

Université de Montréal

**Traitement des émotions évoquées par les expressions
faciales, vocales et musicales à la suite d'un traumatisme
craniocérébral**

par
Joanie Drapeau

Département de psychologie
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph. D.)
en psychologie – recherche & intervention
option neuropsychologie clinique

Novembre, 2015

© Joanie Drapeau, 2015

Résumé

Le traitement des émotions joue un rôle essentiel dans les relations interpersonnelles. Des déficits dans la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales ont été démontrés à la suite d'un traumatisme craniocérébral (TCC). Toutefois, la majorité des études n'ont pas différencié les participants selon le niveau de gravité du TCC et n'ont pas évalué certains préalables essentiels au traitement émotionnel, tels que la capacité à percevoir les caractéristiques faciales et vocales, et par le fait même, la capacité à y porter attention. Aucune étude ne s'est intéressée au traitement des émotions évoquées par les expressions musicales, alors que la musique est utilisée comme méthode d'intervention afin de répondre à des besoins de prise en charge comportementale, cognitive ou affective chez des personnes présentant des atteintes neurologiques. Ainsi, on ignore si les effets positifs de l'intervention musicale sont basés sur la préservation de la reconnaissance de certaines catégories d'émotions évoquées par les expressions musicales à la suite d'un TCC.

La première étude de cette thèse a évalué la reconnaissance des émotions de base (joie, tristesse, peur) évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales chez quarante et un adultes (10 TCC modéré-sévère, 9 TCC léger complexe, 11 TCC léger simple et 11 témoins), à partir de tâches expérimentales et de tâches perceptuelles contrôles. Les résultats suggèrent un déficit de la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales à la suite d'un TCC modéré-sévère et d'un TCC léger complexe, comparativement aux personnes avec un TCC léger simple et sans TCC. Le déficit n'est pas expliqué par un trouble perceptuel sous-jacent. Les résultats montrent de plus une préservation de la reconnaissance des émotions

évoquées par les expressions vocales et musicales à la suite d'un TCC, indépendamment du niveau de gravité. Enfin, malgré une dissociation observée entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les modalités visuelle et auditive, aucune corrélation n'a été trouvée entre les expressions vocales et musicales.

La deuxième étude a mesuré les ondes cérébrales précoces (N1, N170) et plus tardives (N2) de vingt-cinq adultes (10 TCC léger simple, 1 TCC léger complexe, 3 TCC modéré-sévère et 11 témoins), pendant la présentation d'expressions faciales évoquant la peur, la neutralité et la joie. Les résultats suggèrent des altérations dans le traitement attentionnel précoce à la suite d'un TCC, qui amenuisent le traitement ultérieur de la peur évoquée par les expressions faciales.

En somme, les conclusions de cette thèse affinent notre compréhension du traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales à la suite d'un TCC selon le niveau de gravité. Les résultats permettent également de mieux saisir les origines des déficits du traitement des émotions évoquées par les expressions faciales à la suite d'un TCC, lesquels semblent secondaires à des altérations attentionnelles précoces. Cette thèse pourrait contribuer au développement éventuel d'interventions axées sur les émotions à la suite d'un TCC.

Mots-clés : Traumatisme craniocérébral, Émotions, Expressions faciales, Expressions vocales non linguistiques, Expressions musicales, Électroencéphalographie (EEG), Potentiel évoqué lié aux événements (PÉ).

Abstract

Emotional processing plays a crucial role in social interactions. Deficits in recognizing emotions from facial and vocal expressions have been established following a traumatic brain injury (TBI). However, most studies did not look at the effect of TBI severity and did not evaluate essential prerequisites to efficiently recognize emotions, such as the ability to perceive facial and vocal features, and thereby, the ability to pay attention to them. No study has looked at emotional recognition from musical expressions following TBI, whereas musical intervention can be used to address behavioral, cognitive and affective issues in neurological populations. Thus, it is unknown whether therapeutic effects could be based on the preservation of emotional recognition from musical expressions following TBI.

The first study assessed recognition of basic emotions (happiness, sadness, fear) from dynamic facial, vocal and musical expressions in forty-one adults (10 moderate-severe TBI 9 complicated mild TBI, 11 uncomplicated mild TBI and 11 healthy controls), who were administered experimental and perceptual control tasks. Findings indicate impairment in fearful facial expressions recognition following moderate-severe TBI and complicated mild TBI, as compared to adults having sustained an uncomplicated mild TBI and healthy controls. Impairment is not explained by a perceptual disorder. Results also show that emotional recognition from vocal and musical expressions is preserved following TBI, irrespective of severity. Despite a dissociation observed between performance of emotional recognition tasks from visual and auditory modalities, no relationship was found between vocal and musical expressions.

The second study measured early (N1, N170) and later (N2) neural information processing underlying emotional recognition from facial expressions in twenty-five adults (10 uncomplicated mild TBI, 1 complicated mild TBI, 3 moderate-severe TBI and 11 healthy controls) during presentation of fearful, neutral and happy facial expressions. Findings indicate reduced early attentional processing following TBI, which impede higher-level cognitive stage enabling discrimination of fearful facial expressions.

In sum, this thesis contributes to further improve our comprehension of emotional recognition from facial, vocal and musical expressions following TBI, according to injury severity. It also contributes to understand mechanisms underlying affected emotional recognition from facial expressions, which seem to arise as a consequence of reduced early attentional processing following TBI. This thesis could help to eventually refine interventions for emotional processing following a TBI.

Keywords : Traumatic brain injury, Emotions, Facial expressions, Non-linguistic vocal expressions, Musical expressions, Electroencephalography (EEG), Event-related potentials (ERP).

