ± 11.44%

**ANNEXE G**  
**TEMPS DE RÉACTION SELON LE SEXE DES PARTICIPANTS CONTRÔLES DU**  
**DEUXIÈME ARTICLE**

Tableau 5.7 Temps de réaction (en ms) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET).

Émotion	Intensité	Hommes	Femmes
Peur	50%	2786.15 ± 1311.27	2261.99 ± 837.97
	62%	2252.31 ± 544.03	2154.38 ± 631.59
	74%	2144.45 ± 679.98	1901.38 ± 525.63
Colère	50%	2202.17 ± 669.83	1940.44 ± 599.76
	62%	2029.50 ± 585.20	1798.45 ± 489.32
	74%	1528.96 ± 277.40	1498.32 ± 391.51
Dégoût	50%	2474.46 ± 920.36	1838.52 ± 468.68
	62%	2210.57 ± 1001.92	1561.00 ± 270.25
	74%	1980.34 ± 659.05	1519.70 ± 337.18
Joie	50%	1733.12 ± 537.33	1602.22 ± 384.53
	62%	1424.23 ± 423.51	1403.54 ± 380.77
	74%	1122.93 ± 284.49	971.59 ± 193.06
Tristesse	50%	2078.90 ± 516.08	1776.33 ± 395.78
	62%	1642.73 ± 312.21	1549.74 ± 438.67
	74%	1474.40 ± 345.81	1376.28 ± 399.20
Surprise	50%	2581.28 ± 937.20	2210.34 ± 575.61
	62%	2281.47 ± 732.43	1995.48 ± 483.12
	74%	1888.17 ± 400.61	1675.80 ± 438.48

**ANNEXE H**

**SEUIL D'INTENSITÉ SELON LE SEXE DES PARTICIPANTS CONTRÔLES DU  
DEUXIÈME ARTICLE**

Tableau 5.8 Seuil d'intensité (en %) des hommes et des femmes contrôles du deuxième article (M ± ET).

Émotion	Hommes	Femmes
Peur	67.04 ± 10.20%	63.32 ± 9.36%
Colère	53.96 ± 4.08%	53.84 ± 4.80%
Dégoût	52.52 ± 6.84%	49.88 ± 3.96%
Joie	44.72 ± 6.72%	46.28 ± 6.36%
Tristesse	44.72 ± 7.68%	46.16 ± 5.76%
Surprise	54.56 ± 6.00%	56.84 ± 5.52%

**ANNEXE I**  
**PRÉCISION DES RÉPONSES SELON L'INTENSITÉ ET LE SEXE DES**  
**PARTICIPANTS DU PREMIER ARTICLE**

Tableau 5.9 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les hommes et les femmes du premier article (M ± ET).

Intensité	Hommes	Femmes
50%	45.39 ± 3.31%	46.06 ± 2.28%
62%	72.56 ± 5.97%	75.53 ± 5.07%
74%	88.46 ± 5.69%	90.87 ± 4.51%
86%	91.59 ± 5.38%	94.25 ± 3.69%

**ANNEXE J**  
**PRÉCISION DES RÉPONSES SELON L'INTENSITÉ ET LE GROUPE DES**  
**PARTICIPANTS DU PREMIER ARTICLE**

Tableau 5.10 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les athlètes commotionnés et contrôles du premier article (M ± ET).

Intensité	Athlètes commotionnés	Athlètes contrôles
50%	45.42 ± 2.98 %	45.97 ± 2.75%
62%	72.61 ± 5.68%	75.17 ± 5.52%
74%	88.48 ± 5.68%	90.60 ± 4.74%
86%	91.65 ± 4.94%	93.92 ± 4.45%



## ANNEXE K

### PRÉCISION DES RÉPONSES SELON L'INTENSITÉ, LE SEXE ET LE GROUPE DES PARTICIPANTS DU PREMIER ARTICLE

Tableau 5.11 Précision des réponses (en %) selon l'intensité (50, 62, 74, 86%) chez les athlètes commotionnés et contrôles de sexe masculin et féminin du premier article (M ± ET).

Intensité	Hommes commotionnés	Hommes contrôles	Femmes commotionnées	Femmes contrôles
50%	44.37 ± 3.59%	46.07 ± 3.05%	46.30 ± 2.14%	45.84 ± 2.48%
62%	69.33 ± 6.38%	74.72 ± 4.76%	75.34 ± 3.24%	75.70 ± 6.46%
74%	85.67 ± 6.71%	90.32 ± 4.15%	90.83 ± 3.38%	90.91 ± 5.50%
86%	88.85 ± 5.82%	93.41 ± 4.35%	93.98 ± 2.42%	94.50 ± 4.66%

## BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, J. D., Cumming, G., Fidler, F. et Lindell, A. K. (2013). The perception of positive and negative facial expressions in unilateral brain-damaged patients: A meta-analysis. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 18(4), 437-459.
- Abrosoft Co. (2002). *FantaMorph [software]*. Dans <http://www.fantamorph.com>
- Adams Jr, R. B., Gordon, H. L., Baird, A. A., Ambady, N. et Kleck, R. E. (2003). Effects of gaze on amygdala sensitivity to anger and fear faces. *Science*, 300(5625), 1536-1536.
- Adolphs, R. (1999a). The Human Amygdala and Emotion. *The Neuroscientist*, 5(2), 125-137. <https://doi.org/10.1177/107385849900500216>
- Adolphs, R. (1999b). Social cognition and the human brain. *Trends in cognitive sciences*, 3(12), 469-479.
- Adolphs, R. (2001). The neurobiology of social cognition. *Current opinion in neurobiology*, 11(2), 231-239.
- Adolphs, R. (2002a). Neural systems for recognizing emotion. *Current opinion in neurobiology*, 12(2), 169-177.
- Adolphs, R. (2002b). Recognizing emotion from facial expressions: Psychological and neurological mechanisms. *Behavioral and cognitive neuroscience reviews*, 1(1), 21-62.
- Adolphs, R. (2003, Mar). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nat Rev Neurosci*, 4(3), 165-178. <https://doi.org/10.1038/nrn1056>
- Adolphs, R. (2008). Fear, faces, and the human amygdala. *Current opinion in neurobiology*, 18(2), 166-172.
- Adolphs, R., Baron-Cohen, S. et 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. et Damasio, A. R. (2000). A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping. *The Journal of Neuroscience*, 20(7), 2683-2690.
- Adolphs, R., Damasio, H., Tranel, D. et Damasio, A. R. (1996). Cortical systems for the recognition of emotion in facial expressions. *The Journal of Neuroscience*, 16(23), 7678-7687.

- Adolphs, R. et Tranel, D. (2004). Impaired judgments of sadness but not happiness following bilateral amygdala damage. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(3), 453-462.
- Adolphs, R., Tranel, D. et Damasio, A. R. (2003). Dissociable neural systems for recognizing emotions. *Brain and Cognition*, 52(1), 61-69. [https://doi.org/10.1016/s0278-2626\(03\)00009-5](https://doi.org/10.1016/s0278-2626(03)00009-5)
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H. et Damasio, A. R. (1994). Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala. *Nature*, 372(6507), 669-672.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H. et Damasio, A. R. (1995). Fear and the human amygdala. *Journal of neuroscience*, 15(9), 5879-5891.
- Adolphs, R., Tranel, D., Hamann, S., Young, A. W., Calder, A. J., Phelps, E. A., Anderson, A., Lee, G. P. et Damasio, A. R. (1999). Recognition of facial emotion in nine individuals with bilateral amygdala damage. *Neuropsychologia*, 37(10), 1111-1117.
- Aguado, L., Valdés-Conroy, B., Rodríguez, S., Román, F. J., Diéguez-Risco, T. et Fernández-Cahill, M. (2012). Modulation of early perceptual processing by emotional expression and acquired valence of faces. *Journal of Psychophysiology*, 26(1), 29-41.
- Albaugh, M. D., Orr, C., Nickerson, J. P., Zweber, C., Slauterbeck, J. R., Hipko, S., Gonyea, J., Andrews, T., Brackenbury, J. C. et Watts, R. (2015). Postconcussion symptoms are associated with cerebral cortical thickness in healthy collegiate and preparatory school ice hockey players. *The Journal of pediatrics*, 166(2), 394-400. e391.
- Allison, T., Puce, A. et McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends in cognitive sciences*, 4(7), 267-278.
- Allison, T., Puce, A., Spencer, D. D. et McCarthy, G. (1999). Electrophysiological studies of human face perception. I: Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli. *Cerebral cortex*, 9(5), 415-430.
- American Electroencephalographic Society. (1994). Guideline thirteen: Guidelines for standard electrode position nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 11(1), 111-113.

- Anderson, A. K. et Phelps, E. A. (2000). Expression without recognition: contributions of the human amygdala to emotional communication. *Psychological Science*, *11*(2), 106-111.
- Andreason, P. J., Zametkin, A. J., Guo, A. C., Baldwin, P. et Cohen, R. M. (1994). Gender-related differences in regional cerebral glucose metabolism in normal volunteers. *Psychiatry research*, *51*(2), 175-183.
- Ashley, V., Vuilleumier, P. et Swick, D. (2004). Time course and specificity of event-related potentials to emotional expressions. *Neuroreport*, *15*(1), 211-216.
- Baillargeon, A., Lassonde, M., Leclerc, S. et Elleberg, D. (2012). Neuropsychological and neurophysiological assessment of sport concussion in children, adolescents and adults. *Brain Inj*, *26*(3), 211-220. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.654590>
- Baker, J. G., Leddy, J. J., Darling, S. R., Shucard, J., Makdissi, M. et Willer, B. S. (2016). Gender differences in recovery from sports-related concussion in adolescents. *Clinical pediatrics*, *55*(8), 771-775.
- Banks, S. J., Mayer, B., Obuchowski, N., Shin, W., Lowe, M., Phillips, M., Modic, M. et Bernick, C. (2014). Impulsiveness in professional fighters. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, *26*(1), 44-50.
- Barth, J. T., Freeman, J. R., Broshek, D. K. et Varney, R. N. (2001). Acceleration-deceleration sport-related concussion: the gravity of it all. *Journal of Athletic Training*, *36*(3), 253.
- Batty, M. et Taylor, M. J. (2003). Early processing of the six basic facial emotional expressions. *Cognitive Brain Research*, *17*(3), 613-620.
- Bayer, M. et Schacht, A. (2014). Event-related brain responses to emotional words, pictures, and faces—a cross-domain comparison. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1106.
- Bazarian, J. J., Blyth, B., Mookerjee, S., He, H. et McDermott, M. P. (2010). Sex differences in outcome after mild traumatic brain injury. *Journal of neurotrauma*, *27*(3), 527-539.
- Bazarian, J. J., Zhu, T., Zhong, J., Janigro, D., Rozen, E., Roberts, A., Javien, H., Merchant-Borna, K., Abar, B. et Blackman, E. G. (2014). Persistent, long-term cerebral white matter changes after sports-related repetitive head impacts. *PLoS One*, *9*(4), e94734.

- Beck, A. T. et Steer, R. A. (1993). *Beck Anxiety Inventory manual*. PsychCorp/Pearson.
- Beck, A. T., Steer, R. A. et Brown, G. K. (1996). *Beck Depression Inventory-II*. PsychCorp/Pearson.
- Beckwith, J. G., Greenwald, R. M., Chu, J. J., Crisco, J. J., Rowson, S., Duma, S. M., Broglio, S. P., McAllister, T. W., Guskiewicz, K. M. et Mihalik, J. P. (2013). Head impact exposure sustained by football players on days of diagnosed concussion. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(4), 737.
- Belanger, H. G., Spiegel, E. et Vanderploeg, R. D. (2010). Neuropsychological performance following a history of multiple self-reported concussions: a meta-analysis. *Journal of the International neuropsychological Society*, 16(2), 262-267.
- Belanger, H. G. et Vanderploeg, R. D. (2005). The neuropsychological impact of sports-related concussion: a meta-analysis. *Journal of the International neuropsychological Society*, 11(04), 345-357.
- Benedict, P. A., Baner, N. V., Harrold, G. K., Moehringer, N., Hasanaj, L., Serrano, L. P., Sproul, M., Pagnotta, G., Cardone, D. A. et Flanagan, S. R. (2015). Gender and age predict outcomes of cognitive, balance and vision testing in a multidisciplinary concussion center. *Journal of the neurological sciences*, 353(1-2), 111-115.
- Benjamini, Y. et Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)*, 57(1), 289-300.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E. et McCarthy, G. (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of cognitive neuroscience*, 8(6), 551-565.
- Bentin, S. et Deouell, L. Y. (2000). Structural encoding and identification in face processing: ERP evidence for separate mechanisms. *Cognitive neuropsychology*, 17(1-3), 35-55.
- Bernick, C., Banks, S. J., Shin, W., Obuchowski, N., Butler, S., Noback, M., Phillips, M., Lowe, M., Jones, S. et Modic, M. (2015). Repeated head trauma is associated with smaller thalamic volumes and slower processing speed: the Professional Fighters' Brain Health Study. *British journal of sports medicine*, 49(15), 1007-1011.

- Bérubé, A., Blais, C., Fournier, A., Turgeon, J., Forget, H., Coutu, S. et Dubeau, D. (2020). Childhood maltreatment moderates the relationship between emotion recognition and maternal sensitive behaviors. *Child abuse & neglect*, *102*, 104432.
- Bigler, E. D. (2001a). The lesion (s) in traumatic brain injury: Implications for clinical neuropsychology. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *16*(2), 95-131.
- Bigler, E. D. (2001b). Quantitative magnetic resonance imaging in traumatic brain injury. *The Journal of head trauma rehabilitation*, *16*(2), 117-134.
- Bigler, E. D. (2007). Anterior and middle cranial fossa in traumatic brain injury: relevant neuroanatomy and neuropathology in the study of neuropsychological outcome. *Neuropsychology*, *21*(5), 515.
- Bigler, E. D. (2018). Structural neuroimaging in sport-related concussion. *International Journal of Psychophysiology*, *132*, 105-123.
- Bigler, E. D., Johnson, S. C., Anderson, C. V., Blatter, D. D., Gale, S. D., Russo, A. A., Ryser, D. K., Macnamara, S. E., Bailey, B. J. et Hopkins, R. O. (1996). Traumatic brain injury and memory: the role of hippocampal atrophy. *Neuropsychology*, *10*(3), 333.
- Binder, A. S., Lancaster, K., Lengenfelder, J., Chiaravalloti, N. D. et Genova, H. M. (2019). Community integration in traumatic brain injury: the contributing factor of affect recognition deficits. *Journal of the International neuropsychological Society*, *25*(8), 890-895.
- Bishop, S. J., Aguirre, G. K., Nunez-Elizalde, A. O. et 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.
- Black, A. M., Sergio, L. E. et Macpherson, A. K. (2017). The epidemiology of concussions: number and nature of concussions and time to recovery among female and male Canadian varsity athletes 2008 to 2011. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *27*(1), 52-56.
- Blair, R., Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I. et Dolan, R. J. (1999). Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger. *Brain*, *122*(5), 883-893.