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des sigles et abréviations.....	xi
Remerciements.....	xii
Chapitre 1. Introduction	1
1.1 Introduction générale.....	2
1.2 Le traumatisme craniocérébral.....	4
1.2.1 Définition et classification.....	4
1.2.1.1 Niveaux de gravité.....	4
1.2.1.2 Mécanisme de production des lésions.....	6
1.2.1.3 Localisation des lésions cérébrales.....	7
1.3 Corrélats cérébraux sous-jacents au traitement des émotions.....	8
1.4 Traitement des émotions à la suite d'un TCC.....	10
1.4.1 Émotions évoquées par les expressions faciales et vocales.....	10
1.4.2 Émotions évoquées par les expressions musicales.....	13
1.5 L'apport de l'électroencéphalographie.....	15
1.5.1 Ondes cérébrales associées aux expressions faciales émotionnelles.....	16
1.5.1.1 Ondes précoces.....	17
1.5.1.2 Ondes tardives.....	18
1.5.2 Réponses EEG associées aux expressions faciales émotionnelles à la suite d'un TCC.....	18
1.6 Objectifs et hypothèses.....	19
1.6.1 Étude 1.....	19
1.6.2 Étude 2.....	20

Chapitre 2. Méthodologie et résultats	22
2.1 Article 1: Emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions following traumatic brain injury	23
2.2 Article 2: Electrophysiological responses to emotional facial expressions following traumatic brain injury.....	61
Chapitre 3. Discussion	93
3.1 Rappel des objectifs	94
3.2 Sommaire des résultats	94
3.2.1 Étude 1	94
3.2.2 Étude 2	95
3.3 Interprétation des résultats en lien avec la littérature.....	96
3.3.1 Traitement des émotions à la suite d'un TCC : origine des déficits.....	96
3.3.2 La peur : un déficit isolé?.....	100
3.4 Retombées cliniques et directions futures.....	103
3.4.1 Importance de distinguer le niveau de gravité du TCC	103
3.4.2 L'EEG, comme technique d'évaluation du traitement des émotions.....	104
3.4.3 Impacts fonctionnels et interventions éventuelles	105
3.5 Conclusion	107
Bibliographie.....	109
Annexes.....	122
Annexe I: Échelle de coma de Glasgow.....	i

Liste des tableaux

Section Introduction

Tableau 1. Catégories de gravité du traumatisme craniocérébral.....	5
---	---

Section Méthodologie et résultats

Article 1:

Tableau 1. Demographic and clinical characteristics of the study participants. Means (and standard deviations) for age, years of education, musical training, intellectual functioning index (verbal IQ and performance IQ of WAIS-III), Glasgow Coma Scale (GCS) scores, time post-TBI, post-concussion symptoms scores and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) scores.....	53
--	----

Tableau 2. Mean percentages (and standard errors) of correct responses, obtained by TBI groups and healthy controls, for controls tasks (emotional discrimination and structural discrimination) according to dynamic facial, vocal and musical expressions.....	54
--	----

Article 2:

Tableau 1. Demographic and clinical characteristics of the participants. Means (and standard deviations) for age, years of education, intellectual functioning index (verbal IQ and performance IQ of WAIS-III), Glasgow Coma Scale (GCS) scores, time post-TBI, post-concussion symptoms scores and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) scores.....	86
--	----

Section Annexes

Annexe I:

Tableau 1. Échelle de coma de Glasgow.....i

Liste des figures

Section Méthodologie et résultats

Article 1:

Figure 1. Visual analogue scales used for rating emotional valence (-50: very negative to 50: very positive) and arousal/intensity (0: not at all intense to 100: very intense).....56

Figure 2. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task involving dynamic facial expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear); *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$57

Figure 3. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task using vocal expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear).....58

Figure 4. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task involving musical expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear).....59

Figure 5. Mean ratings and standard errors of valence (left side) and arousal/intensity (right side) according to the three emotional expressions (happiness, sadness, fear) and group

(healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI, moderate-severe TBI).....60

Article 2:

Figure 1. Examples of visual stimuli; 1) fearful facial expressions, 2) neutral facial expressions, 3) happy facial expressions, 4) butterflies.....88

Figure 2. Example of the task.....89

Figure 3. N1 responses at FCz electrode site, a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).....90

Figure 4. N170 responses at P9 electrode site (left hemisphere) and P10 electrode site (right hemisphere) a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).....91

Figure 5. N2 responses at Fz electrodes site, a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).....92

Liste des sigles et abréviations

ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
APT	Amnésie post-traumatique
AVC	Accident vasculaire cérébral
BDI-II	<i>Beck Depression Inventory-2nd edition</i>
GSC	<i>Glasgow coma scale</i>
ÉCG	Échelle de coma de Glasgow
EEG	Électroencéphalographie
ERP	<i>Event-related potential</i>
HEOG	<i>Horizontal eye movements</i>
ICA	<i>Independent Component Analysis</i>
IQ	<i>Intellectual quotient</i>
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
LOC	<i>Loss of consciousness</i>
Ms	Millisecondes
PÉ	Potentiel évoqué lié aux événements
PTA	<i>Post-traumatic amnesia</i>
VEOG	<i>Vertical eye movements</i>
TBI	<i>Traumatic brain injury</i>
TCC	Traumatisme craniocérébral
WAIS-III	<i>Wechsler Adult Intelligence Scale– 3rd Edition</i>

Remerciements

Au terme de cette aventure doctorale, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce grand projet.

Tout d'abord, merci à Michelle, ma directrice, pour sa confiance tout au long du parcours et pour sa grande expertise de chercheuse-clinicienne en traumatologie. Merci également à mes codirectrices, Isabelle et Nathalie, pour leur accueil dans le magnifique univers qu'est le BRAMS et le partage de leurs connaissances. À vous trois, un immense merci pour votre calme, votre enthousiasme et votre soutien, tant sur le plan scientifique que moral.

Je souligne l'aide incalculable de plusieurs mentors informatiques-électrophysiologiques-statistiques, sans qui cette thèse n'aurait pas été possible : Thomas Romeas, Bernard Bouchard, Nathalie Bouloute, Nicolas Robitaille, Nathaniel Lecaude, Olivier Piché, Natacha Paquette, Miguel Chagnon. Merci de votre perspicacité et de votre patience. Merci aussi aux coordinateur(rice)s cliniques, aux archivistes et aux clinicien(ne)s du CRLB et du CRCL, pour leur implication dans le recrutement.

Mes remerciements s'adressent ensuite à ma famille, pour leur appui inconditionnel. Merci aux ami(e)s du Kamouraska qui m'accompagnent depuis toujours et qui m'ont permis de conserver un équilibre : Julie Ga, Céd, Jean-Mich, Julie B., Jérôme, Eve. Aux amies du baccalauréat à Sherbrooke, qu'aurai-je fait sans votre présence bienveillante, vos bons mots et nos activités plein air qui oxygènent le cerveau : Cath La, Cath Le, Gen, Méliiss, Anne-Ma,

Jeanne. Aux ami(e)s que Montréal et le doctorat m'ont fait connaître, notamment PL, Alex, Anne-So, Val, Sara, Laura, Mona et bien d'autres, merci pour tout. Mention spéciale à la #bestcohortever : Jenny, Nat, Véro, Isa, Gen, Bi, Jo, Caro et Sandrine.