- Blair, R. C. et Karniski, W. (1993). An alternative method for significance testing of waveform difference potentials. *Psychophysiology*, 30(5), 518-524.
- Blau, V. C., Maurer, U., Tottenham, N. et McCandliss, B. D. (2007). The face-specific N170 component is modulated by emotional facial expression. *Behavioral and brain functions*, 3(1), 1-13.
- Borgaro, S. R., Prigatano, G. P., Kwasnica, C., Alcott, S. et Cutter, N. (2004, Jan). Disturbances in affective communication following brain injury. *Brain Inj*, 18(1), 33-39.  
<https://doi.org/10.1080/0269905031000110562>
- Bötzel, K., Schulze, S. et Stodieck, S. R. (1995). Scalp topography and analysis of intracranial sources of face-evoked potentials. *Experimental brain research*, 104(1), 135-143.
- Bramlett, H. M. et Dietrich, W. D. (2001). Neuropathological protection after traumatic brain injury in intact female rats versus males or ovariectomized females. *Journal of neurotrauma*, 18(9), 891-900.
- Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., Kennedy, W. A., Rauch, S. L., Buckner, R. L., Strauss, M. M., Hyman, S. E. et Rosen, B. R. (1996). Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression. *Neuron*, 17(5), 875-887.
- Brennan, J. H., Mitra, B., Synnot, A., McKenzie, J., Willmott, C., McIntosh, A. S., Maller, J. J. et Rosenfeld, J. V. (2017). Accelerometers for the assessment of concussion in male athletes: a systematic review and meta-analysis. *Sports medicine*, 47(3), 469-478.
- Bretzin, A. C., Covassin, T., Fox, M. E., Petit, K. M., Savage, J. L., Walker, L. F. et Gould, D. (2018). Sex differences in the clinical incidence of concussions, missed school days, and time loss in high school student-athletes: part 1. *The american journal of sports medicine*, 46(9), 2263-2269.
- Bretzin, A. C., Covassin, T., Wiebe, D. J. et Stewart, W. (2021). Association of sex with adolescent soccer concussion incidence and characteristics. *JAMA network open*, 4(4), e218191-e218191.
- Bretzin, A. C., Mansell, J. L., Tierney, R. T. et McDevitt, J. K. (2017). Sex differences in anthropometrics and heading kinematics among division I soccer athletes: a pilot study. *Sports health*, 9(2), 168-173.
- Broglio, S. P., Eckner, J. T., Paulson, H. L. et Kutcher, J. S. (2012). Cognitive decline and aging: the role of concussive and subconcussive impacts. *Exercise and sport sciences reviews*, 40(3), 138.

- Broglio, S. P., Moore, R. D. et Hillman, C. H. (2011). A history of sport-related concussion on event-related brain potential correlates of cognition. *International Journal of Psychophysiology*, 82(1), 16-23.
- Broglio, S. P., Pontifex, M. B., O'Connor, P. et Hillman, C. H. (2009). The persistent effects of concussion on neuroelectric indices of attention. *Journal of neurotrauma*, 26(9), 1463-1470.
- Broks, P., Young, A. W., Maratos, E. J., Coffey, P. J., Calder, A. J., Isaac, C. L., Mayes, A. R., Hodges, J. R., Montaldi, D. et Cezayirli, E. (1998). Face processing impairments after encephalitis: amygdala damage and recognition of fear. *Neuropsychologia*, 36(1), 59-70.
- Brook, E. M., Kroshus, E., Hu, C. H., Gedman, M., Collins, J. E. et Matzkin, E. G. (2017). Incidence of sports-related concussion among NCAA women's ice hockey athletes. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 5(7), 2325967117714445.
- Broshek, D. K., Kaushik, T., Freeman, J. R., Erlanger, D., Webbe, F. et Barth, J. T. (2005). Sex differences in outcome following sports-related concussion. *Journal of neurosurgery*, 102(5), 856-863.
- Brown, D. A., Elsass, J. A., Miller, A. J., Reed, L. E. et 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.
- Bruce, J. M. et Echemendia, R. J. (2004). Concussion history predicts self-reported symptoms before and following a concussive event. *Neurology*, 63(8), 1516-1518.
- Bryant, R. A., O'donnell, M. L., Creamer, M., McFarlane, A. C., Clark, C. R. et Silove, D. (2010). The psychiatric sequelae of traumatic injury. *American Journal of Psychiatry*.
- Burton, A. M., White, D. et McNeill, A. (2010). The Glasgow face matching test. *Behavior Research Methods*, 42(1), 286-291.
- Calder, A. J., Keane, J., Manes, F., Antoun, N. et Young, A. W. (2000). Impaired recognition and experience of disgust following brain injury. *Nature neuroscience*, 3(11), 1077-1078.
- Calder, A. J., Lawrence, A. D. et Young, A. W. (2001). Neuropsychology of fear and loathing. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(5), 352-363.



- Calder, A. J., Young, A. W., Perrett, D. I., Ectoff, N. L. et Rowland, D. (1996). Categorical perception of morphed facial expressions. *Visual Cognition*, 3(2), 81-118.
- Calder, A. J., Young, A. W., Rowland, D., Perrett, D. I., Hodges, J. R. et Ectoff, N. L. (1996). Facial emotion recognition after bilateral amygdala damage: Differentially severe impairment of fear. *Cognitive neuropsychology*, 13(5), 699-745.
- Callahan, B. L., Ueda, K., Sakata, D., Plamondon, A. et Murai, T. (2011, Dec). Liberal bias mediates emotion recognition deficits in frontal traumatic brain injury. *Brain Cogn*, 77(3), 412-418. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.08.017>
- Campbell, R., Elgar, K., Kuntsi, J., Akers, R., Terstegge, J., Coleman, M. et Skuse, D. (2002). The classification of 'fear' from faces is associated with face recognition skill in women. *Neuropsychologia*, 40(6), 575-584.
- Cancelliere, C., Hincapié, C. A., Keightley, M., Godbolt, A. K., Côté, P., Kristman, V. L., Stålnacke, B.-M., Carroll, L. J., Hung, R. et Borg, J. (2014). Systematic review of prognosis and return to play after sport concussion: results of the International Collaboration on Mild Traumatic Brain Injury Prognosis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 95(3), S210-S229.
- Carretié, L., Hinojosa, J. A., Albert, J. et Mercado, F. (2006). Neural response to sustained affective visual stimulation using an indirect task. *Experimental brain research*, 174(4), 630-637.
- Carretié, L., Hinojosa, J. A., López-Martín, S. et Tapia, M. (2007). An electrophysiological study on the interaction between emotional content and spatial frequency of visual stimuli. *Neuropsychologia*, 45(6), 1187-1195.
- Carretié, L., Hinojosa, J. A., Martín-Loeches, M., Mercado, F. et Tapia, M. (2004). Automatic attention to emotional stimuli: neural correlates. *Human brain mapping*, 22(4), 290-299.
- Carrier-Toutant, F., Guay, S., Beaulieu, C., Léveillé, É., Turcotte-Giroux, A., Papineau, S. D., Brisson, B., D'Hondt, F. et De Beaumont, L. (2018). Effects of repeated concussions and sex on early processing of emotional facial expressions as revealed by electrophysiology. *Journal of the International neuropsychological Society*, 24(7), 673-683.

- Casson, I. R., Viano, D. C., Haacke, E. M., Kou, Z. et LeStrange, D. G. (2014). Is there chronic brain damage in retired NFL players? Neuroradiology, neuropsychology, and neurology examinations of 45 retired players. *Sports health*, 6(5), 384-395.
- Chamard, E., Lassonde, M., Henry, L. C., Tremblay, J., Boulanger, Y., De Beaumont, L. et Theoret, H. (2013). Neurometabolic and microstructural alterations following a sports-related concussion in female athletes. *Brain Inj*, 27(9), 1038-1046. <https://doi.org/10.3109/02699052.2013.794968>
- Chamard, E., Lefebvre, G., Lassonde, M. et Theoret, H. (2016). Long-term abnormalities in the corpus callosum of female concussed athletes. *Journal of neurotrauma*, 33(13), 1220-1226.
- Chamard, E., Theoret, H., Skopelja, E. N., Forwell, L. A., Johnson, A. M. et Echlin, P. S. (2012, Dec). A prospective study of physician-observed concussion during a varsity university hockey season: metabolic changes in ice hockey players. Part 4 of 4. *Neurosurg Focus*, 33(6), E4: 1-7. <https://doi.org/10.3171/2012.10.FOCUS12305>
- Chand, M. R., Kanwar, S., Calvo, C. et Peck, E. (2020). Influence of sex and previous concussion history on postconcussive recovery in young athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 30, S36-S41.
- Chandran, A., Barron, M. J., Westerman, B. J. et DiPietro, L. (2017). Multifactorial examination of sex-differences in head injuries and concussions among collegiate soccer players: NCAA ISS, 2004–2009. *Injury epidemiology*, 4(1), 1-8.
- Chappell, M. H., Ulug, A. M., Zhang, L., Heitger, M. H., Jordan, B. D., Zimmerman, R. D. et Watts, R. (2006, Sep). Distribution of microstructural damage in the brains of professional boxers: a diffusion MRI study. *J Magn Reson Imaging*, 24(3), 537-542. <https://doi.org/10.1002/jmri.20656>
- Chayer, C. et Freedman, M. (2001). Frontal lobe functions. *Current neurology and neuroscience reports*, 1(6), 547-552.
- Chen, J.-K., Johnston, K. M., Collie, A., McCrory, P. et Ptito, A. (2007). A validation of the post concussion symptom scale in the assessment of complex concussion using cognitive testing and functional MRI. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78(11), 1231-1238.

- Chen, J.-K., Johnston, K. M., Frey, S., Petrides, M., Worsley, K. et Ptito, A. (2004, May). Functional abnormalities in symptomatic concussed athletes: an fMRI study. *Neuroimage*, 22(1), 68-82. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.032>
- Choi, D., Egashira, Y., Takakura, J. y., Motoi, M., Nishimura, T. et Watanuki, S. (2015). Gender difference in N170 elicited under oddball task. *Journal of Physiological Anthropology*, 34(1), 1-5.
- Churchill, N., Hutchison, M., Richards, D., Leung, G., Graham, S. et Schweizer, T. A. (2017a). Brain structure and function associated with a history of sport concussion: a multi-modal magnetic resonance imaging study. *Journal of neurotrauma*, 34(4), 765-771.
- Churchill, N., Hutchison, M. G., Richards, D., Leung, G., Graham, S. J. et Schweizer, T. A. (2017b). Neuroimaging of sport concussion: persistent alterations in brain structure and function at medical clearance. *Scientific reports*, 7(1), 1-9.
- Claire-Bonenfant, C. (2019). *Portrait statistique québécois 2019 : Place des filles et des femmes dans les sports fédérés, les organismes voués à l'activité physique et au plein-air*. Dans M. d. l. É. d. Québec (dir.), (p. 62). Québec : Gouvernement du Québec.
- Colantonio, A., Mar, W., Escobar, M., Yoshida, K., Velikonja, D., Rizoli, S., Cusimano, M. et Cullen, N. (2010). Women's health outcomes after traumatic brain injury. *Journal of Women's Health*, 19(6), 1109-1116.
- Collignon, O., Girard, S., Gosselin, F., Saint-Amour, D., Lepore, F. et Lassonde, M. (2010). Women process multisensory emotion expressions more efficiently than men. *Neuropsychologia*, 48(1), 220-225.
- Collins, C. L., Fletcher, E. N., Fields, S. K., Kluchurosky, L., Rohrkemper, M. K., Comstock, R. D. et Cantu, R. C. (2014). Neck strength: a protective factor reducing risk for concussion in high school sports. *The journal of primary prevention*, 35(5), 309-319.
- Collins, M. W., Lovell, M. R., Iverson, G. L., Cantu, R. C., Maroon, J. C. et 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. et 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.
- Costafreda, S. G., Brammer, M. J., David, A. S. et Fu, C. H. (2008). Predictors of amygdala activation during the processing of emotional stimuli: a meta-analysis of 385 PET and fMRI studies. *Brain Research Reviews*, 58(1), 57-70.
- Covassin, T. et Elbin, R. (2011). The female athlete: the role of gender in the assessment and management of sport-related concussion. *Clinics in sports medicine*, 30(1), 125-131.
- Covassin, T., Elbin, R., Bleecker, A., Lipchik, A. et Kontos, A. P. (2013). Are there differences in neurocognitive function and symptoms between male and female soccer players after concussions? *The american journal of sports medicine*, 41(12), 2890-2895.
- Covassin, T., Elbin, R., Crutcher, B. et Burkhart, S. (2013). The management of sport-related concussion: considerations for male and female athletes. *Translational stroke research*, 4(4), 420-424.
- Covassin, T., Elbin, R., Harris, W., Parker, T. et Kontos, A. (2012). The role of age and sex in symptoms, neurocognitive performance, and postural stability in athletes after concussion. *The american journal of sports medicine*, 40(6), 1303-1312.
- Covassin, T., Elbin, R., Kontos, A. et Larson, E. (2010). Investigating baseline neurocognitive performance between male and female athletes with a history of multiple concussion. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 81(6), 597-601.
- Covassin, T., Elbin, R. J., Larson, E. et Kontos, A. P. (2012). Sex and age differences in depression and baseline sport-related concussion neurocognitive performance and symptoms. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 22(2), 98-104.
- Covassin, T., Moran, R. et Elbin, R. (2016). Sex differences in reported concussion injury rates and time loss from participation: an update of the National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance Program from 2004–2005 through 2008–2009. *Journal of Athletic Training*, 51(3), 189-194.

- Covassin, T., Savage, J. L., Bretzin, A. C. et Fox, M. E. (2018). Sex differences in sport-related concussion long-term outcomes. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 9-13.
- Covassin, T., Schatz, P. et Swanik, C. B. (2007). Sex differences in neuropsychological function and post-concussion symptoms of concussed collegiate athletes. *Neurosurgery*, 61(2), 345-351.
- Covassin, T., Swanik, C. B., Sachs, M., Kendrick, Z., Schatz, P., Zillmer, E. et Kaminaris, C. (2006). Sex differences in baseline neuropsychological function and concussion symptoms of collegiate athletes. *British journal of sports medicine*, 40(11), 923-927.
- Covassin, T., Swanik, C. B. et Sachs, M. L. (2003). Sex differences and the incidence of concussions among collegiate athletes. *Journal of Athletic Training*, 38(3), 238.
- Crocker, V. et McDonald, S. (2005). Recognition of emotion from facial expression following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 19(10), 787-799. <https://doi.org/10.1080/02699050500110033>
- Cubon, V. A., Putukian, M., Boyer, C. et Dettwiler, A. (2011, Feb). A diffusion tensor imaging study on the white matter skeleton in individuals with sports-related concussion. *J Neurotrauma*, 28(2), 189-201. <https://doi.org/10.1089/neu.2010.1430>
- Cunningham, W. A., Raye, C. L. et Johnson, M. K. (2004). Implicit and explicit evaluation: fMRI correlates of valence, emotional intensity, and control in the processing of attitudes. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(10), 1717-1729.
- Cytowic, R., Smith, A. et Stump, D. (1986). Transient amenorrhea after closed head trauma. *New England Journal of Medicine*, 314(11), 715-715.
- D'Hondt, F., Lassonde, M., Thebault-Dagher, F., Bernier, A., Gravel, J., Vannasing, P. et 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.
- D'Lauro, C., Johnson, B. R., McGinty, G., Allred, C. D., Campbell, D. E. et Jackson, J. C. (2018). Reconsidering return-to-play times: a broader perspective on concussion recovery. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 6(3), 2325967118760854.