Enfin, à mon amoureux, William, avec qui j'ai partagé ce parcours doctoral de A à Z, merci d'être là pour célébrer les réussites et surmonter les déceptions. Merci pour ta compréhension et ton amour.

Chapitre 1. Introduction

1.1 Introduction générale

Selon le Regroupement des associations de personnes traumatisées craniocérébrales du Québec (2015), plus de 13 000 personnes subissent un traumatisme craniocérébral (TCC) chaque année au Québec. De ce nombre, 3 000 personnes nécessitent une hospitalisation et 600 ont des séquelles importantes permanentes. Il s'agit également d'une des raisons principales de décès et d'incapacités chez les individus de moins de 35 ans.

Les causes du TCC sont variables chez les adultes : accidents de la route (45%), chutes (30%), accidents de travail (10%), sports et loisirs domestiques (10%) ou assauts (5%) (Regroupement des associations de personnes traumatisées craniocérébrales du Québec, 2015). De tels accidents peuvent engendrer plusieurs conséquences, permanentes et irréversibles dans certains cas, sur les plans physique (p. ex. fatigue, trouble du sommeil, maux de tête, étourdissements, nausées, douleurs corporelles), psychoaffectif (dépression, anxiété, irritabilité), comportemental (p. ex. impulsivité, manque d'initiative) et cognitif (p. ex. attention/concentration, mémoire de travail [manipulation d'informations], vitesse de traitement, fonctions exécutives [planification, abstraction, résolution de problèmes, jugement]) (Arlinghaus, Pastorek & Graham, 2011).

Les changements sur le plan cognitif sont souvent les plus saillants à la suite d'un TCC, quelle que soit la sévérité, ainsi que les plus fréquemment mentionnés par les patients et leurs proches (McCullagh & Feinstein, 2011). Les études portant sur les conséquences cognitives du TCC se sont particulièrement intéressées aux difficultés attentionnelles, exécutives, mnésiques et langagières (McCullagh & Feinstein, 2011). Le traitement des

émotions est pour sa part un élément de la cognition encore peu étudié chez les personnes ayant subi un TCC. Pourtant, il appert qu'une détérioration de la reconnaissance des émotions évoquées par certains médiums de communication non verbaux, tels que les expressions faciales et vocales, puisse perturber le fonctionnement social des personnes ayant subi un TCC, notamment effriter le réseau social et les relations intimes (Dimoska et al, 2010; Knox & Douglas, 2009; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie, 2008; Spikman et al, 2013). En effet, le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales joue un rôle essentiel dans les relations interpersonnelles, en permettant de comprendre les intentions d'autrui et de moduler le comportement en conséquence.

Les expressions musicales constituent également un médium de communication non verbal très puissant pour évoquer des émotions (Juslin & Sloboda, 2001, 2010; Peretz, Aubé & Armony 2013). L'écoute de la musique est par ailleurs jugée comme une méthode d'intervention efficace auprès de personnes ayant subi un TCC ou un accident vasculaire cérébral (AVC) afin de remédier aux difficultés comportementales, cognitives ou affectives (Baker & Tamplin, 2006; Särkämö et al., 2008, 2010, 2012, 2013, 2014). On ignore cependant si les effets positifs de l'intervention musicale sont basés sur la préservation de la reconnaissance de certaines catégories d'émotions évoquées par les expressions musicales à la suite d'un TCC.

La mise en perspective des données scientifiques actuelles ainsi que l'apport de nouvelles connaissances au regard du traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales à la suite d'un TCC pourraient éventuellement contribuer au développement d'interventions axées sur les émotions, et par le fait même, à optimiser la

participation sociale des personnes ayant subi un TCC. La prochaine section vise donc, dans un premier temps, à définir et à décrire le TCC selon le niveau de gravité, le mécanisme de production des lésions et la localisation des lésions cérébrales. Par la suite, les corrélats cérébraux sous-jacents au traitement des émotions seront abordés, de même que la littérature scientifique récente quant à la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales auprès de personnes ayant subi un TCC. Enfin, l'apport de l'électroencéphalographie comme technique d'évaluation du traitement émotionnel à la suite d'un TCC sera examiné.

1.2 Le traumatisme craniocérébral

1.2.1 Définition et classification

Le TCC se définit par un « traumatisme causant une destruction ou une dysfonction du système nerveux intracrânien » (Société de l'assurance automobile du Québec, 2003). Il est généralement classifié en fonction du niveau de gravité, du mécanisme de production des lésions et de la localisation des lésions cérébrales.

1.2.1.1 Niveaux de gravité

Le *Centre for Neurotrauma Task Force on Mild Traumatic Brain Injury*, un groupe de travail international parrainé par l'Organisation mondiale de la santé (Von Holst & Cassidy, 2004), divise le TCC en trois catégories diagnostiques de gravité : léger, modéré ou sévère. Les niveaux de gravité sont déterminés sur la base de cinq caractéristiques, soit 1- la durée de la perte ou de l'altération de la conscience, 2- le résultat obtenu à l'échelle de coma de

Glasgow (ÉCG) (Teasdale & Jennett, 1974, voir Annexe I) à l'urgence ou 30 minutes après l'accident, 3- les lésions objectivées (fracture ou lésion intracrânienne), 4- l'examen neurologique, et 5- l'amnésie post-traumatique (APT). Les caractéristiques de chacune des catégories de gravité du TCC sont détaillées dans le tableau 1.