- Dal Monte, O., Krueger, F., Solomon, J. M., Schintu, S., Knutson, K. M., Strenziok, M., Pardini, M., Leopold, A., Raymond, V. et Grafman, J. (2013). A voxel-based lesion study on facial emotion recognition after penetrating brain injury. *Social cognitive and affective neuroscience*, 8(6), 632-639.
- Daudelin-Peltier, C., Forget, H., Blais, C., Deschênes, A. et Fiset, D. (2017). The effect of acute social stress on the recognition of facial expression of emotions. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- Davachi, L. et Preston, A. (2014). The medial temporal lobe and memory. Dans *The Cognitive Neurosciences* (5th éd., p. 539–546). MIT Press.
- Davenport, E. M., Whitlow, C. T., Urban, J. E., Espeland, M. A., Rosenbaum, D. A., Gioia, G. A., Powers, A. K., Stitzel, J. D. et Maldjian, J. A. (2014). Abnormal white matter integrity related to head impact exposure in a season of high school varsity football. *Journal of neurotrauma*.
- Davis-Hayes, C., Gossett, J. D., Levine, W. N., Shams, T., Harada, J., Mitnick, J. et Noble, J. (2017). Sex-specific outcomes and predictors of concussion recovery. *JAAOS-Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 25(12), 818-828.
- De Beaumont, L., Beauchemin, M., Beaulieu, C. et Jolicoeur, P. (2013). Long-term attenuated electrophysiological response to errors following multiple sports concussions. *J Clin Exp Neuropsychol*, 35(6), 596-607. <https://doi.org/10.1080/13803395.2013.800023>
- De Beaumont, L., Brisson, B., Lassonde, M. et Jolicoeur, P. (2007, Jun). Long-term electrophysiological changes in athletes with a history of multiple concussions. *Brain Inj*, 21(6), 631-644. <https://doi.org/10.1080/02699050701426931>
- De Beaumont, L., Henry, L. C. et Gosselin, N. (2012, Dec). Long-term functional alterations in sports concussion. *Neurosurg Focus*, 33(6), E8: 1-7. <https://doi.org/10.3171/2012.9.FOCUS12278>
- De Beaumont, L., Lassonde, M., Leclerc, S. et Theoret, H. (2007, Aug). Long-term and cumulative effects of sports concussion on motor cortex inhibition. *Neurosurgery*, 61(2), 329-336; discussion 336-327. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000280000.03578.B6>

- De Beaumont, L., Mongeon, D., Tremblay, S., Messier, J., Prince, F., Leclerc, S., Lassonde, M. et Théoret, H. (2011). Persistent motor system abnormalities in formerly concussed athletes. *Journal of Athletic Training*, 46(3), 234-240.
- De Beaumont, L., Theoret, H., Mongeon, D., Messier, J., Leclerc, S., Tremblay, S., Ellemberg, D. et Lassonde, M. (2009, Mar). Brain function decline in healthy retired athletes who sustained their last sports concussion in early adulthood. *Brain*, 132(Pt 3), 695-708.  
<https://doi.org/10.1093/brain/awn347>
- De Beaumont, L., Tremblay, S., Henry, L. C., Poirier, J., Lassonde, M. et Théoret, H. (2013). Motor system alterations in retired former athletes: the role of aging and concussion history. *BMC neurology*, 13(1), 1.
- De Beaumont, L., Tremblay, S., Poirier, J., Lassonde, M. et Theoret, H. (2012, Jan). Altered bidirectional plasticity and reduced implicit motor learning in concussed athletes. *Cereb Cortex*, 22(1), 112-121.  
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhr096>
- De Bellis, M. D., Keshavan, M. S., Beers, S. R., Hall, J., Frustaci, K., Masalehdan, A., Noll, J. et Boring, A. M. (2001). Sex differences in brain maturation during childhood and adolescence. *Cerebral cortex*, 11(6), 552-557.
- De Cesarei, A. et Codispoti, M. (2006). When does size not matter? Effects of stimulus size on affective modulation. *Psychophysiology*, 43(2), 207-215.
- de Gelder, B., Teunisse, J.-P. et Benson, P. J. (1997). Categorical perception of facial expressions: Categories and their internal structure. *Cognition & Emotion*, 11(1), 1-23.
- Deb, S., Lyons, I. et Koutzoukis, C. (1999). Neurobehavioural symptoms one year after a head injury. *The British Journal of Psychiatry*, 174(4), 360-365.
- Deb, S., Lyons, I., Koutzoukis, C., Ali, I. et McCarthy, G. (1999). Rate of psychiatric illness 1 year after traumatic brain injury. *American Journal of Psychiatry*.
- Decloe, M. D., Meeuwisse, W. H., Hagel, B. E. et Emery, C. A. (2014). Injury rates, types, mechanisms and risk factors in female youth ice hockey. *British journal of sports medicine*, 48(1), 51-56.

- Decq, P., Gault, N., Blandeau, M., Kerdraon, T., Berkal, M., ElHelou, A., Dusfour, B. et Peyrin, J.-C. (2016). Long-term consequences of recurrent sports concussion. *Acta neurochirurgica*, 158(2), 289-300.
- Deffke, I., Sander, T., Heidenreich, J., Sommer, W., Curio, G., Trahms, L. et Lueschow, A. (2007). MEG/EEG sources of the 170-ms response to faces are co-localized in the fusiform gyrus. *Neuroimage*, 35(4), 1495-1501.
- Delaney, J. S., Caron, J. G., Correa, J. A. et Bloom, G. A. (2018). Why professional football players chose not to reveal their concussion symptoms during a practice or game. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 28(1), 1-12.
- Delaney, J. S., Lacroix, V. J., Leclerc, S. et Johnston, K. M. (2002). Concussions among university football and soccer players. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 12(6), 331-338.
- Delorme, A. et Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 134(1), 9-21.
- Delorme, A., Sejnowski, T. et Makeig, S. (2007). Enhanced detection of artifacts in EEG data using higher-order statistics and independent component analysis. *Neuroimage*, 34(4), 1443-1449.
- Delplanque, S., Lavoie, M. E., Hot, P., Silvert, L. et Sequeira, H. (2004). Modulation of cognitive processing by emotional valence studied through event-related potentials in humans. *Neuroscience letters*, 356(1), 1-4.
- Derntl, B., Hack, R. L., Kryspin-Exner, I. et Habel, U. (2013). Association of menstrual cycle phase with the core components of empathy. *Hormones and behavior*, 63(1), 97-104.
- Derntl, B., Kryspin-Exner, I., Fernbach, E., Moser, E. et Habel, U. (2008). Emotion recognition accuracy in healthy young females is associated with cycle phase. *Hormones and behavior*, 53(1), 90-95.
- Derntl, B., Windischberger, C., Robinson, S., Lamplmayr, E., Kryspin-Exner, I., Gur, R. C., Moser, E. et Habel, U. (2008). Facial emotion recognition and amygdala activation are associated with menstrual cycle phase. *Psychoneuroendocrinology*, 33(8), 1031-1040.



- Deschênes, A., Forget, H., Daudelin-Peltier, C., Fiset, D. et Blais, C. (2015). Facial expression recognition impairment following acute social stress. *Journal of Vision*, 15(12), 1383-1383.
- Desjardins, M., Drisdelle, B. L., Lefebvre, C., Gagnon, J. F., De Beaumont, L. et Jolicoeur, P. (2021). Interhemispheric differences in P1 and N1 amplitude in EEG and MEG differ across older individuals with a concussion compared with age-matched controls. *Psychophysiology*, 58(3), e13751.
- Di Russo, F., Martínez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S. et Hillyard, S. A. (2001). Cortical Sources of the Early Components of the Visual Evoked Potential. *Human brain mapping*, 15(2), 95-111.
- Dick, R. (2009). Is there a gender difference in concussion incidence and outcomes? *British journal of sports medicine*, 43(Suppl 1), i46-i50.
- Didehbani, N., Munro Cullum, C., Mansinghani, S., Conover, H. et Hart, J. (2013). Depressive symptoms and concussions in aging retired NFL players. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28(5), 418-424.
- Djebaili, M., Guo, Q., Pettus, E. H., Hoffman, S. W. et Stein, D. G. (2005). The neurosteroids progesterone and allopregnanolone reduce cell death, gliosis, and functional deficits after traumatic brain injury in rats. *Journal of neurotrauma*, 22(1), 106-118.
- Dollé, J.-P., Jaye, A., Anderson, S. A., Ahmadzadeh, H., Shenoy, V. B. et Smith, D. H. (2018). Newfound sex differences in axonal structure underlie differential outcomes from in vitro traumatic axonal injury. *Experimental neurology*, 300, 121-134.
- Dougan, B. K., Horswill, M. S. et Geffen, G. M. (2014). Athletes' age, sex, and years of education moderate the acute neuropsychological impact of sports-related concussion: a meta-analysis. *Journal of the International neuropsychological Society*, 20(1), 64-80.
- Drapeau. (2011). Reconnaissance d'émotions faciales, vocales et musicales suivant un traumatisme craniocérébral: état actuel des connaissances. *Revista Neuropsicologia Latinoamericana*, 3(3).  
<https://doi.org/10.5579/rnl.2011.0075>

- Drapeau, J., Gosselin, N., Peretz, I. et McKerral, M. (2017). Emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 31(2), 221-229.
- Drapeau, J., Gosselin, N., Peretz, I. et McKerral, M. (2019). Electrophysiological responses to emotional facial expressions following a mild traumatic brain injury. *Brain sciences*, 9(6), 142.
- Duchaine, B., Germine, L. et Nakayama, K. (2007). Family resemblance: Ten family members with prosopagnosia and within-class object agnosia. *Cognitive neuropsychology*, 24(4), 419-430.
- Dupuis, F., Johnston, K. M., Lavoie, M., Lepore, F. et Lassonde, M. (2000). Concussions in athletes produce brain dysfunction as revealed by event-related potentials. *Neuroreport*, 11(18), 4087-4092.
- Durston, A. J. et Itier, R. J. (2021). The early processing of fearful and happy facial expressions is independent of task demands—Support from mass univariate analyses. *Brain research*, 1765, 147505.
- Durston, S., Pol, H. E. H., Casey, B., Giedd, J. N., Buitelaar, J. K. et Van Engeland, H. (2001). Anatomical MRI of the developing human brain: what have we learned? *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 40(9), 1012-1020.
- Echemendia, R. J., Iverson, G. L., McCrea, M., Macciocchi, S. N., Gioia, G. A., Putukian, M. et Comper, P. (2013). Advances in neuropsychological assessment of sport-related concussion. *British journal of sports medicine*, 47(5), 294-298.
- Echemendia, R. J. et Julian, L. J. (2001). Mild traumatic brain injury in sports: neuropsychology's contribution to a developing field. *Neuropsychology review*, 11(2), 69-88.
- Echemendia, R. J., Putukian, M., Mackin, R. S., Julian, L. et Shoss, N. (2001). Neuropsychological test performance prior to and following sports-related mild traumatic brain injury. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 11(1), 23-31.
- Eimer, M. et Holmes, A. (2002). An ERP study on the time course of emotional face processing. *Neuroreport*, 13(4), 427-431.
- Eimer, M., Holmes, A. et McGlone, F. P. (2003). The role of spatial attention in the processing of facial expression: an ERP study of rapid brain responses to six basic emotions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3(2), 97-110.

- Ekman, P., Freisen, W. V. et Ancoli, S. (1980). Facial signs of emotional experience. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1125.
- Elleberg, D., Leclerc, S., Couture, S. et Daigle, C. (2007). Prolonged neuropsychological impairments following a first concussion in female university soccer athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 17(5), 369-374.
- Ellis, M. J., Ritchie, L. J., Koltek, M., Hosain, S., Cordingley, D., Chu, S., Selci, E., Leiter, J. et Russell, K. (2015). Psychiatric outcomes after pediatric sports-related concussion. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 16(6), 709-718.
- Emerson, C. S., Headrick, J. P. et Vink, R. (1993). Estrogen improves biochemical and neurologic outcome following traumatic brain injury in male rats, but not in females. *Brain research*, 608(1), 95-100.
- Esopenko, C., Chow, T. W., Tartaglia, M. C., Bacopulos, A., Kumar, P., Binns, M. A., Kennedy, J. L., Müller, D. J. et Levine, B. (2017). Cognitive and psychosocial function in retired professional hockey players. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 88(6), 512-519.
- Esposito, G., Van Horn, J. D., Weinberger, D. R. et Berman, K. F. (1996). Gender differences in cerebral blood flow as a function of cognitive state with PET. *Journal of Nuclear Medicine*, 37(4), 559-564.
- Etcoff, N. L. et Magee, J. J. (1992). Categorical perception of facial expressions. *Cognition*, 44(3), 227-240.
- Fakhran, S., Yaeger, K., Collins, M. et Alhilali, L. (2014). Sex differences in white matter abnormalities after mild traumatic brain injury: localization and correlation with outcome. *Radiology*, 272(3), 815-823.
- Farace, E. et Alves, W. M. (2000). Do women fare worse: a metaanalysis of gender differences in traumatic brain injury outcome. *Journal of neurosurgery*, 93(4), 539-545.
- Feddermann-Demont, N., Echemendia, R. J., Schneider, K. J., Solomon, G. S., Hayden, K. A., Turner, M., Dvořák, J., Straumann, D. et Tarnutzer, A. A. (2017). What domains of clinical function should be assessed after sport-related concussion? A systematic review. *British journal of sports medicine*, 51(11), 903-918.

- Fenton, G., McClelland, R., Montgomery, A., MacFlynn, G. et Rutherford, W. (1993). The postconcussional syndrome: social antecedents and psychological sequelae. *The British Journal of Psychiatry*, 162(4), 493-497.
- Fields, E. C. (2017). *Factorial Mass Univariate ERP Toolbox [Computer software]*. Dans <https://github.com/ericcfields/FMUT/releases>
- Fields, E. C. et Kuperberg, G. R. (2020). Having your cake and eating it too: Flexibility and power with mass univariate statistics for ERP data. *Psychophysiology*, 57(2), e13468.
- Fiset, D., Blais, C., Royer, J., Richoz, A.-R., Dugas, G. et Caldara, R. (2017). Mapping the impairment in decoding static facial expressions of emotion in prosopagnosia. *Social cognitive and affective neuroscience*, 12(8), 1334-1341.
- Fitzgerald, D. A., Angstadt, M., Jelsone, L. M., Nathan, P. J. et Phan, K. L. (2006). Beyond threat: amygdala reactivity across multiple expressions of facial affect. *Neuroimage*, 30(4), 1441-1448.
- Fleischman, D. S., Navarrete, C. D. et Fessler, D. M. (2010). Oral contraceptives suppress ovarian hormone production. *Psychological Science*, 21(5), 750-752.
- Fleminger, S. (2008). Long-term psychiatric disorders after traumatic brain injury. *European Journal of Anaesthesiology*, 25(S42), 123-130.
- Foss, K. D. B., Le Cara, E., McCambridge, T., Hinton, R. Y., Kushner, A. et Myer, G. D. (2018). Epidemiology of Injuries in Women's Lacrosse: Implications for Sport-, Level-, and Sex-Specific Injury Prevention Strategies. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 28(4), 406-413.
- Foti, D., Hajcak, G. et Dien, J. (2009). Differentiating neural responses to emotional pictures: Evidence from temporal-spatial PCA. *Psychophysiology*, 46(3), 521-530.
- Fried, I., MacDonald, K. A. et Wilson, C. L. (1997). Single neuron activity in human hippocampus and amygdala during recognition of faces and objects. *Neuron*, 18(5), 753-765.
- Fusar-Poli, P., Placentino, A., Carletti, F., Landi, P., Allen, P., Surguladze, S., Benedetti, F., Abbamonte, M., Gasparotti, R. et Barale, F. (2009). Functional atlas of emotional faces processing: a voxel-

- based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies. *Journal of psychiatry & neuroscience*.
- Gaetz, M., Goodman, D. et Weinberg, H. (2000). Electrophysiological evidence for the cumulative effects of concussion. *Brain Injury*, 14(12), 1077-1088.
- Gajawelli, N., Lao, Y., Apuzzo, M. L., Romano, R., Liu, C., Tsao, S., Hwang, D., Wilkins, B., Lepore, N. et Law, M. (2013). Neuroimaging changes in the brain in contact versus noncontact sport athletes using diffusion tensor imaging. *World neurosurgery*, 80(6), 824-828.
- Gale, S., Burr, R., Bigler, E. D. et Blatter, D. (1993). Fornix degeneration and memory in traumatic brain injury. *Brain Research Bulletin*, 32(4), 345-349.
- Gallagher, V., Kramer, N., Abbott, K., Alexander, J., Breiter, H., Herrold, A., Lindley, T., Mjaanes, J. et Reilly, J. (2018). The effects of sex differences and hormonal contraception on outcomes after collegiate sports-related concussion. *Journal of neurotrauma*, 35(11), 1242-1247.
- Gangestad, S. W., Haselton, M. G., Welling, L. L., Gildersleeve, K., Pillsworth, E. G., Burriss, R. P., Larson, C. M. et Puts, D. A. (2016). How valid are assessments of conception probability in ovulatory cycle research? Evaluations, recommendations, and theoretical implications. *Evolution and Human Behavior*, 37(2), 85-96.
- Ganpule, S., Daphalapurkar, N. P., Ramesh, K. T., Knutsen, A. K., Pham, D. L., Bayly, P. V. et Prince, J. L. (2017). A three-dimensional computational human head model that captures live human brain dynamics. *Journal of neurotrauma*, 34(13), 2154-2166.
- Garces, G. L., Medina, D., Milutinovic, L., Garavote, P. et Guerado, E. (2002). Normative database of isometric cervical strength in a healthy population. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(3), 464-470.
- Gardner, A., Kay-Lambkin, F., Stanwell, P., Donnelly, J., Williams, W. H., Hiles, A., Schofield, P., Levi, C. et Jones, D. K. (2012). A systematic review of diffusion tensor imaging findings in sports-related concussion. *Journal of neurotrauma*, 29(16), 2521-2538.

- Genova, H. M., Rajagopalan, V., Chiaravalloti, N., Binder, A., Deluca, J. et Lengenfelder, J. (2015). Facial affect recognition linked to damage in specific white matter tracts in traumatic brain injury. *Soc Neurosci*, 10(1), 27-34. <https://doi.org/10.1080/17470919.2014.959618>
- Gessel, L. M., Fields, S. K., Collins, C. L., Dick, R. W. et Comstock, R. D. (2007). Concussions among United States high school and collegiate athletes. *Journal of Athletic Training*, 42(4), 495.
- Godard, O., Leleu, A., Rebaï, M. et Fiori, N. (2013). Sex differences in interhemispheric communication during face identity encoding: evidence from ERPs. *Neuroscience research*, 76(1-2), 58-66.
- Gonzales, J. E. et Ferrer, E. (2016). Efficacy of methods for ovulation estimation and their effect on the statistical detection of ovulation-linked behavioral fluctuations. *Behavior Research Methods*, 48(3), 1125-1144.
- Gorno-Tempini, M. L., Pradelli, S., Serafini, M., Pagnoni, G., Baraldi, P., Porro, C., Nicoletti, R., Umita, C. et Nichelli, P. (2001). Explicit and incidental facial expression processing: an fMRI study. *Neuroimage*, 14(2), 465-473.
- Gosselin, N., Bottari, C., Chen, J.-K., Huntgeburth, S. C., De Beaumont, L., Petrides, M., Cheung, B. et Ptito, A. (2012, Dec). Evaluating the cognitive consequences of mild traumatic brain injury and concussion by using electrophysiology. *Neurosurg Focus*, 33(6), E7: 1-7. <https://doi.org/10.3171/2012.10.FOCUS12253>
- Gosselin, N., Theriault, M., Leclerc, S., Montplaisir, J. et Lassonde, M. (2006, Jun). Neurophysiological anomalies in symptomatic and asymptomatic concussed athletes. *Neurosurgery*, 58(6), 1151-1161; discussion 1151-1161. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000215953.44097.FA>
- Granito, V. J. (2002). Psychological response to athletic injury: Gender differences. *Journal of sport behavior*, 25(3), 243.
- Gray, J. M., Young, A., Barker, W., Curtis, A. et Gibson, D. (1997). Impaired recognition of disgust in Huntington's disease gene carriers. *Brain: a journal of neurology*, 120(11), 2029-2038.

- Green, R. E. A., Turner, G. R. et Thompson, W. F. (2004). Deficits in facial emotion perception in adults with recent traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, 42(2), 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.07.005>
- Groppe, D. M., Urbach, T. P. et Kutas, M. (2011). Mass univariate analysis of event-related brain potentials/fields I: A critical tutorial review. *Psychophysiology*, 48(12), 1711-1725.
- Guapo, V. G., Graeff, F. G., Zani, A. C. T., Labate, C. M., dos Reis, R. M. et Del-Ben, C. M. (2009). Effects of sex hormonal levels and phases of the menstrual cycle in the processing of emotional faces. *Psychoneuroendocrinology*, 34(7), 1087-1094.
- Gupte, R. P., Brooks, W. M., Vukas, R. R., Pierce, J. D. et Harris, J. L. (2019). Sex differences in traumatic brain injury: what we know and what we should know. *Journal of neurotrauma*, 36(22), 3063-3091.
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Cantu, R. C., Randolph, C. et Jordan, B. D. (2005). Association between Recurrent Concussion and Late-Life Cognitive Impairment in Retired Professional Football Players. *Neurosurgery*, 719-726. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000175725.75780.dd>
- Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Bailes, J., McCrea, M., Harding, H. P., Matthews, A., Mihalik, J. R. et 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.
- Guskiewicz, K. M., McCrea, M., Marshall, S. W., Cantu, R. C., Randolph, C., Barr, W., Onate, J. A. et Kelly, J. P. (2003). Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players: the NCAA Concussion Study. *JAMA*, 290(19), 2549-2555.
- Guskiewicz, K. M., Mihalik, J. P., Shankar, V., Marshall, S. W., Crowell, D. H., Oliaro, S. M., Ciocca, M. F. et Hooker, D. N. (2007). Measurement of head impacts in collegiate football players: relationship between head impact biomechanics and acute clinical outcome after concussion. *Neurosurgery*, 61(6), 1244-1253.
- Guskiewicz, K. M., Ross, S. E. et Marshall, S. W. (2001). Postural stability and neuropsychological deficits after concussion in collegiate athletes. *Journal of Athletic Training*, 36(3), 263.

- Guskiewicz, K. M., Weaver, N. L., Padua, D. A. et Garrett, W. E. (2000). Epidemiology of concussion in collegiate and high school football players. *The american journal of sports medicine*, 28(5), 643-650.
- Gutierrez, G. M., Conte, C. et Lightbourne, K. (2014). The relationship between impact force, neck strength, and neurocognitive performance in soccer heading in adolescent females. *Pediatric exercise science*, 26(1), 33-40.
- Hajcak, G., Weinberg, A., MacNamara, A. et Foti, D. (2012). ERPs and the Study of Emotion. Dans S. J. Luck et E. S. Kappenman (dir.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components* (p. 441-472). Oxford University Press.
- Halgren, E., Raji, T., Marinkovic, K., Jousmäki, V. et Hari, R. (2000). Cognitive response profile of the human fusiform face area as determined by MEG. *Cerebral cortex*, 10(1), 69-81.
- Hall, J. A. et Matsumoto, D. (2004). Gender differences in judgments of multiple emotions from facial expressions. *Emotion*, 4(2), 201.
- Hampson, E., van Anders, S. M. et 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.
- Hamstra, D. A., De Kloet, E., Van Hemert, A., De Rijk, R. et Van der Does, A. (2015). Mineralocorticoid receptor haplotype, oral contraceptives and emotional information processing. *Neuroscience*, 286, 412-422.
- Hamstra, D. A., De Rover, M., De Rijk, R. H. et Van der Does, W. (2014). Oral contraceptives may alter the detection of emotions in facial expressions. *European Neuropsychopharmacology*, 24(11), 1855-1859.
- Harmer, C. J., Grayson, L. et Goodwin, G. M. (2002). Enhanced recognition of disgust in bipolar illness. *Biological Psychiatry*, 51(4), 298-304.
- Harmer, C. J., Thilo, K., Rothwell, J. et Goodwin, G. (2001). Transcranial magnetic stimulation of medial-frontal cortex impairs the processing of angry facial expressions. *Nature neuroscience*, 4(1), 17-18.



- Harmon, K. G., Drezner, J. A., Gammons, M., Guskiewicz, K. M., Halstead, M., Herring, S. A., Kutcher, J. S., Pana, A., Putukian, M. et Roberts, W. O. (2013, Jan). American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *Br J Sports Med*, 47(1), 15-26. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091941>
- Hart, J., Kraut, M. A., Womack, K. B., Strain, J., Didehbani, N., Bartz, E., Conover, H., Mansinghani, S., Lu, H. et Cullum, C. M. (2013). Neuroimaging of cognitive dysfunction and depression in aging retired National Football League players: a cross-sectional study. *JAMA neurology*, 70(3), 326-335.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A. et Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in cognitive sciences*, 4(6), 223-233.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A. et Gobbini, M. I. (2002). Human neural systems for face recognition and social communication. *Biological Psychiatry*, 51(1), 59-67.
- Heberlein, A. S., Padon, A. A., Gillihan, S. J., Farah, M. J. et Fellows, L. K. (2008). Ventromedial frontal lobe plays a critical role in facial emotion recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, 20(4), 721-733.
- Helmer, K. G., Pasternak, O., Fredman, E., Preciado, R. I., Koerte, I. K., Sasaki, T., Mayinger, M., Johnson, A. M., Holmes, J. D. et Forwell, L. A. (2014). Hockey Concussion Education Project, Part 1. Susceptibility-weighted imaging study in male and female ice hockey players over a single season. *Journal of neurosurgery*, 120(4), 864-872.
- Henry, J. D., Phillips, L. H., Crawford, J. R., Ietswaart, M. et Summers, F. (2006). Theory of mind following traumatic brain injury: the role of emotion recognition and executive dysfunction. *Neuropsychologia*, 44(10), 1623-1628. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.03.020>
- Henry, L. C., Tremblay, J., Tremblay, S., Lee, A., Brun, C., Lepore, N., Theoret, H., Ellemberg, D. et Lassonde, M. (2011, Oct). Acute and chronic changes in diffusivity measures after sports concussion. *J Neurotrauma*, 28(10), 2049-2059. <https://doi.org/10.1089/neu.2011.1836>

- Henry, L. C., Tremblay, S., Boulanger, Y., Elleberg, D. et 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. et De Beaumont, L. (2017). Long-term effects of sports concussions: bridging the neurocognitive repercussions of the injury with the newest neuroimaging data. *The Neuroscientist*, 23(5), 567-578.
- Henry, L. C., Tremblay, S., Leclerc, S., Khiat, A., Boulanger, Y., Elleberg, D. et Lassonde, M. (2011). Metabolic changes in concussed American football players during the acute and chronic post-injury phases. *BMC Neurol*, 11, 105. <https://doi.org/10.1186/1471-2377-11-105>
- Herba, C. et Phillips, M. (2004). Annotation: Development of facial expression recognition from childhood to adolescence: Behavioural and neurological perspectives. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(7), 1185-1198.
- Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., Muehlberger, A. et Fallgatter, A. J. (2005). Source localization of early stages of face processing. *Brain Topography*, 18(2), 77-85.
- Herweh, C., Hess, K., Meyding-Lamadé, U., Bartsch, A. J., Stippich, C., Jost, J., Friedmann-Bette, B., Heiland, S., Bendszus, M. et Hähnel, S. (2016). Reduced white matter integrity in amateur boxers. *Neuroradiology*, 58(9), 911-920.
- Hillyard, S. A., Vogel, E. K. et Luck, S. J. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series B: Biological sciences*, 353(1373), 1257-1270.
- Hinojosa, J., Mercado, F. et Carretié, L. (2015). N170 sensitivity to facial expression: A meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 55, 498-509.
- Hoffman, E. A. et Haxby, J. V. (2000). Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception. *Nature neuroscience*, 3(1), 80-84.

- Hoffmann, H., Kessler, H., Eppel, T., Rukavina, S. et Traue, H. C. (2010). Expression intensity, gender and facial emotion recognition: Women recognize only subtle facial emotions better than men. *Acta psychologica*, 135(3), 278-283.
- Holm, L., Cassidy, J. D., Carroll, L. J. et Borg, J. (2005, May). Summary of the WHO Collaborating Centre for Neurotrauma Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *J Rehabil Med*, 37(3), 137-141.  
<https://doi.org/10.1080/16501970510027321>
- Holmes, A., Vuilleumier, P. et 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. et 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. et Agel, J. (2007). Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *Journal of Athletic Training*, 42(2), 311.
- Hopkins, M. J., Dywan, J. et Segalowitz, S. J. (2002, Mar). Altered electrodermal response to facial expression after closed head injury. *Brain Inj*, 16(3), 245-257.  
<https://doi.org/10.1080/02699050110103346>
- Hornak, J., Bramham, J., Rolls, E. T., Morris, R. G., O'Doherty, J., Bullock, P. R. et Polkey, C. E. (2003). Changes in emotion after circumscribed surgical lesions of the orbitofrontal and cingulate cortices. *Brain*, 126(7), 1691-1712.
- Hornak, J., Rolls, E. T. et Wade, D. (1996). Face and voice expression identification in patients with emotional and behavioural changes following ventral frontal lobe damage. *Neuropsychologia*, 34(4), 247-261.
- Hot, P., Saito, Y., Mandai, O., Kobayashi, T. et Sequeira, H. (2006). An ERP investigation of emotional processing in European and Japanese individuals. *Brain research*, 1122(1), 171-178.

- Hsu, H.-L., Chen, D. Y.-T., Tseng, Y.-C., Kuo, Y.-S., Huang, Y.-L., Chiu, W.-T., Yan, F.-X., Wang, W.-S. et Chen, C.-J. (2015). Sex differences in working memory after mild traumatic brain injury: a functional MR imaging study. *Radiology*, 276(3), 828-835.
- Hu, Y., Xu, Q., Li, K., Zhu, H., Qi, R., Zhang, Z. et Lu, G. (2013). Gender differences of brain glucose metabolic networks revealed by FDG-PET: evidence from a large cohort of 400 young adults. *PLoS One*, 8(12), e83821.
- Hudac, C. M., Cortesa, C. S., Ledwidge, P. S. et Molfese, D. L. (2018). History of concussion impacts electrophysiological correlates of working memory. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 135-144.
- Humphreys, K., Minshew, N., Leonard, G. L. et Behrmann, M. (2007). A fine-grained analysis of facial expression processing in high-functioning adults with autism. *Neuropsychologia*, 45(4), 685-695.
- Hutchison, M. G., Di Battista, A. P., McCoskey, J. et Watling, S. E. (2018). Systematic review of mental health measures associated with concussive and subconcussive head trauma in former athletes. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 55-61.
- Ietswaart, M., Milders, M., Crawford, J. R., Currie, D. et Scott, C. L. (2008, Jan 15). Longitudinal aspects of emotion recognition in patients with traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, 46(1), 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.08.002>
- Itier, R. J. et 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. et Taylor, M. J. (2004a). Effects of repetition learning on upright, inverted and contrast-reversed face processing using ERPs. *Neuroimage*, 21(4), 1518-1532.
- Itier, R. J. et Taylor, M. J. (2004b). Source analysis of the N170 to faces and objects. *Neuroreport*, 15(8), 1261-1265.