Tableau 1

Catégories de gravité du traumatisme craniocérébral

CARACTÉRISTIQUES	TRAUMATISME CRANIOCÉRÉBRAL CATÉGORIES DE GRAVITÉ		
	LÉGER	MODÉRÉ	SÉVÈRE
Durée de la perte ou de l'altération de la conscience	De 0 à 30 minutes, maximum	Généralement entre 30 minutes et 6 heures, mais durée limite de 24 heures	Souvent > 24 heures à plusieurs jours, mais obligatoirement > 6 heures
Résultat obtenu à l'échelle de coma de Glasgow à l'urgence ou 30 minutes après le traumatisme	De 13 à 15	De 9 à 12	De 3 à 8
Lésions objectivées (fracture ou lésion intracrânienne)	Imagerie cérébrale : positive ou négative	Imagerie cérébrale : généralement positive	Imagerie cérébrale : positive
Examen neurologique	Examen neurologique positif possible (signes focaux possibles)	Examen neurologique positif (signes focaux)	Examen neurologique positif (signes focaux)
Amnésie post-traumatique (APT)	Variable, mais doit être ≤ 24 heures	Variable, mais généralement entre 1 et 14 jours	Plusieurs semaines

Source. Orientations ministérielles pour le traumatisme craniocérébral léger 2005-2010, MSSS, 2005. p. 34

Le *Centre for Neurotrauma Task Force on Mild Traumatic Brain Injury* distingue de plus trois profils associés au TCC léger : 1- le TCC léger trivial (ou à faible risque), c'est-à-dire que la personne présente un résultat de 15 à l'ÉCG, sans perte de conscience ni amnésie au moment de l'examen à l'urgence; 2- le TCC léger simple, c'est-à-dire que la personne présente un résultat à l'ÉCG variant de 13 à 15, sans lésion intracrânienne (imagerie cérébrale négative) ni fracture du crâne; et 3- le TCC léger complexe, c'est-à-dire que la personne présente un résultat à l'ÉCG oscillant entre 13 et 15, aggravé par des lésions intracrâniennes (imagerie cérébrale positive) non chirurgicales (ne nécessitant pas de neurochirurgie) ou une fracture du crâne non enfoncée (Orientations ministérielles pour le traumatisme craniocérébral léger, 2005).

1.2.1.2 Mécanisme de production des lésions

Les lésions engendrées par le TCC se produisent en raison d'un effet de contact (ou d'impact), d'un effet d'inertie (ou d'accélération/décélération) ou d'une combinaison des deux (Smith, 2011). L'effet de contact est observé lorsque la tête heurte ou est heurtée directement par un objet. Les lésions sont alors locales, directement à la surface d'impact, pouvant entraîner une fracture du crâne, des lacérations, des contusions ou des perturbations du système vasculaire, y compris un hématome épidural (saignement entre un os du crâne et la dure-mère), un hématome sous-dural (saignement entre la dure-mère et l'arachnoïde), une hémorragie sous-arachnoïdienne (saignement entre l'arachnoïde et la pie-mère), une hémorragie intraventriculaire (saignement entre les ventricules) ou un saignement intracérébral (à l'intérieur du parenchyme cérébral). L'effet d'inertie est observé lorsque la tête est mise en mouvement (accélération) et est arrêtée brusquement dans son mouvement

(décélération). Le cerveau se heurte et rebondit contre la paroi osseuse créant d'abord des lésions au site de l'impact (coup) et ensuite des lésions au site opposé de l'impact (contrecoup). Également, les lésions peuvent être produites par un phénomène de rotation entraînant une compression, un étirement et un cisaillement de la matière blanche dans certaines aires cérébrales, ayant pour résultat des lésions axonales diffuses (Smith, 2011).

Ces blessures primaires, c'est-à-dire celles causées au moment de l'accident, mettent ensuite en branle une série de processus physiologiques et métaboliques qui peuvent engendrer des réactions secondaires telles que : ischémie (diminution de l'apport sanguin artériel), œdème (gonflement), augmentation de la pression intracrânienne, hypoxie (baisse de l'oxygénation des tissus), diaschisis (perturbation de l'activité neuronale dans des régions connectées à celle qui est affectée), changements métaboliques et modifications des neurotransmetteurs qui endommagent les neurones (McCrea, Janecek, Powell & Hammeke, 2014).

1.2.1.3 Localisation des lésions cérébrales

De nombreuses études quantitatives d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont noté que les régions cérébrales les plus fréquemment et les plus sévèrement atteintes lors des forces biomécaniques d'un TCC sont le cortex orbitofrontal, les lobes temporaux antérieurs, le système ventriculaire ainsi que le corps calleux (Bigler, 2011 ; McCrea, Janecek, Powell & Hammeke, 2014). Certaines régions du système limbique, dont l'amygdale, le fornix et l'hippocampe, peuvent également être atteintes de manière importante lors d'un TCC (Bigler, 2011). De plus, les études récentes démontrent que même dans le cas d'un TCC léger, des changements structuraux et des altérations neurochimiques surviennent

dans ces mêmes aires cérébrales, ainsi qu'au niveau de la matière blanche (pour une méta-analyse, voir Eirud et al., 2014). Les régions cérébrales endommagées, notamment frontales, temporales et limbiques, sont par ailleurs impliquées dans le traitement des émotions (Adolphs, 2002; Lindquist, Wager, Kober, Bliss-Moreau & Barrett, 2012; Phillips, Drevets, Rauch & Lane, 2003).

1.3 Corrélats cérébraux sous-jacents au traitement des émotions

De manière générale, les diverses structures cérébrales mises en évidence par la neuroimagerie et les études lésionnelles lors du traitement des émotions sont les lobes frontaux (cortex préfrontal ventromédian et dorsolatéral, cortex orbitofrontal) ainsi que les lobes temporaux, incluant le système limbique (insula, gyrus fusiforme, gyrus cingulaire antérieur, gyrus temporal supérieur et médian, amygdale, hippocampe), et ce, tant pour les expressions faciales (pour une méta-analyse, voir Fusar-Poli et al., 2009), vocales (pour une méta-analyse, voir Frühholz & Grandjean, 2013; Johnstone, Van Reekum, Oakes & Davidson, 2006; Schirmer & Kotz, 2006) que musicales (pour une méta-analyse, voir Koelsch, 2014).