- Iverson, G. L., Brooks, B. L., Lovell, M. R. et Collins, M. W. (2006, Jan). No cumulative effects for one or two previous concussions. *Br J Sports Med*, 40(1), 72-75. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.020651>
- Iverson, G. L., Gaetz, M., Lovell, M. R. et Collins, M. W. (2004, May). Cumulative effects of concussion in amateur athletes. *Brain Inj*, 18(5), 433-443. <https://doi.org/10.1080/02699050310001617352>
- Iverson, G. L., Gardner, A. J., Terry, D. P., Ponsford, J. L., Sills, A. K., Broshek, D. K. et Solomon, G. S. (2017). Predictors of clinical recovery from concussion: a systematic review. *British journal of sports medicine*, 51(12), 941-948.
- Iverson, G. L., Silverberg, N. D., Mannix, R., Maxwell, B. A., Atkins, J. E., Zafonte, R. et Berkner, P. D. (2015). Factors associated with concussion-like symptom reporting in high school athletes. *JAMA pediatrics*, 169(12), 1132-1140.
- Ji, L., Cao, X. et Xu, B. (2016). Sex differences of hemispheric lateralization for faces and Chinese characters in early perceptual processing. *Neuroscience letters*, 635, 77-82.
- Johnson, S. C., Pinkston, J. B., Bigler, E. D. et Blatter, D. D. (1996). Corpus callosum morphology in normal controls and traumatic brain injury: Sex differences, mechanisms of injury, and neuropsychological correlates. *Neuropsychology*, 10(3), 408.
- Jotwani, V. et Harmon, K. G. (2010). Postconcussion syndrome in athletes. *Current sports medicine reports*, 9(1), 21-26.
- Joyce, C. et Rossion, B. (2005). The face-sensitive N170 and VPP components manifest the same brain processes: the effect of reference electrode site. *Clinical neurophysiology*, 116(11), 2613-2631.
- Jung, T.-P., Makeig, S., Westerfield, M., Townsend, J., Courchesne, E. et Sejnowski, T. J. (2000). Removal of eye activity artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects. *Clinical neurophysiology*, 111(10), 1745-1758.
- Kamboj, S. K., Krol, K. M. et Curran, H. V. (2015). A specific association between facial disgust recognition and estradiol levels in naturally cycling women. *PLoS One*, 10(4), e0122311.

- Kaminska, O. K., Magnuski, M., Olszanowski, M., Gola, M., Brzezicka, A. et Winkielman, P. (2020). Ambiguous at the second sight: Mixed facial expressions trigger late electrophysiological responses linked to lower social impressions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 20(2), 441-454.
- Kanwisher, N. (2000). Domain specificity in face perception. *Nature neuroscience*, 3(8), 759-763.
- Kanwisher, N., McDermott, J. et Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of neuroscience*, 17(11), 4302-4311.
- Kawasaki, H., Adolphs, R., Kaufman, O., Damasio, H., Damasio, A. R., Granner, M., Bakken, H., Hori, T. et Howard, M. A. (2001). Single-neuron responses to emotional visual stimuli recorded in human ventral prefrontal cortex. *Nature neuroscience*, 4(1), 15-16.
- Keil, A., Bradley, M. M., Hauk, O., Rockstroh, B., Elbert, T. et Lang, P. J. (2002). Large-scale neural correlates of affective picture processing. *Psychophysiology*, 39(5), 641-649.
- Keil, A., Müller, M. M., Gruber, T., Wienbruch, C., Stolarova, M. et Elbert, T. (2001). Effects of emotional arousal in the cerebral hemispheres: a study of oscillatory brain activity and event-related potentials. *Clinical neurophysiology*, 112(11), 2057-2068.
- Kerestes, R., Labuschagne, I., Croft, R. J., O'Neill, B. V., Bhagwagar, Z., Phan, K. L. et Nathan, P. J. (2009). Evidence for modulation of facial emotional processing bias during emotional expression decoding by serotonergic and noradrenergic antidepressants: an event-related potential (ERP) study. *Psychopharmacology*, 202(4), 621-634.
- Kerr, Z. Y., Register-Mihalik, J. K., Kroshus, E., Baugh, C. M. et Marshall, S. W. (2016). Motivations associated with nondisclosure of self-reported concussions in former collegiate athletes. *The american journal of sports medicine*, 44(1), 220-225.
- Kerr, Z. Y., Thomas, L. C., Simon, J. E., McCrea, M. et Guskiewicz, K. M. (2018). Association between history of multiple concussions and health outcomes among former college football players: 15-year follow-up from the NCAA concussion study (1999-2001). *The american journal of sports medicine*, 46(7), 1733-1741.

- Kessels, R. P., Montagne, B., Hendriks, A. W., Perrett, D. I. et de Haan, E. H. (2014). Assessment of perception of morphed facial expressions using the Emotion Recognition Task: Normative data from healthy participants aged 8–75. *Journal of neuropsychology*, 8(1), 75-93.
- Kim, E. Y., Lee, S.-H., Park, G., Kim, S., Kim, I., Chae, J.-H. et Kim, H. T. (2013). Gender difference in event related potentials to masked emotional stimuli in the oddball task. *Psychiatry investigation*, 10(2), 164.
- Koerte, I. K., Schultz, V., Sydnor, V. J., Howell, D. R., Guenette, J. P., Dennis, E., Kochsiek, J., Kaufmann, D., Sollmann, N. et Mondello, S. (2020). Sex-Related Differences in the Effects of Sports-Related Concussion: A Review. *Journal of neuroimaging*, 30(4), 387-409.
- Kolassa, I.-T., Kolassa, S., Bergmann, S., Lauche, R., Dilger, S., Miltner, W. H. et Musial, F. (2009). Interpretive bias in social phobia: An ERP study with morphed emotional schematic faces. *Cognition and Emotion*, 23(1), 69-95.
- Kontos, A. P., Covassin, T., Elbin, R. et Parker, T. (2012). Depression and neurocognitive performance after concussion among male and female high school and collegiate athletes. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 93(10), 1751-1756.
- Koponen, S., Taiminen, T., Hiekkänen, H. et Tenovuo, O. (2011). Axis I and II psychiatric disorders in patients with traumatic brain injury: a 12-month follow-up study. *Brain Inj*, 25(11), 1029-1034. <https://doi.org/10.3109/02699052.2011.607783>
- Koponen, S., Taiminen, T., Portin, R., Himanen, L., Isoniemi, H., Heinonen, H., Hinkka, S. et Tenovuo, O. (2002). Axis I and II psychiatric disorders after traumatic brain injury: a 30-year follow-up study. *American Journal of Psychiatry*.
- Kosaka, B. (2006). Neuropsychological assessment in mild traumatic brain injury: A clinical overview. *BRITISH COLUMBIA MEDICAL JOURNAL*, 48(9), 447.
- Kostyun, R. O. et Hafeez, I. (2015). Protracted recovery from a concussion: a focus on gender and treatment interventions in an adolescent population. *Sports health*, 7(1), 52-57.

- Kret, M. E. et De Gelder, B. (2012). A review on sex differences in processing emotional signals. *Neuropsychologia*, 50(7), 1211-1221.
- Krolak-Salmon, P., Fischer, C., Vighetto, A. et Manguiere, F. (2001). Processing of facial emotional expression: Spatio-temporal data as assessed by scalp event-related potentials. *European Journal of Neuroscience*, 13(5), 987-994.
- Krombholz, A., Schaefer, F. et Boucsein, W. (2007). Modification of N170 by different emotional expression of schematic faces. *Biological psychology*, 76(3), 156-162.
- Kutcher, J. S. et Eckner, J. T. (2010). At-risk populations in sports-related concussion. *Current sports medicine reports*, 9(1), 16-20.
- Labuschagne, I., Croft, R. J., Phan, K. L. et Nathan, P. J. (2010). Augmenting serotonin neurotransmission with citalopram modulates emotional expression decoding but not structural encoding of moderate intensity sad facial emotional stimuli: an event-related potential (ERP) investigation. *Journal of Psychopharmacology*, 24(8), 1153-1164.
- Lancaster, M. A., Olson, D. V., McCrea, M. A., Nelson, L. D., LaRoche, A. A. et Muftuler, L. T. (2016). Acute white matter changes following sport-related concussion: A serial diffusion tensor and diffusion kurtosis tensor imaging study. *Human brain mapping*, 37(11), 3821-3834.
- Landry, M.-H. (2008). *La place des femmes dans le sport au Québec*. Dans d. L. e. d. S. Ministère de l'Éducation (dir.), (p. 50). Québec : Gouvernement du Québec.
- Langner, O., Dotsch, R., Bijlstra, G., Wigboldus, D. H., Hawk, S. T. et Van Knippenberg, A. (2010). Presentation and validation of the Radboud Faces Database. *Cognition and Emotion*, 24(8), 1377-1388.
- Larson-Dupuis, C., Chamard, E., Falardeau, V., Frasnelli, J., Beaulieu, C., Poirier, J., Carrier, J., Lassonde, M., Theoret, H., Bacon, B. A. et De Beaumont, L. (2015). Impact of BDNF Val66Met polymorphism on olfactory functions of female concussed athletes. *Brain Inj*, 29(7-8), 963-970.  
<https://doi.org/10.3109/02699052.2015.1016452>



- Lavoie, M. E., Dupuis, F., Johnston, K. M., Leclerc, S. et Lassonde, M. (2004). Visual p300 effects beyond symptoms in concussed college athletes. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(1), 55-73.
- Ledwidge, P. S. et Molfese, D. L. (2016). Long-term effects of concussion on electrophysiological indices of attention in varsity college athletes: an event-related potential and standardized low-resolution brain electromagnetic tomography approach. *Journal of neurotrauma*, 33(23), 2081-2090.
- Lee, N. C., Krabbendam, L., White, T. P., Meeter, M., Banaschewski, T., Barker, G. J., Bokde, A. L., Büchel, C., Conrod, P. et Flor, H. (2013). Do you see what I see? Sex differences in the discrimination of facial emotions during adolescence. *Emotion*, 13(6), 1030.
- Lee, T., Liu, H., Chan, C., Fang, S. et Gao, J. (2005). Neural activities associated with emotion recognition observed in men and women. *Molecular psychiatry*, 10(5), 450-455.
- Légaré, B. (1999). *La place des femmes dans le sport au Québec*. Dans S. a. l. e. a. sport (dir.), (p. 39). Québec : Gouvernement du Québec.
- Leh, S. E., Schroeder, C., Chen, J.-K., Mallar Chakravarty, M., Park, M. T. M., Cheung, B., Huntgeburth, S. C., Gosselin, N., Hock, C. et Ptito, A. (2017). Microstructural integrity of hippocampal subregions is impaired after mild traumatic brain injury. *Journal of neurotrauma*, 34(7), 1402-1411.
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., Blumenthal, J. D., Lerch, J., Zijdenbos, A. P. et Evans, A. C. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *Neuroimage*, 36(4), 1065-1073.
- Léveillé, E., Desjardins, M., Dumel, G., Blais, C., Saint-Amour, D., Scherzer, P. et De Beaumont, L. (2022). Effects of Emotion and Emotional Ambiguity on Early Visual Event-Related Potentials. *Emotion*. <https://doi.org/10.1037/emo0001119>
- Léveillé, E., Guay, S., Blais, C., Scherzer, P. et De Beaumont, L. (2017). Sex-related differences in emotion recognition in multi-concussed athletes. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 23(1), 65.

- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Bigler, E. D. et Tranel, D. (2012). *Neuropsychological Assessment* (5th éd.). Oxford University Press.
- Li, Q., Zhou, S., Zheng, Y. et Liu, X. (2018). Female advantage in automatic change detection of facial expressions during a happy-neutral context: an ERP study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 146.
- Lin, C. Y., Casey, E., Herman, D. C., Katz, N. et Tenforde, A. S. (2018). Sex differences in common sports injuries. *PM&R*, *10*(10), 1073-1082.
- Lincoln, A. E., Caswell, S. V., Almquist, J. L., Dunn, R. E., Norris, J. B. et 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.
- Lipton, M. L., Kim, N., Zimmerman, M. E., Kim, M., Stewart, W. F., Branch, C. A. et Lipton, R. B. (2013). Soccer heading is associated with white matter microstructural and cognitive abnormalities. *Radiology*, *268*(3), 850-857.
- List, J., Ott, S., Bukowski, M., Lindenberg, R. et Flöel, A. (2015). Cognitive function and brain structure after recurrent mild traumatic brain injuries in young-to-middle-aged adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 228.
- Liu, L., Ioannides, A. A. et Streit, M. (1999). Single trial analysis of neurophysiological correlates of the recognition of complex objects and facial expressions of emotion. *Brain Topography*, *11*(4), 291-303.
- Lopez-Calderon, J. et Luck, S. J. (2014). ERPLAB: an open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 213.
- Lovell, M. R. (2004). Grade 1 or "Ding" Concussions in High School Athletes. *American Journal of Sports Medicine*, *32*(1), 47-54. <https://doi.org/10.1177/0363546503260723>
- Lovell, M. R., Collins, M. W., Iverson, G. L., Field, M., Maroon, J. C., Cantu, R., Podell, K., Powell, J. W., Belza, M. et Fu, F. H. (2003). Recovery from mild concussion in high school athletes. *Journal of neurosurgery*, *98*(2), 296-301.

- Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique* (Second éd.). MIT Press.
- Luck, S. J. et Gaspelin, N. (2017). How to get statistically significant effects in any ERP experiment (and why you shouldn't). *Psychophysiology*, 54(1), 146-157.
- Luck, S. J., Woodman, G. F. et Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 432-440.
- Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N.-Y. et Luo, Y.-J. (2010). Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial visual presentation. *Neuroimage*, 49(2), 1857-1867.
- Lusk, B. R., Carr, A. R., Ranson, V. A. et Felmingham, K. L. (2017). Women in the midluteal phase of the menstrual cycle have difficulty suppressing the processing of negative emotional stimuli: An event-related potential study. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 17(4), 886-903.
- Macciocchi, S. N., Barth, J. T., Alves, W., Rimel, R. W. et Jane, J. A. (1996). Neuropsychological functioning and recovery after mild head injury in collegiate athletes. *Neurosurgery*, 39(3), 510-514.
- Mancuso, M., Magnani, N., Cantagallo, A., Rossi, G., Capitani, D., Galletti, V., Cardamone, G. et Robertson, I. H. (2015). Emotion recognition impairment in traumatic brain injury compared with schizophrenia spectrum: similar deficits with different origins. *The Journal of nervous and mental disease*, 203(2), 87-95.
- Maner, J. K. et Miller, S. L. (2014). Hormones and social monitoring: Menstrual cycle shifts in progesterone underlie women's sensitivity to social information. *Evolution and Human Behavior*, 35(1), 9-16.
- Manley, G., Gardner, A. J., Schneider, K. J., Guskiewicz, K. M., Bailes, J., Cantu, R. C., Castellani, R. J., Turner, M., Jordan, B. D. et Randolph, C. (2017). A systematic review of potential long-term effects of sport-related concussion. *British journal of sports medicine*, 51(12), 969-977.
- Mansell, J., Tierney, R. T., Sitler, M. R., Swanik, K. A. et Stearne, D. (2005). Resistance training and head-neck segment dynamic stabilization in male and female collegiate soccer players. *Journal of Athletic Training*, 40(4), 310.

- Marar, M., McIlvain, N. M., Fields, S. K. et 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.
- Marečková, K., Perrin, J. S., Nawaz Khan, I., Lawrence, C., Dickie, E., McQuiggan, D. A., Paus, T. et Consortium, I. (2014). Hormonal contraceptives, menstrual cycle and brain response to faces. *Social cognitive and affective neuroscience*, 9(2), 191-200.
- Marinkovic, K., Trebon, P., Chauvel, P. et Halgren, E. (2000). Localised face processing by the human prefrontal cortex: Face-selective intracerebral potentials and post-lesion deficits. *Cognitive neuropsychology*, 17(1-3), 187-199.
- Maroon, J. C., Lovell, M. R., Norwig, J., Podell, K., Powell, J. W. et Hartl, R. (2000). Cerebral concussion in athletes: evaluation and neuropsychological testing. *Neurosurgery*, 47(3), 659-672.
- Martini, D. N. et Broglio, S. P. (2018). Long-term effects of sport concussion on cognitive and motor performance: a review. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 25-30.
- Martins, A. T., Faisca, L., Esteves, F., Muresan, A., Justo, M. G., Simão, C. et Reis, A. (2011). Traumatic brain injury patients: Does frontal brain lesion influence basic emotion recognition? *Psychology & Neuroscience*, 4(3), 377-384. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2011.3.011>
- Mattavelli, G., Sormaz, M., Flack, T., Asghar, A. U., Fan, S., Frey, J., Manssuer, L., Usten, D., Young, A. W. et Andrews, T. J. (2014). Neural responses to facial expressions support the role of the amygdala in processing threat. *Social cognitive and affective neuroscience*, 9(11), 1684-1689.
- Mayer, A. R., Ling, J. M., Dodd, A. B., Meier, T. B., Hanlon, F. M. et Klimaj, S. D. (2017). A prospective microstructure imaging study in mixed-martial artists using geometric measures and diffusion tensor imaging: methods and findings. *Brain imaging and behavior*, 11(3), 698-711.
- McAllister, T. W., Ford, J. C., Flashman, L. A., Maerlender, A., Greenwald, R. M., Beckwith, J. G., Bolander, R. P., Tosteson, T. D., Turco, J. H. et Raman, R. (2014). Effect of head impacts on diffusivity measures in a cohort of collegiate contact sport athletes. *Neurology*, 82(1), 63-69.

- McAllister, T. W. et McCrea, M. (2017). Long-term cognitive and neuropsychiatric consequences of repetitive concussion and head-impact exposure. *Journal of Athletic Training*, 52(3), 309-317.
- McAllister, T. W., Sparling, M. B., Flashman, L. A., Guerin, S. J., Mamourian, A. C. et Saykin, A. J. (2001). Differential working memory load effects after mild traumatic brain injury. *Neuroimage*, 14(5), 1004-1012.
- McClure, E. B. (2000). A meta-analytic review of sex differences in facial expression processing and their development in infants, children, and adolescents. *Psychological bulletin*, 126(3), 424.
- McCrea, M., Barr, W. B., Guskiewicz, K. M., Randolph, C., Marshall, S. W., Cantu, R., Onate, J. A. et Kelly, J. P. (2005). Standard regression-based methods for measuring recovery after sport-related concussion. *Journal of the International neuropsychological Society*, 11(01), 58-69.
- McCrea, M., Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Barr, W., Randolph, C., Cantu, R. C., Onate, J. A., Yang, J. et Kelly, J. P. (2003). Acute effects and recovery time following concussion in collegiate football players: the NCAA Concussion Study. *JAMA*, 290(19), 2556-2563.
- McCrea, M., Hammeke, T., Olsen, G., Leo, P. et Guskiewicz, K. (2004). Unreported concussion in high school football players: implications for prevention. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 14(1), 13-17.
- McCrory, P., Meeuwisse, W., Dvorak, J., Aubry, M., Bailes, J., Broglio, S., Cantu, R. C., Cassidy, D., Echemendia, R. J. et Castellani, R. J. (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.
- McCrory, P., Meeuwisse, W. H., Aubry, M., Cantu, B., Dvorak, J., Echemendia, R. J., Engebretsen, L., Johnston, K., Kutcher, J. S., Raftery, M., Sills, A., Benson, B. W., Davis, G. A., Ellenbogen, R. G., Guskiewicz, K. M., Herring, S. A., Iverson, G. L., Jordan, B. D., Kissick, J., McCrea, M., McIntosh, A. S., Maddocks, D., Makdissi, M., Purcell, L., Putukian, M., Schneider, K., Tator, C. H. et Turner, M. (2013, Apr). Consensus statement on concussion in sport: the 4th International Conference on

- Concussion in Sport held in Zurich, November 2012. *Br J Sports Med*, 47(5), 250-258.  
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092313>
- McDonald, B. C., Saykin, A. J. et McAllister, T. W. (2012). Functional MRI of mild traumatic brain injury (mTBI): progress and perspectives from the first decade of studies. *Brain imaging and behavior*, 6(2), 193-207.
- McDonald, S. (2013, Mar). Impairments in social cognition following severe traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc*, 19(3), 231-246. <https://doi.org/10.1017/S1355617712001506>
- McDonald, S. et Flanagan, S. (2004, Jul). Social perception deficits after traumatic brain injury: interaction between emotion recognition, mentalizing ability, and social communication. *Neuropsychology*, 18(3), 572-579. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.572>
- McDonald, S., Flanagan, S., Rollins, J. et Kinch, J. (2003). TASIT: A new clinical tool for assessing social perception after traumatic brain injury. *The Journal of head trauma rehabilitation*, 18(3), 219-238.
- McDonald, S., Li, S., De Sousa, A., Rushby, J., Dimoska, A., James, C. et Tate, R. L. (2011, Jan). Impaired mimicry response to angry faces following severe traumatic brain injury. *J Clin Exp Neuropsychol*, 33(1), 17-29. <https://doi.org/10.1080/13803391003761967>
- McDonald, S., Rushby, J. A., Dalton, K. I., Allen, S. K. et Parks, N. (2018). The role of abnormalities in the corpus callosum in social cognition deficits after Traumatic Brain Injury. *Social neuroscience*, 13(4), 471-479.
- McDonald, T., Burghart, M. A. et Nazir, N. (2016). Underreporting of concussions and concussion-like symptoms in female high school athletes. *Journal of Trauma Nursing | JTN*, 23(5), 241-246.
- McGroarty, N. K., Brown, S. M. et Mulcahey, M. K. (2020). Sport-related concussion in female athletes: A systematic review. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 8(7), 2325967120932306.
- Meeren, H. K., van Heijnsbergen, C. C. et 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.

- Meier, T. B., Bellgowan, P. S., Bergamino, M., Ling, J. M. et Mayer, A. R. (2016). Thinner cortex in collegiate football players with, but not without, a self-reported history of concussion. *Journal of neurotrauma*, 33(4), 330-338.
- Meier, T. B., Bergamino, M., Bellgowan, P. S., Teague, T., Ling, J. M., Jeromin, A. et Mayer, A. R. (2016). Longitudinal assessment of white matter abnormalities following sports-related concussion. *Human brain mapping*, 37(2), 833-845.
- Meier, T. B., Savitz, J., Singh, R., Teague, T. K. et Bellgowan, P. S. (2016). Smaller dentate gyrus and CA2 and CA3 volumes are associated with kynurenine metabolites in collegiate football athletes. *Journal of neurotrauma*, 33(14), 1349-1357.
- Mende-Siedlecki, P., Verosky, S. C., Turk-Browne, N. B. et Todorov, A. (2013). Robust selectivity for faces in the human amygdala in the absence of expressions. *Journal of cognitive neuroscience*, 25(12), 2086-2106.
- Menon, D. K., Schwab, K., Wright, D. W. et Maas, A. I. (2010). Position statement: definition of traumatic brain injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 91(11), 1637-1640.
- Merritt, V. C., Padgett, C. R. et Jak, A. J. (2019). A systematic review of sex differences in concussion outcome: what do we know? *The Clinical Neuropsychologist*, 33(6), 1016-1043.
- Milders, M., Ietswaart, M., Crawford, J. R. et Currie, D. (2006, Jul). Impairments in theory of mind shortly after traumatic brain injury and at 1-year follow-up. *Neuropsychology*, 20(4), 400-408. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.20.4.400>
- Milders, M., Ietswaart, M., Crawford, J. R. et Currie, D. (2008). Social behavior following traumatic brain injury and its association with emotion recognition, understanding of intentions, and cognitive flexibility. *Journal of the International neuropsychological Society*, 14(02), 318-326.
- Molfese, D. L. (2015). The need for theory to guide concussion research. *Developmental neuropsychology*, 40(1), 1-6.

- Montagne, B., Kessels, R. P., Frigerio, E., de Haan, E. H. et Perrett, D. I. (2005). Sex differences in the perception of affective facial expressions: Do men really lack emotional sensitivity? *Cognitive processing*, 6(2), 136-141.
- Moore, R. D., Broglio, S. P. et Hillman, C. H. (2014). Sport-related concussion and sensory function in young adults. *Journal of Athletic Training*, 49(1), 36-41.
- Moore, R. D., Hillman, C. H. et Broglio, S. P. (2014). The persistent influence of concussive injuries on cognitive control and neuroelectric function. *Journal of Athletic Training*, 49(1), 24-35.
- Moore, R. D., Lepine, J. et Elleberg, 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.
- Morris, J. S., Friston, K. J., Büchel, C., Frith, C. D., Young, A. W., Calder, A. J. et Dolan, R. J. (1998). A neuromodulatory role for the human amygdala in processing emotional facial expressions. *Brain: a journal of neurology*, 121(1), 47-57.
- Morris, J. S., Frith, C. D., Perrett, D. I., Rowland, D., Young, A. W., Calder, A. J. et Dolan, R. J. (1996). A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions. *Nature*, 383(6603), 812-815.
- MSSS. (2005). *Orientations ministérielles pour le traumatisme craniocérébral léger 2005-2010*. Québec : Gouvernement du Québec.
- Müller-Bardorff, M., Schulz, C., Peterburs, J., Bruchmann, M., Mothes-Lasch, M., Miltner, W. et Straube, T. (2016). Effects of emotional intensity under perceptual load: An event-related potentials (ERPs) study. *Biological psychology*, 117, 141-149.
- Multani, N., Goswami, R., Khodadadi, M., Ebraheem, A., Davis, K. D., Tator, C. H., Wennberg, R., Mikulis, D. J., Ezerins, L. et Tartaglia, M. C. (2016). The association between white-matter tract abnormalities, and neuropsychiatric and cognitive symptoms in retired professional football players with multiple concussions. *Journal of neurology*, 263(7), 1332-1341.



- Murphy, J. M., Bennett, J. M., de la Piedad Garcia, X. et Willis, M. L. (2021). Emotion recognition and traumatic brain injury: a systematic review and meta-analysis. *Neuropsychology review*, 1-17.
- Murugavel, M., Cubon, V., Putukian, M., Echemendia, R., Cabrera, J., Osherson, D. et Dettwiler, A. (2014). A longitudinal diffusion tensor imaging study assessing white matter fiber tracts after sports-related concussion. *Journal of neurotrauma*, 31(22), 1860-1871.
- Muukkonen, I., Ölander, K., Numminen, J. et Salmela, V. R. (2020). Spatio-temporal dynamics of face perception. *Neuroimage*, 209, 116531.
- National Collegiate Athletic Association. (2021). *NCAA Demographics Database*. National Collegiate Athletic Association.
- Niemeier, J. P. (2019). Biological sex/gender and biopsychosocial determinants of traumatic brain injury recovery trajectories. *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports*, 7(4), 297-304.
- O’Kane, J. W., Spieker, A., Levy, M. R., Neradilek, M., Polissar, N. L. et Schiff, M. A. (2014). Concussion among female middle-school soccer players. *JAMA pediatrics*, 168(3), 258-264.
- Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H. et Polich, J. (2008). Affective picture processing: an integrative review of ERP findings. *Biological psychology*, 77(3), 247-265.
- Osório, F. L., de Paula Cassis, J. M., Machado de Sousa, J. P., Poli-Neto, O. et Martín-Santos, R. (2018). Sex hormones and processing of facial expressions of emotion: a systematic literature review. *Frontiers in Psychology*, 9, 529.
- Ozen, L. J., Itier, R. J., Preston, F. F. et Fernandes, M. A. (2013). Long-term working memory deficits after concussion: electrophysiological evidence. *Brain Injury*, 27(11), 1244-1255.
- Pahnke, R., Mau-Moeller, A., Junge, M., Wendt, J., Weymar, M., Hamm, A. O. et Lischke, A. (2019). Oral contraceptives impair complex emotion recognition in healthy women. *Frontiers in neuroscience*, 12, 1041.
- Pearson, R. et Lewis, M. B. (2005). Fear recognition across the menstrual cycle. *Hormones and behavior*, 47(3), 267-271.

- Petrovic, S. A., Jerotic, S., Mihaljevic, M., Pavlovic, Z., Ristic, I., Soldatovic, I. et Maric, N. P. (2019). Sex differences in facial emotion recognition in health and psychotic disorders. *Cognitive neuropsychiatry*, 24(2), 108-122.
- Phillips, M. L., Drevets, W. C., Rauch, S. L. et Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: the neural basis of normal emotion perception. *Biological Psychiatry*, 54(5), 504-514. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(03\)00168-9](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(03)00168-9)
- Phillips, M. L., Young, A. W., Scott, S., Calder, A. J., Andrew, C., Giampietro, V., Williams, S. C. R., Bullmore, E. T., Brammer, M. et Gray, J. A. (1998). Neural responses to facial and vocal expressions of fear and disgust. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 265(1408), 1809-1817.
- Phillips, M. L., Young, A. W., Senior, C., Brammer, M., Andrew, C., Calder, A. J., Bullmore, E. T., Perrett, D. I., Rowland, D. et Williams, S. C. R. (1997). A specific neural substrate for perceiving facial expressions of disgust. *Nature*, 389(6650), 495-498.
- Picton, T., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S., Johnson Jr, R., Miller, G., Ritter, W., Ruchkin, D. et Rugg, M. (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. et Davidson, R. J. (2002). Affective judgments of faces modulate early activity (~ 160 ms) within the fusiform gyri. *Neuroimage*, 16(3), 663-677.
- Pletzer, B. A. et Kerschbaum, H. H. (2014). 50 years of hormonal contraception—time to find out, what it does to our brain. *Frontiers in neuroscience*, 8, 256.
- Plöchl, M., Ossandón, J. P. et König, P. (2012). Combining EEG and eye tracking: identification, characterization, and correction of eye movement artifacts in electroencephalographic data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 278.
- Pontifex, M. B., O'Connor, P. M., Broglio, S. P. et Hillman, C. H. (2009). The association between mild traumatic brain injury history and cognitive control. *Neuropsychologia*, 47(14), 3210-3216.

- Posamentier, M. T. et Abdi, H. (2003). Processing faces and facial expressions. *Neuropsychology review*, 13(3), 113-143.
- Pourtois, G., Grandjean, D., Sander, D. et Vuilleumier, P. (2004). Electrophysiological correlates of rapid spatial orienting towards fearful faces. *Cerebral cortex*, 14(6), 619-633.
- Pourtois, G., Thut, G., de Peralta, R. G., Michel, C. et Vuilleumier, P. (2005). Two electrophysiological stages of spatial orienting towards fearful faces: early temporo-parietal activation preceding gain control in extrastriate visual cortex. *Neuroimage*, 26(1), 149-163.
- Proverbio, A. M., Brignone, V., Matarazzo, S., Del Zotto, M. et Zani, A. (2006). Gender differences in hemispheric asymmetry for face processing. *BMC neuroscience*, 7(1), 44.
- Putukian, M., Riegler, K., Amalfe, S., Bruce, J. et Echemendia, R. (2021). Preinjury and postinjury factors that predict sports-related concussion and clinical recovery time. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 31(1), 15-22.
- Queen, R. M., Weinhold, P. S., Kirkendall, D. T. et Yu, B. (2003). Theoretical study of the effect of ball properties on impact force in soccer heading. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(12), 2069-2076.
- Radhakrishnan, R., Garakani, A., Gross, L. S., Goin, M. K., Pine, J., Slaby, A. E., Sumner, C. R. et Baron, D. A. (2016). Neuropsychiatric aspects of concussion. *The Lancet Psychiatry*, 3(12), 1166-1175.
- Radke, S. et Derntl, B. (2016). Affective responsiveness is influenced by intake of oral contraceptives. *European Neuropsychopharmacology*, 26(6), 1014-1019.
- Rahko, J., Paakki, J.-J., Starck, T., Nikkinen, J., Remes, J., Hurtig, T., Kuusikko-Gauffin, S., Mattila, M.-L., Jussila, K. et Jansson-Verkasalo, E. (2010). Functional mapping of dynamic happy and fearful facial expression processing in adolescents. *Brain imaging and behavior*, 4(2), 164-176.
- Rahman, Q., Wilson, G. D. et Abrahams, S. (2004). Sex, sexual orientation, and identification of positive and negative facial affect. *Brain and Cognition*, 54(3), 179-185.