Le système cérébral s'avère également spécialisé pour la reconnaissance de certaines catégories d'émotions. En effet, la reconnaissance de la peur, du dégoût et de la surprise évoqués par les expressions faciales est altérée à la suite de lésions au lobe préfrontal ventromédian (Vandekerckhove et al., 2014). Plusieurs études ont également démontré que des lésions circonscrites au lobe temporal, incluant l'amygdale, entraînent des déficits dans la reconnaissance de la peur ou de la colère évoquée par les expressions faciales (Adolphs, Tranel, Damasio & Damasio, 1994, 1995; Gosselin, Peretz, Hasboun, Baulac & Samson,

2011), vocales (Dellacherie, Hasboun, Baulac, Belin & Samson, 2011; Sprengelmeyer et al., 1999; Scott et al., 1997) et musicales (Gosselin et al., 2005; Gosselin, Peretz, Hasboun, Baulac & Samson, 2011; Gosselin, Peretz, Johnsen & Adolphs, 2007).

Bien que la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales implique des aires cérébrales similaires, il n'est pas clair si les voies neuronales dédiées au traitement des émotions évoquées par ces trois médiums de communication sont partagées (Peretz, 2010; Peretz, Aubé & Armony, 2013). Certains auteurs émettent l'hypothèse d'une organisation cérébrale commune pour le traitement des émotions évoquées par les expressions dans la modalité auditive, en proposant que les expressions musicales s'immiscent dans les circuits neuronaux ayant évolué préalablement pour le traitement des émotions évoquées par les expressions vocales (c.-à-d. hypothèse de l'invasion neuronale; voir Peretz, Aubé & Armony, 2013). Une étude récente en IRMf portant sur le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales auprès de participants sans trouble neurologique a d'ailleurs montré que seuls les processus de reconnaissance de la peur évoquée par les expressions auditives (vocales et musicales) semblent recruter des régions similaires, telles que l'amygdale et l'insula ; aucune corrélation n'a été obtenue entre les modalités visuelle et auditive (Aubé, Angulo-Perkins, Peretz, Concha, Armony, 2015).

Sur la base de ces données, il est alors possible que les personnes ayant subi un TCC présentent une dissociation entre les modalités visuelle et auditive dans le traitement des émotions, c'est-à-dire un déficit de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales, sans difficulté à reconnaître les émotions évoquées par les expressions vocales et musicales, ou vice versa.

1.4 Traitement des émotions à la suite d'un TCC

1.4.1 Émotions évoquées par les expressions faciales et vocales

La majorité des études ayant exploré de manière systématique le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales à la suite d'un TCC ont conclu à des déficits, et ce, particulièrement dans le cas d'émotions négatives (c.-à-d. peur, colère, tristesse, dégoût) comparativement aux émotions positives (c.-à-d. joie, et dans une certaine mesure, surprise) (pour une méta-analyse, Babbage et al., 2011; Callahan, Ueda, Sakata, Plamondon & Murai, 2011; Spikman et al., 2013; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014). De plus, les études ayant examiné le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales auprès d'un même groupe de participants ayant subi un TCC ont suggéré une certaine dissociation entre les modalités visuelle et auditive; la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales est significativement plus altérée que la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales (Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014). En outre, la neuroimagerie a récemment permis de démontrer que les déficits dans la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales à la suite d'un TCC sont liés à des atteintes spécifiques de la matière blanche, tels que le faisceau longitudinal inférieur et le faisceau fronto-occipital inférieur (Neumann, McDonald, West, Keiski & Wang, 2015) ainsi qu'à une réduction de l'activation neuronale dans le gyrus fusiforme droit (Genova et al., 2015).

Les évidences scientifiques quant à un déficit de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales à la suite d'un TCC s'accroissent depuis les

dernières années, mais demeurent marquées de quelques limites méthodologiques. Entre autres, la majorité des études antérieures n'ont pas différencié les participants selon le niveau de gravité du TCC (Dimoska, McDonald, Pell, Tate & James, 2010; Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie, 2008; Spell & Frank, 2000), alors qu'il est pourtant proposé que l'importance des changements cognitifs varie en fonction de cette variable (Arlinghaus, Pastorek, & Graham, 2011; Lezak, 2012). En effet, de manière générale, les personnes ayant subi un TCC sévère présentent des déficits cognitifs plus importants comparativement aux personnes ayant subi un TCC léger complexe, particulièrement sur le plan des fonctions attentionnelles et exécutives, telles que la mémoire de travail et la vitesse de traitement (Carlozzi, Kirsch, Kisala & Tulsy, 2015). Il a également été suggéré que les personnes ayant subi un TCC léger complexe présentent plus de difficultés aux tests attentionnels et mnésiques comparativement aux personnes ayant subi un TCC léger simple (Borgaro, Prigatano, Kwasnica & Rexer, 2003; Iverson, 2006; Lange, Iverson & Franzen, 2009). Les études ayant distingué clairement les niveaux de gravité du TCC dans l'étude du traitement des émotions ont inclus seulement des personnes ayant subi un TCC modéré à sévère (Knox & Douglas, 2009; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie, 2008; Rosenberg et al., 2015; Rosenberg, McDonald, Dethier, Kessels & Westbrook, 2014; Spikman et al., 2013; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014), ce qui restreint toute conclusion concernant la performance des personnes ayant subi un TCC léger (simple ou complexe).

Une autre limite méthodologique inhérente aux études antérieures concerne la nature des stimuli utilisés. En effet, la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales a majoritairement été évaluée à partir de stimuli visuels statiques, c'est-à-dire des photographies (Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; Milders, Ietswaart,

Crawford & Currie, 2008; Rosenberg et al., 2015; Rosenberg, McDonald, Dethier, Kessels & Westbrook, 2014; Spikman et al., 2013; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014), ce qui est peu représentatif de la réalité (c.-à-d. faible validité écologique). Certains chercheurs ont par ailleurs proposé que l'utilisation d'expressions faciales dynamiques, c'est-à-dire des vidéos, soit associée à une meilleure performance lors de la reconnaissance des émotions chez des personnes sans trouble neurologique (Ambadar, Schooler & Cohn, 2005; Rymarczyk, Biele, Grabowska & Majczynski, 2011; Trautmann, Fehr & Herrmann, 2009). Seules deux études ont investigué la reconnaissance des émotions à partir d'expressions faciales dynamiques auprès de personnes ayant subi un TCC modéré-sévère ; McDonald et Saunders (2005) ont conclu à une préservation de la reconnaissance émotionnelle alors que Knox et Douglas (2009) ont montré des déficits. La divergence de résultats entre ces deux études peut s'expliquer par le fait que les stimuli dynamiques représentaient des personnes en interaction et incluaient des gestes et des postures, ce qui a pu interférer avec la capacité à décoder exclusivement l'émotion évoquée par l'expression faciale.

L'ensemble des études ayant investigué la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales à la suite d'un TCC ont aussi utilisé des stimuli peu familiers, c'est-à-dire des intonations vocales émotionnelles, communément appelées prosodie affective, avec un contenu verbal sémantiquement neutre (p. ex. *I'll be back later*) ou dénué de sens (p. ex. *Someone migged the pazing*) (Dimoska, McDonald, Pell, Tate & James, 2010; Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; McDonald & Saunders, 2005; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie; 2008; Spell & Frank, 2000; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014). Cette procédure requiert des ressources attentionnelles suffisantes pour inhiber la tendance naturelle à traiter le contenu sémantique de la phrase en concordance avec l'intonation

émotionnelle de la voix, et donc, est possiblement ardue à la suite d'un TCC. Afin de minimiser l'interaction des fonctions linguistiques (contenu verbal) et émotionnelles (intonation) des expressions vocales, l'utilisation d'expressions vocales non linguistiques, telles que des rires, des cris et des pleurs, peut être plus adéquate auprès de personnes à risque de présenter des difficultés attentionnelles. De plus, les expressions vocales non linguistiques sont considérées comme l'équivalent auditif des expressions faciales (Belin, Fecteau & Bédard, 2004). À ce jour, aucune étude n'a examiné le traitement des émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques à la suite d'un TCC.

Enfin, la plupart des études n'ont pas vérifié la préservation de préalables essentiels à la reconnaissance des émotions à la suite d'un TCC, tels que la capacité à percevoir les caractéristiques faciales (p. ex. froncement de sourcils) et vocales (p. ex. intonation) (Knox & Douglas, 2009; McDonald & Saunders, 2005; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie, 2008; Spell & Frank, 2000). D'ailleurs, certaines études sont équivoques à savoir si les difficultés de reconnaissance des émotions à la suite d'un TCC résultent principalement des lésions cérébrales qui sous-tendent le traitement émotionnel (Rosenberg, Dethier, Kessels, Westbrook & McDonald, 2015) ou sont plutôt secondaires à des faiblesses perceptuelles ou attentionnelles (Yim, 2013; Mancuso et al, 2015). Il s'avère donc crucial d'évaluer, en parallèle à la reconnaissance des émotions, la capacité à percevoir les caractéristiques faciales et vocales (et par le fait même, la capacité à y porter attention), afin d'exclure la possibilité de troubles sous-jacents.

1.4.2 Émotions évoquées par les expressions musicales

Aucune étude ne s'est intéressée à la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions musicales à la suite d'un TCC. Pourtant, la musique est utilisée comme méthode d'intervention auprès de personnes ayant subi un TCC ou un AVC afin de répondre à des besoins de prise en charge comportementale, cognitive ou affective (Baker & Tamplin, 2006; Särkämö et al., 2008, 2010, 2012, 2013, 2014). Plus spécifiquement, Särkämö et ses collaborateurs (2008, 2010, 2012, 2013, 2014) ont montré que l'écoute quotidienne de musique, comparativement à l'écoute quotidienne d'histoires courtes, peut améliorer une variété de fonctions cognitives (attention sélective, mémoire auditive et verbale), prévenir l'humeur négative (dépression, confusion) ainsi qu'induire des changements à long terme dans le cerveau (neuroplasticité) après un AVC. L'efficacité de l'intervention musicale reposerait, selon ces auteurs, sur le fait qu'elle stimule le système dopaminergique-mésolimbique (Blood & Zatorre, 2001; Blood, Zatorre, Bermudez & Evans, 1999; Menon & Levitin, 2005; Salimpoor, Benovoy, Larcher, Dagher & Zatorre, 2011), qui est connu pour son rôle dans le circuit de la récompense, la motivation, la mémoire, l'attention et les fonctions exécutives (Knab & Lightfoot, 2010; Nieoullon, 2002). Également, l'écoute de la musique atténue les niveaux de cortisol suite à un stress psychologique (Khalifa, Bella, Roy, Peretz & Lupien, 2003), alors que le stress peut avoir des effets néfastes sur la plasticité neuronale (Radley & Morrison, 2005). L'intervention musicale semble donc prometteuse auprès de personnes ayant des atteintes neurologiques. Les effets bénéfiques de la musique peuvent possiblement être liés à la préservation de la reconnaissance de certaines émotions, notamment positives, évoquées par les expressions musicales auprès de personnes cérébrolésées.

De la même manière que pour les expressions faciales et vocales, il est important d'explorer le traitement des émotions évoquées par les expressions musicales en considérant le niveau de gravité du TCC. Également, il est primordial d'évaluer la capacité à percevoir les caractéristiques musicales (p. ex. hauteur tonale, rythme/tempo), nécessaire au traitement des émotions.

1.5 L'apport de l'électroencéphalographie

Afin de dresser un portrait plus complet du traitement des émotions à la suite d'un TCC, l'électroencéphalographie (EEG) représente une technique de choix puisqu'elle dispose d'une excellente résolution temporelle et donne accès à la séquence chronologique du traitement neuronal qui sous-tend la reconnaissance des émotions (Luck, 2014). Ainsi, l'EEG permet d'évaluer l'activité cérébrale associée aux différentes étapes de traitement des émotions, c'est-à-dire les étapes précoces (fonctions attentionnelles et perceptuelles) et les étapes plus tardives (fonctions cognitives de haut niveau qui assurent une reconnaissance appropriée des émotions). Il s'agit par ailleurs d'une mesure sensible pour identifier des altérations neurofonctionnelles subtiles, et ce, même dans la phase post-aiguë du TCC léger simple (Broglia, Moore & Hillman, 2011; ElleMBERG, Henry, Macciocchi, Guskiewicz & Broglia, 2009; Gosselin et al., 2012; Lachapelle, Bolduc-Teasdale, Ptito & McKerral, 2008).