- Rapcsak, S. Z., Galper, S., Comer, J., Reminger, S., Nielsen, L., Kaszniak, A., Verfaellie, M., Laguna, J., Labiner, D. et Cohen, R. (2000). Fear recognition deficits after focal brain damage: a cautionary note. *Neurology*, *54*(3), 575-575.
- Raz, N., Gunning-Dixon, F., Head, D., Rodrigue, K. M., Williamson, A. et Acker, J. D. (2004). Aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry of the cerebral cortex: replicability of regional differences in volume. *Neurobiology of aging*, *25*(3), 377-396.
- Recio, G., Schacht, A. et Sommer, W. (2014). Recognizing dynamic facial expressions of emotion: Specificity and intensity effects in event-related brain potentials. *Biological psychology*, *96*, 111-125.
- Reddy, C. C. et Collins, M. W. (2009). Sports concussion: management and predictors of outcome. *Current sports medicine reports*, *8*(1), 10-15.
- Redlinger, F., Sicard, V., Caron, G. et Elleberg, D. (2022). Long-Term Cognitive Impairments of Sports Concussions in College-Aged Athletes: A Meta-Analysis. *Translational Journal of the American College of Sports Medicine*, *7*(2), e000193.
- Rellecke, J., Palazova, M., Sommer, W. et Schacht, A. (2011). On the automaticity of emotion processing in words and faces: event-related brain potentials evidence from a superficial task. *Brain and Cognition*, *77*(1), 23-32.
- Rellecke, J., Sommer, W. et Schacht, A. (2012). Does processing of emotional facial expressions depend on intention? Time-resolved evidence from event-related brain potentials. *Biological psychology*, *90*(1), 23-32.
- Resch, J. E., Rach, A., Walton, S. et Broshek, D. K. (2017). Sport concussion and the female athlete. *Clinics in sports medicine*, *36*(4), 717-739.
- Rice, S. M., Parker, A. G., Rosenbaum, S., Bailey, A., Mawren, D. et Purcell, R. (2018). Sport-related concussion and mental health outcomes in elite athletes: a systematic review. *Sports medicine*, *48*(2), 447-465.

- Richards, A., French, C. C., Calder, A. J., Webb, B., Fox, R. et Young, A. W. (2002). Anxiety-related bias in the classification of emotionally ambiguous facial expressions. *Emotion*, 2(3), 273.
- Rigon, A., Turkstra, L., Mutlu, B. et Duff, M. (2016). The female advantage: sex as a possible protective factor against emotion recognition impairment following traumatic brain injury. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 16(5), 866-875.
- Rigon, A., Voss, M. W., Turkstra, L. S., Mutlu, B. et Duff, M. (2017). Relationship between individual differences in functional connectivity and facial-emotion recognition abilities in adults with traumatic brain injury. *NeuroImage: Clinical*, 13, 370-377.
- Rigon, A., Voss, M. W., Turkstra, L. S., Mutlu, B. et Duff, M. C. (2018). Different aspects of facial affect recognition impairment following traumatic brain injury: The role of perceptual and interpretative abilities. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 40(8), 805-819.
- Rigoulot, S., D'Hondt, F., Honoré, J. et Sequeira, H. (2012). Implicit emotional processing in peripheral vision: Behavioral and neural evidence. *Neuropsychologia*, 50(12), 2887-2896.
- Ripley, D. L., Harrison-Felix, C., Sendroy-Terrill, M., Cusick, C. P., Dannels-McClure, A. et Morey, C. (2008). The impact of female reproductive function on outcomes after traumatic brain injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 89(6), 1090-1096.
- Roberge, A., Duncan, J., Fiset, D. et Brisson, B. (2019). Dual-task interference on early and late stages of facial emotion detection is revealed by human electrophysiology. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 391.
- Roberts, A. L., Pascual-Leone, A., Speizer, F. E., Zafonte, R. D., Baggish, A. L., Taylor Jr, H., Nadler, L. M., Courtney, T. K., Connor, A. et Grashow, R. (2019). Exposure to American football and neuropsychiatric health in former national football league players: findings from the football players health study. *The american journal of sports medicine*, 47(12), 2871-2880.
- Roof, R. L., Duvdevani, R., Braswell, L. et Stein, D. G. (1994). Progesterone facilitates cognitive recovery and reduces secondary neuronal loss caused by cortical contusion injury in male rats. *Experimental neurology*, 129(1), 64-69.

- Roof, R. L., Duvdevani, R. et Stein, D. G. (1993). Gender influences outcome of brain injury: progesterone plays a protective role. *Brain research*, 607(1-2), 333-336.
- Roof, R. L. et Hall, E. D. (2000a). Estrogen-related gender difference in survival rate and cortical blood flow after impact-acceleration head injury in rats. *Journal of neurotrauma*, 17(12), 1155-1169.
- Roof, R. L. et HALL, E. D. (2000b). Gender differences in acute CNS trauma and stroke: neuroprotective effects of estrogen and progesterone. *Journal of neurotrauma*, 17(5), 367-388.
- Rosenberg, H., Dethier, M., Kessels, R. P., Westbrook, R. F. et McDonald, S. (2015, Jul). Emotion perception after moderate-severe traumatic brain injury: The valence effect and the role of working memory, processing speed, and nonverbal reasoning. *Neuropsychology*, 29(4), 509-521.  
<https://doi.org/10.1037/neu0000171>
- Rossion, B., Campanella, S., Gomez, C. M., Delinte, A., Debatisse, D., Liard, L., Dubois, S., Bruyer, R., Crommelinck, M. et Guerit, J.-M. (1999). Task modulation of brain activity related to familiar and unfamiliar face processing: an ERP study. *Clinical neurophysiology*, 110(3), 449-462.
- Rossion, B. et Jacques, C. (2012). The N170: Understanding the time course of face perception in the human brain.
- Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W. et Tarr, M. J. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage*, 20(3), 1609-1624.
- Rutishauser, U., Tudusciuc, O., Neumann, D., Mamelak, A. N., Heller, A. C., Ross, I. B., Philpott, L., Sutherling, W. W. et Adolphs, R. (2011). Single-unit responses selective for whole faces in the human amygdala. *Current Biology*, 21(19), 1654-1660.
- Sabatinelli, D., Fortune, E. E., Li, Q., Siddiqui, A., Krafft, C., Oliver, W. T., Beck, S. et Jeffries, J. (2011). Emotional perception: meta-analyses of face and natural scene processing. *Neuroimage*, 54(3), 2524-2533.
- Sandel, N. K., Schatz, P., Goldberg, K. B. et Lazar, M. (2017). Sex-based differences in cognitive deficits and symptom reporting among acutely concussed adolescent lacrosse and soccer players. *The american journal of sports medicine*, 45(4), 937-944.

- Sasson, N. J., Pinkham, A. E., Richard, J., Hughett, P., Gur, R. E. et Gur, R. C. (2010). Controlling for response biases clarifies sex and age differences in facial affect recognition. *Journal of Nonverbal Behavior*, 34(4), 207-221.
- Saylik, R., Raman, E. et Szameitat, A. J. (2018). Sex differences in emotion recognition and working memory tasks. *Frontiers in Psychology*, 9, 1072.
- Schallmo, M. S., Weiner, J. A. et Hsu, W. K. (2017). Sport and sex-specific reporting trends in the epidemiology of concussions sustained by high school athletes. *JBJS*, 99(15), 1314-1320.
- Schatz, P., Moser, R. S., Covassin, T. et Karpf, R. (2011). Early indicators of enduring symptoms in high school athletes with multiple previous concussions. *Neurosurgery*, 68(6), 1562-1567.
- Schienle, A., Schäfer, A., Stark, R., Walter, B. et Vaitl, D. (2005). Gender differences in the processing of disgust-and fear-inducing pictures: an fMRI study. *Neuroreport*, 16(3), 277-280.
- Schindler, S., Bruchmann, M., Bublatzky, F. et Straube, T. (2019). Modulation of face-and emotion-selective ERPs by the three most common types of face image manipulations. *Social cognitive and affective neuroscience*, 14(5), 493-503.
- Schneider, S., Peters, J., Bromberg, U., Brassens, S., Menz, M. M., Miedl, S. F., Loth, E., Banaschewski, T., Barbot, A. et Barker, G. (2011). Boys do it the right way: sex-dependent amygdala lateralization during face processing in adolescents. *Neuroimage*, 56(3), 1847-1853.
- Schranz, A. L., Manning, K. Y., Dekaban, G. A., Fischer, L., Jevremovic, T., Blackney, K., Barreira, C., Doherty, T. J., Fraser, D. D. et Brown, A. (2018). Reduced brain glutamine in female varsity rugby athletes after concussion and in non-concussed athletes after a season of play. *Human brain mapping*, 39(4), 1489-1499.
- Schulz, M. R., Marshall, S. W., Mueller, F. O., Yang, J., Weaver, N. L., Kalsbeek, W. D. et Bowling, J. M. (2004). Incidence and risk factors for concussion in high school athletes, North Carolina, 1996–1999. *American journal of epidemiology*, 160(10), 937-944.
- Schupp, H. T., Junghöfer, M., Weike, A. I. et Hamm, A. O. (2003). Attention and emotion: an ERP analysis of facilitated emotional stimulus processing. *Neuroreport*, 14(8), 1107-1110.

- Schweinberger, S. R., Pickering, E. C., Jentsch, I., Burton, A. M. et Kaufmann, J. M. (2002). Event-related brain potential evidence for a response of inferior temporal cortex to familiar face repetitions. *Cognitive Brain Research*, *14*(3), 398-409.
- Schyns, P. G., Petro, L. S. et Smith, M. L. (2009). Transmission of facial expressions of emotion co-evolved with their efficient decoding in the brain: behavioral and brain evidence. *PLoS One*, *4*(5), e5625.
- Scoville, W. B. et Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, *20*(1), 11.
- Shah-Basak, P. P., Urbain, C., Wong, S., Da Costa, L., Pang, E. W., Dunkley, B. T. et Taylor, M. J. (2018). Concussion alters the functional brain processes of visual attention and working memory. *Journal of neurotrauma*, *35*(2), 267-277.
- Shibata, T., Nishijo, H., Tamura, R., Miyamoto, K., Eifuku, S., Endo, S. et Ono, T. (2002). Generators of visual evoked potentials for faces and eyes in the human brain as determined by dipole localization. *Brain Topography*, *15*(1), 51-63.
- Shirazi, T. N., Rosenfield, K. A., Cárdenas, R. A., Breedlove, S. M. et Puts, D. A. (2020). No evidence that hormonal contraceptive use or circulating sex steroids predict complex emotion recognition. *Hormones and behavior*, *119*, 104647.
- Sicard, V., Moore, R. D. et Ellemberg, D. (2018). Long-term cognitive outcomes in male and female athletes following sport-related concussions. *International Journal of Psychophysiology*, *132*, 3-8.
- Singh, R., Meier, T. B., Kuplicki, R., Savitz, J., Mukai, I., Cavanagh, L., Allen, T., Teague, T. K., Nerio, C. et Polanski, D. (2014). Relationship of collegiate football experience and concussion with hippocampal volume and cognitive outcomes. *JAMA*, *311*(18), 1883-1888.
- Slobounov, S., Slobounov, E., Sebastianelli, W., Cao, C. et Newell, K. (2007, Aug). Differential rate of recovery in athletes after first and second concussion episodes. *Neurosurgery*, *61*(2), 338-344; discussion 344. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000280001.03578.FF>
- Slobounov, S., Walter, A., Breiter, H. C., Zhu, D. C., Bai, X., Bream, T., Seidenberg, P., Mao, X., Johnson, B. et Talavage, T. M. (2017). The effect of repetitive subconcussive collisions on brain integrity in



- collegiate football players over a single football season: a multi-modal neuroimaging study. *NeuroImage: Clinical*, 14, 708-718.
- Smith, E., Weinberg, A., Moran, T. et Hajcak, G. (2013). Electro cortical responses to NIMSTIM facial expressions of emotion. *International Journal of Psychophysiology*, 88(1), 17-25.
- Smith, M. L., Cottrell, G. W., Gosselin, F. et Schyns, P. G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions. *Psychological Science*, 16(3), 184-189.
- Smith, N. K., Cacioppo, J. T., Larsen, J. T. et Chartrand, T. L. (2003). May I have your attention, please: Electro cortical responses to positive and negative stimuli. *Neuropsychologia*, 41(2), 171-183.
- Snook, M. L., Henry, L. C., Sanfilippo, J. S., Zeleznik, A. J. et Kontos, A. P. (2017). Association of concussion with abnormal menstrual patterns in adolescent and young women. *JAMA pediatrics*, 171(9), 879-886.
- Sollmann, N., Echlin, P. S., Schultz, V., Viher, P. V., Lyall, A. E., Tripodis, Y., Kaufmann, D., Hartl, E., Kinzel, P. et Forwell, L. A. (2018). Sex differences in white matter alterations following repetitive subconcussive head impacts in collegiate ice hockey players. *NeuroImage: Clinical*, 17, 642-649.
- Solomon, G. S., Kuhn, A. W. et Zuckerman, S. L. (2016). Depression as a modifying factor in sport-related concussion: a critical review of the literature. *The Physician and sportsmedicine*, 44(1), 14-19.
- Spikman, J. M., Milders, M. V., Visser-Keizer, A. C., Westerhof-Evers, H. J., Herben-Dekker, M. et van der Naalt, J. (2013). Deficits in facial emotion recognition indicate behavioral changes and impaired self-awareness after moderate to severe traumatic brain injury. *PLoS One*, 8(6), e65581.
- Sprengelmeyer, R. et Jentsch, I. (2006). Event related potentials and the perception of intensity in facial expressions. *Neuropsychologia*, 44(14), 2899-2906.
- Sprengelmeyer, R., Rausch, M., Eysel, U. T. et Przuntek, H. (1998). Neural structures associated with recognition of facial expressions of basic emotions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 265(1409), 1927-1931.
- Sprengelmeyer, R., Young, A., Pundt, I., Sprengelmeyer, A., Calder, A. J., Berrios, G., Winkel, R., Vollmöeller, W., Kuhn, W. et Sartory, G. (1997). Disgust implicated in obsessive-compulsive

- disorder. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 264(1389), 1767-1773.
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Calder, A. J., Karnat, A., Lange, H., Hömberg, V., Perrett, D. I. et Rowland, D. (1996). Loss of disgust: Perception of faces and emotions in Huntington's disease. *Brain*, 119(5), 1647-1665.
- Squire, L. R., Stark, C. E. et Clark, R. E. (2004). The medial temporal lobe. *Annu. Rev. Neurosci.*, 27, 279-306.
- Squire, L. R. et Zola-Morgan, S. (1991). The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253(5026), 1380-1386.
- Stasch, J., Mohr, B. et Neuhaus, A. H. (2018). Disentangling the interaction of sex differences and hemispheric specialization for face processing—Evidence from ERPs. *Biological psychology*, 136, 144-150.
- Stone, S., Lee, B., Garrison, J. C., Blueitt, D. et Creed, K. (2017). Sex differences in time to return-to-play progression after sport-related concussion. *Sports health*, 9(1), 41-44.
- Strain, J., Didehbani, N., Cullum, C. M., Mansinghani, S., Conover, H., Kraut, M. A., Hart, J. et Womack, K. B. (2013). Depressive symptoms and white matter dysfunction in retired NFL players with concussion history. *Neurology*, 81(1), 25-32.
- Strand, S., Lechuga, D., Zachariah, T. et Beaulieu, K. (2015). Relative risk for concussions in young female soccer players. *Applied Neuropsychology: Child*, 4(1), 58-64.
- Strauss, E., Sherman, E. M. et Spreen, O. (2006). *A Compendium of Neuropsychological Tests: Administration, Norms, and Commentary* (3rd éd.). Oxford University Press.
- Streit, M., Ioannides, A., Liu, L., Wölwer, W., Dammers, J., Gross, J., Gaebel, W. et 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.
- Stuss, D. T., Alexander, M. P. et Benson, D. F. (1997). Frontal lobe functions.