Plus spécifiquement, l'EEG est une technique qui permet d'enregistrer, à la surface de la tête, l'activité électrique du cerveau, à partir d'électrodes appliquées sur différents endroits du cuir chevelu. La principale mesure obtenue par l'EEG est le potentiel évoqué lié aux événements (PÉ) qui consiste à des réponses neuronales associées à des événements sensoriels

spécifiques (p. ex. une image, un son) et dont le moyennage permet d'isoler des ondes cérébrales. Ces ondes cérébrales correspondent à différentes étapes du traitement de l'information et sont désignées par leur polarité (positive [P] ou négative [N]) ainsi que par leur moment d'apparition après la présentation du stimulus (latence, en millisecondes [ms]) (Luck, 2014).

1.5.1 Ondes cérébrales associées aux expressions faciales émotionnelles¹

Chez les personnes sans trouble neurologique, certains PÉ ont été étudiés en relation avec le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, notamment la N1, la N170 et la N2 (pour une revue, voir Hajcak, Weinberg, MacNamara & Foti, 2012; Luck, 2014). Ces ondes cérébrales varient en fonction de la valence émotionnelle (négative, neutre, positive); par exemple, les expressions faciales émotionnelles suscitent une plus grande amplitude comparativement aux expressions faciales neutres. (Blau, Maurer, Tottenham & McCandliss, 2007; Foti, Hajcak & Dien, 2009; Leppänen, Moulson, Vogel-Farley & Nelson, 2007; Luo, Feng, He, Wang & Luo, 2010; Zhang, Luo & Luo, 2013). Particulièrement, les stimuli menaçants, incluant la peur, sont traités prioritairement (c.-à-d. amplitude augmentée), et ce, de manière automatique, en raison de leur pertinence sur les plans biologique et comportemental (Ledoux, 1996). Il a par ailleurs été proposé que l'exécution d'une tâche

¹ Cette thèse s'intéresse uniquement aux PÉ associés aux expressions faciales puisqu'il s'agit du médium de communication le plus étudié auprès des personnes qui ont subi un TCC et pour lequel ont été démontrés les déficits les plus importants.

cognitive explicite, par exemple une tâche de catégorisation ou une tâche *oddball* (c.-à-d. détecter un stimulus rare parmi des stimuli fréquents), puisse interférer avec le traitement préférentiel automatique des stimuli émotionnels (Schupp, Schmäzle & Flaisch, 2014). Ainsi, une tâche implicite ou passive peut être plus appropriée pour refléter l'effet de la valence émotionnelle.

1.5.1.1 Ondes précoces

N1. La N100 ou N1 est une onde négative qui peut être obtenue sur l'ensemble du cuir chevelu (frontal, central, pariétal, occipital), culminant plus tôt dans les régions frontales (entre 50 et 150 ms) que postérieures (entre 150 et 200 ms) (Luck, 2014). Elle est associée à des mécanismes relativement automatiques de l'attention sélective; une grande amplitude de la N1 signifie que la personne déploie efficacement ses ressources attentionnelles, qui sont ensuite nécessaires au processus de discrimination des stimuli (Vogel et Luck, 2000). Les études ayant exploré la N1 ont démontré que l'amplitude de l'activité cérébrale obtenue au site frontocentral, entre 50 et 150 ms, est plus grande lors de la présentation d'expressions faciales de peur comparativement aux expressions faciales émotionnelles (joie) et neutres (Eimer & Holmes, 2002; Luo, Feng, He, Wang & Luo, 2010; Zhang, Luo & Luo, 2013).

N170. La N170 est une onde négative qui culmine à environ 170 millisecondes (variant entre 150 et 200 ms) après le début de la stimulation. Elle est obtenue sur les régions postérieures latérales et est généralement plus large dans l'hémisphère droit (Bentin, Allison, Puce, Perez & McCarthy, 1996; Luck, 2014). La N170 est une composante sensible aux expressions faciales et représente essentiellement la perception intégrée des caractéristiques du visage (pour une méta-analyse, Hinojosa, Mercado & Carretié, 2015). Il a également été

démontré que la N170 varie en fonction de la valence émotionnelle; la colère, la peur et la joie, en ordre d'importance, suscitent une plus grande amplitude comparativement aux expressions neutres (Hinojosa, Mercado & Carretié, 2015). Selon des analyses de source, l'activité de la N170 est localisée au niveau du gyrus fusiforme (Luck, 2014).

1.5.1.2 Ondes tardives

N2. La composante N200 ou N2 est une onde négative qui atteint son amplitude maximale entre 200 et 350 ms suivant l'apparition d'un stimulus et qui est obtenue sur les régions antérieures (frontales). La N2 est surtout associée au contrôle exécutif (pour une revue, voir Folstein & Van Petten, 2008; Luck, 2014), mais représenterait, dans l'étude du traitement émotionnel, un processus cognitif de haut niveau permettant une distinction entre les catégories d'émotions (Luo, Feng, He, Wang & Luo, 2010; Zhang, Luo & Luo, 2013). La N2 reflète une plus grande amplitude pour les expressions faciales de peur comparativement aux expressions joyeuses et neutres, et une plus grande amplitude pour les expressions de joie comparativement aux expressions neutres (Luo, Feng, He, Wang & Luo, 2010; Zhang, Luo & Luo, 2013).

1.5.2 Réponses EEG associées aux expressions faciales émotionnelles à la suite d'un TCC

À ce jour, une seule étude a exploré les réponses EEG associées aux expressions faciales émotionnelles (colère) et neutres auprès de personnes ayant subi un TCC (Lew et al., 2005). Celle-ci a révélé, via une tâche *oddball*, une altération des réponses EEG tardives (composante P300) lors de la détection d'expressions faciales de colère (stimulus rare) parmi

des expressions faciales neutres (stimuli fréquents), pour les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC. Toutefois, ces résultats peuvent refléter des difficultés non spécifiques dans la détection de stimuli rares ou des déficits attentionnels généraux, un fait bien connu à la suite d'un TCC dans ce type de tâche *oddball* (pour une revue, Dockree & Robertson, 2011), plutôt que des déficits dans le traitement des émotions (colère) évoquées par les expressions faciales.

1.6 Objectifs et hypothèses

L'objectif général de la présente thèse, sous forme d'articles empiriques, est d'étoffer les connaissances actuelles sur le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales auprès de personnes adultes ayant subi un TCC, en comparaison avec des personnes adultes sans TCC.

1.6.1 Étude 1

Le premier article (en révision dans *Brain Injury*) vise d'abord à déterminer si la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales chez les personnes ayant subi un TCC de divers niveaux de gravité (léger simple, léger complexe, modéré-sévère) diffère de celle des personnes sans TCC. L'article vise également à identifier s'il existe une relation entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les trois médiums de communication (expressions faciales, vocales et musicales).