- Sun, L., Ren, J. et He, W. (2017). Neural correlates of facial expression processing during a detection task: An ERP study. *PLoS One*, 12(3), e0174016.
- Tabachnick, B. G. et Fidell, L. S. (2007). *Using Multivariate Statistics* (Pearson, dir. 5th éd.).
- Tanveer, S., Zecavati, N., Delasobera, E. B. et Oyegbile, T. O. (2017). Gender differences in concussion and postinjury cognitive findings in an older and younger pediatric population. *Pediatric neurology*, 70, 44-49.
- Tardif, J., Fiset, D. et Blais, C. (2014). Narcissistic personality differences in facial emotional expression categorization. *Journal of Vision*, 14(10), 1444-1444.
- Tardif, J., Hébert, K., Blais, C., Fiset, D., Mercier, K., Brunet, J.-F., Dion-Marcoux, Y. et Forest, G. (2014). The impact of sleep deprivation on the ability to recognize blended human emotions. *SLEEP*, A89.
- Tate, D. F. et Bigler, E. D. (2000). Fornix and hippocampal atrophy in traumatic brain injury. *Learning & memory*, 7(6), 442-446.
- Taylor, M. J., Itier, R. J., Allison, T. et Edmonds, G. E. (2001). Direction of gaze effects on early face processing: eyes-only versus full faces. *Cognitive Brain Research*, 10(3), 333-340.
- Teasdale, G. et Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness: a practical scale. *The Lancet*, 304(7872), 81-84.
- Terburg, D., Morgan, B., Montoya, E., Hooge, I., Thornton, H., Hariri, A., Panksepp, J., Stein, D. et Van Honk, J. (2012). Hypervigilance for fear after basolateral amygdala damage in humans. *Translational Psychiatry*, 2(5), e115-e115.
- Thayer, J. et Johnsen, B. H. (2000). Sex differences in judgement of facial affect: A multivariate analysis of recognition errors. *Scandinavian journal of psychology*, 41(3), 243-246.
- Theriault, M., De Beaumont, L., Gosselin, N., Filipinni, M. et Lassonde, M. (2009, Oct). Electrophysiological abnormalities in well functioning multiple concussed athletes. *Brain Inj*, 23(11), 899-906. <https://doi.org/10.1080/02699050903283189>

- Theriault, M., De Beaumont, L., Tremblay, S., Lassonde, M. et Jolicoeur, P. (2011, Jan). Cumulative effects of concussions in athletes revealed by electrophysiological abnormalities on visual working memory. *J Clin Exp Neuropsychol*, 33(1), 30-41. <https://doi.org/10.1080/13803391003772873>
- Thompson, A. E. et Voyer, D. (2014). Sex differences in the ability to recognise non-verbal displays of emotion: A meta-analysis. *Cognition and Emotion*, 28(7), 1164-1195.
- Tierney, R. T., Higgins, M., Caswell, S. V., Brady, J., McHardy, K., Driban, J. B. et Darvish, K. (2008). Sex differences in head acceleration during heading while wearing soccer headgear. *Journal of Athletic Training*, 43(6), 578-584.
- Tierney, R. T., Sitler, M. R., Swanik, C. B., Swanik, K. A., Higgins, M. et 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.
- Tortosa, M. I., Lupiáñez, J. et Ruz, M. (2013). Race, emotion and trust: An ERP study. *Brain research*, 1494, 44-55.
- Tremblay, S., De Beaumont, L., Henry, L. C., Boulanger, Y., Evans, A. C., Bourgoïn, P., Poirier, J., Theoret, H. et Lassonde, M. (2013, May). Sports concussions and aging: a neuroimaging investigation. *Cereb Cortex*, 23(5), 1159-1166. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs102>
- Tremblay, S., Henry, L. C., Bedetti, C., Larson-Dupuis, C., Gagnon, J.-F., Evans, A. C., Theoret, H., Lassonde, M. et De Beaumont, L. (2014). Diffuse white matter tract abnormalities in clinically normal ageing retired athletes with a history of sports-related concussions. *Brain*, 137(11), 2997-3011.
- Tremblay, S., Iturria-Medina, Y., Mateos-Pérez, J. M., Evans, A. C. et De Beaumont, L. (2017). Defining a multimodal signature of remote sports concussions. *European Journal of Neuroscience*, 46(4), 1956-1967.
- Trojian, T. (2016). *Depression is under-recognised in the sport setting: time for primary care sports medicine to be proactive and screen widely for depression symptoms* (vol. 50, pp. 137-139) : BMJ Publishing Group Ltd and British Association of Sport and Exercise Medicine.

- Tsuchida, A. et Fellows, L. K. (2012). Are you upset? Distinct roles for orbitofrontal and lateral prefrontal cortex in detecting and distinguishing facial expressions of emotion. *Cerebral cortex*, 22(12), 2904-2912.
- Turano, M. T., Lao, J., Richoz, A.-R., Lissa, P. d., Degosciu, S. B., Viggiano, M. P. et Caldara, R. (2017). Fear boosts the early neural coding of faces. *Social cognitive and affective neuroscience*, 12(12), 1959-1971.
- Turgeon, J., Bérubé, A., Blais, C., Lemieux, A. et Fournier, A. (2020). Recognition of children's emotional facial expressions among mothers reporting a history of childhood maltreatment. *PLoS One*, 15(12), e0243083.
- Turkstra, L. S., Mutlu, B., Ryan, C. W., Despins Stafslie, E. H., Richmond, E. K., Hosokawa, E. et Duff, M. C. (2020). Sex and gender differences in emotion recognition and theory of mind after TBI: a narrative review and directions for future research. *Frontiers in neurology*, 11, 59.
- Utama, N. P., Takemoto, A., Koike, Y. et Nakamura, K. (2009). Phased processing of facial emotion: an ERP study. *Neuroscience research*, 64(1), 30-40.
- Vagnozzi, R., Signoretti, S., Cristofori, L., Alessandrini, F., Floris, R., Isgro, E., Ria, A., Marziali, S., Zoccatelli, G., Tavazzi, B., Del Bolgia, F., Sorge, R., Broglio, S. P., McIntosh, T. K. et Lazzarino, G. (2010, Nov). 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. <https://doi.org/10.1093/brain/awq200>
- Vagnozzi, R., Signoretti, S., Tavazzi, B., Floris, R., Ludovici, A., Marziali, S., Tarascio, G., Amorini, A. M., Di Pietro, V. et Delfini, R. (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.
- Vargas, G., Rabinowitz, A., Meyer, J. et Arnett, P. A. (2015). Predictors and prevalence of postconcussion depression symptoms in collegiate athletes. *Journal of Athletic Training*, 50(3), 250-255.

- Vasavada, A. N., Danaraj, J. et Siegmund, G. P. (2008). Head and neck anthropometry, vertebral geometry and neck strength in height-matched men and women. *Journal of biomechanics*, 41(1), 114-121.
- Vassallo, S., Cooper, S. L. et Douglas, J. M. (2009). Visual scanning in the recognition of facial affect: Is there an observer sex difference? *Journal of Vision*, 9(3), 11-11.
- Verma, J. P. (2015). *Repeated Measures Design for Empirical Researchers*. John Wiley & Sons.
- Vogel, E. K. et Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, 37(2), 190-203.
- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J. et Dolan, R. J. (2001). Effects of attention and emotion on face processing in the human brain: an event-related fMRI study. *Neuron*, 30(3), 829-841.
- Vuilleumier, P. et Pourtois, G. (2007). Distributed and interactive brain mechanisms during emotion face perception: evidence from functional neuroimaging. *Neuropsychologia*, 45(1), 174-194.
- Wallace, J., Covassin, T. et Beidler, E. (2017). Sex differences in high school athletes' knowledge of sport-related concussion symptoms and reporting behaviors. *Journal of Athletic Training*, 52(7), 682-688.
- Wang, S., Yu, R., Tyszka, J. M., Zhen, S., Kovach, C., Sun, S., Huang, Y., Hurlemann, R., Ross, I. B. et Chung, J. M. (2017). The human amygdala parametrically encodes the intensity of specific facial emotions and their categorical ambiguity. *Nature communications*, 8(1), 1-13.
- Watanabe, S., Kakigi, R. et Puce, A. (2003). The spatiotemporal dynamics of the face inversion effect: a magneto-and electro-encephalographic study. *Neuroscience*, 116(3), 879-895.
- Webster, K. M., Wright, D. K., Sun, M., Semple, B. D., Ozturk, E., Stein, D. G., O'Brien, T. J. et Shultz, S. R. (2015). Progesterone treatment reduces neuroinflammation, oxidative stress and brain damage and improves long-term outcomes in a rat model of repeated mild traumatic brain injury. *Journal of neuroinflammation*, 12(1), 1-13.
- Weinberg, A. et Hajcak, G. (2010). Beyond good and evil: the time-course of neural activity elicited by specific picture content. *Emotion*, 10(6), 767.
- Weisenbach, S. L., Rapport, L. J., Briceno, E. M., Haase, B. D., Vederman, A. C., Bieliauskas, L. A., Welsh, R. C., Starkman, M. N., McInnis, M. G. et Zubieta, J.-K. (2014). Reduced emotion processing

- efficiency in healthy males relative to females. *Social cognitive and affective neuroscience*, 9(3), 316-325.
- Whalen, P. J. (1998). Fear, vigilance, and ambiguity: Initial neuroimaging studies of the human amygdala. *Current directions in psychological science*, 7(6), 177-188.
- Whalen, P. J., Kagan, J., Cook, R. G., Davis, F. C., Kim, H., Polis, S., McLaren, D. G., Somerville, L. H., McLean, A. A. et Maxwell, J. S. (2004). Human amygdala responsivity to masked fearful eye whites. *Science*, 306(5704), 2061-2061.
- Whalen, P. J., Shin, L. M., McInerney, S. C., Fischer, H., Wright, C. I. et Rauch, S. L. (2001). A functional MRI study of human amygdala responses to facial expressions of fear versus anger. *Emotion*, 1(1), 70.
- Wilcox, B. J., Beckwith, J. G., Greenwald, R. M., Raukar, N. P., Chu, J. J., McAllister, T. W., Flashman, L. A., Maerlender, A. C., Duhaime, A.-C. et Crisco, J. J. (2015). Biomechanics of head impacts associated with diagnosed concussion in female collegiate ice hockey players. *Journal of biomechanics*, 48(10), 2201-2204.
- Wild-Wall, N., Dimigen, O. et Sommer, W. (2008). Interaction of facial expressions and familiarity: ERP evidence. *Biological psychology*, 77(2), 138-149.
- Wilde, E. A., Hunter, J. V., Li, X., Amador, C., Hanten, G., Newsome, M. R., Wu, T. C., McCauley, S. R., Vogt, G. S. et Chu, Z. D. (2016). Chronic effects of boxing: diffusion tensor imaging and cognitive findings. *Journal of neurotrauma*, 33(7), 672-680.
- Willenbockel, V., Sadr, J., Fiset, D., Horne, G. O., Gosselin, F. et Tanaka, J. W. (2010). Controlling low-level image properties: the SHINE toolbox. *Behavior Research Methods*, 42(3), 671-684.
- Williams, C. et Wood, R. L. (2010, Feb). Impairment in the recognition of emotion across different media following traumatic brain injury. *J Clin Exp Neuropsychol*, 32(2), 113-122. <https://doi.org/10.1080/13803390902806543>
- Williams, L. M., Palmer, D., Liddell, B. J., Song, L. et Gordon, E. (2006). The 'when' and 'where' of perceiving signals of threat versus non-threat. *Neuroimage*, 31(1), 458-467.

- Wingenbach, T. S., Ashwin, C. et Brosnan, M. (2018). Sex differences in facial emotion recognition across varying expression intensity levels from videos. *PLoS One*, *13*(1), e0190634.
- Wrase, J., Klein, S., Gruesser, S. M., Hermann, D., Flor, H., Mann, K., Braus, D. F. et Heinz, A. (2003). Gender differences in the processing of standardized emotional visual stimuli in humans: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience letters*, *348*(1), 41-45.
- Wunderle, M. K., Hoeger, K. M., Wasserman, M. E. et 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.
- Yang, J., Peek-Asa, C., Covassin, T. et Torner, J. C. (2015, Jan). Post-concussion symptoms of depression and anxiety in division I collegiate athletes. *Dev Neuropsychol*, *40*(1), 18-23.  
<https://doi.org/10.1080/87565641.2014.973499>
- Yang, T., Menon, V., Eliez, S., Blasey, C., White, C. D., Reid, A. J., Gotlib, I. H. et Reiss, A. L. (2002). Amygdalar activation associated with positive and negative facial expressions. *Neuroreport*, *13*(14), 1737-1741.
- Young, A. W., Rowland, D., Calder, A. J., Etcoff, N. L., Seth, A. et Perrett, D. I. (1997). Facial expression megamix: Tests of dimensional and category accounts of emotion recognition. *Cognition*, *63*(3), 271-313.
- Zhang, D., Luo, W. et Luo, Y. (2013). Single-trial ERP analysis reveals facial expression category in a three-stage scheme. *Brain research*, *1512*, 78-88.
- Zhang, K., Johnson, B., Pennell, D., Ray, W., Sebastianelli, W. et Slobounov, S. (2010, Jul). Are functional deficits in concussed individuals consistent with white matter structural alterations: combined FMRI & DTI study. *Exp Brain Res*, *204*(1), 57-70. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2294-3>
- Zhang, L., Heier, L., Zimmerman, R., Jordan, B. et Uluğ, A. (2006). Diffusion anisotropy changes in the brains of professional boxers. *American Journal of Neuroradiology*, *27*(9), 2000-2004.



- Zuckerman, S. L., Apple, R. P., Odom, M. J., Lee, Y. M., Solomon, G. S. et Sills, A. K. (2014). Effect of sex on symptoms and return to baseline in sport-related concussion. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 13(1), 72-81.
- Zuckerman, S. L., Lee, Y. M., Odom, M. J., Solomon, G. S., Forbes, J. A. et Sills, A. K. (2012). Recovery from sports-related concussion: days to return to neurocognitive baseline in adolescents versus young adults. *Surgical neurology international*, 3.
- Zuj, D. V., Felmingham, K. L., Palmer, M. A., Lawrence-Wood, E., Van Hooff, M., Lawrence, A. J., Bryant, R. A. et McFarlane, A. C. (2017). Neural activity and emotional processing following military deployment: effects of mild traumatic brain injury and posttraumatic stress disorder. *Brain and Cognition*, 118, 19-26.
- Zupan, B., Babbage, D., Neumann, D. et Willer, B. (2014). Recognition of facial and vocal affect following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 28(8), 1087-1095.
- Zupan, B., Babbage, D., Neumann, D. et Willer, B. (2017). Sex differences in emotion recognition and emotional inferencing following severe traumatic brain injury. *Brain Impairment*, 18(1), 36-48.