Sur la base des évidences disponibles dans la littérature, nous postulons que la reconnaissance des émotions négatives évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales est significativement diminuée chez les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC. Nous émettons également l'hypothèse que les déficits sont plus importants selon le niveau de gravité du TCC, c'est-à-dire modéré-sévère > léger complexe > léger simple. D'une manière exploratoire, nous proposons une corrélation entre les performances aux tâches de traitement des émotions évoquées par les médiums de communication auditifs (expressions vocales et musicales), en raison de l'hypothèse de l'invasion neuronale émise par Peretz, Aubé & Armony (2013).

Pour tester ces hypothèses, nous avons mené des tâches expérimentales dans lesquelles des expressions faciales dynamiques, vocales non linguistiques et musicales évoquent la joie, la tristesse et la peur (c.-à-d. les trois émotions de base communément exprimées par ces trois médiums de communication). Des tâches contrôles ont également été administrées pour éliminer la possibilité d'un trouble perceptuel sous-jacent à un éventuel déficit de reconnaissance des émotions.

1.6.2 Étude 2

Le deuxième article (soumis dans *Journal of Neurotrauma*) vise à mesurer la séquence chronologique du traitement neuronal (PÉ précoces et plus tardifs) en réponse aux émotions évoquées par les expressions faciales chez les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC. Des expressions faciales statiques ont été privilégiées pour cette étude afin d'explorer de manière plus systématique les PE associés avec la valence

émotionnelle d'un visage (plutôt que d'explorer les PÉ en association avec un visage neutre qui alterne en un visage émotionnel, comme dans le cas d'expressions faciales dynamiques).

Bien que peu d'études se soient intéressées aux PÉ en relation avec le traitement des émotions à la suite d'un TCC, nous postulons de manière exploratoire que les réponses EEG plus tardives (composante N2) sont atténuées chez les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC, suggérant un déficit dans le traitement neuronal de haut niveau qui permet une distinction entre les catégories d'émotions, plutôt qu'un déficit dans les étapes de traitement attentionnel ou perceptuel. Également, puisque le traitement des émotions négatives évoquées par les expressions faciales est majoritairement déficitaire à la suite d'un TCC dans les études comportementales antérieures, nous postulons que les réponses EEG spécifiques à l'expression émotionnelle négative ne suscitent pas de traitement préférentiel comparativement à l'expression émotionnelle positive et l'expression neutre, chez les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC.

Pour ce faire, nous avons mené une tâche expérimentale dans laquelle les ondes cérébrales précoces (N1, N170) et plus tardives (N2) sont mesurées pendant la présentation d'expressions faciales statiques évoquant la peur, la neutralité et la joie. Un stimulus non pertinent à l'étude (papillon) a également été présenté à une fréquence rare pour s'assurer que tous les participants demeurent concentrés sur la tâche.

Chapitre 2. Méthodologie et résultats

2.1 Article 1: Emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions following traumatic brain injury

Joanie Drapeau, Nathalie Gosselin, Isabelle Peretz et Michelle McKerral

En révision dans *Brain Injury*

Emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions following
traumatic brain injury

**Joanie Drapeau (1,2,3,4), Nathalie Gosselin (2,3,4), Isabelle Peretz (3,4)
& Michelle McKerral (1,2,4)**

(1) Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation (CRIR) – Centre de réadaptation
Lucie-Bruneau (CRLB)

(2) Centre de recherche en neuropsychologie et cognition (CERNEC)

(3) Centre for Research on Brain, Language and Music (CRBLM) and International
Laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS)

(4) Département de psychologie, Université de Montréal

Key words: Traumatic brain injury, mild, complicated mild, moderate, severe, emotions, faces,
non-linguistic vocalisations, music

Correspondence address: Michelle McKerral, Centre de recherche interdisciplinaire en
réadaptation-Centre de réadaptation Lucie-Bruneau, 2275 avenue Laurier Est, Montréal,
Québec, Canada H2N 2N8. Tel: 1-514-343-2336; Fax: 1-514-343-5787.

Abstract

Objectives: To assess emotion recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions in subgroups of adults with traumatic brain injuries (TBI) of different severities, and identify possible common underlying mechanisms across domains.

Methods: Forty-one adults participated in this study: 10 with moderate-severe TBI, 9 with complicated mild TBI, 11 with uncomplicated mild TBI and 11 healthy controls, who were administered experimental (emotional recognition, valence-arousal) and control tasks (emotional and structural discrimination) for each domain.

Results: Recognition of fearful faces was significantly impaired in moderate-severe and in complicated mild TBI subgroups, as compared to those with uncomplicated mild TBI and controls. Effect sizes were medium-large. Participants with lower GCS scores performed worse when recognising fearful dynamic facial expressions. Emotion recognition from auditory domains was preserved following TBI, irrespective of severity. All groups performed equally on control tasks, indicating no perceptual disorders. Despite the dissociation between facial and vocal/musical expressions, there was no correlation across auditory domains.

Conclusions: This novel study contributes to further improving our comprehension of emotional recognition following TBI. Future studies in larger samples should include measures of functional impacts of recognition deficits for fearful facial expressions. These could help refine interventions for emotional recognition following a brain injury.

1. INTRODUCTION

Traumatic brain injury (TBI) is an acquired injury to the brain from an external force that can result in physical, cognitive and/or behavioural alterations. Difficulties in psychosocial functioning also typically appear following TBI, including disruption of intimate relationships and reduced social network [1-2]. Some authors have suggested that these difficulties may be related, at least in part, to a poor ability to recognise emotions from non-verbal communication channels, such as facial and vocal expressions [3-6]. Indeed, as emotional recognition plays a crucial role in social interactions by helping individuals to understand intentions and to guide behaviour, impairments might thus contribute to psychosocial difficulties following a TBI.

Furthermore, important brain regions involved in emotional processing from facial and vocal expressions, such as the prefrontal cortex (i.e. ventromedial prefrontal cortex and the orbitofrontal cortex) and limbic structures (i.e. amygdala, temporal lobes, fusiform gyrus, regions of the parietal lobe) [7-9] are frequently damaged following a moderate-severe TBI [10]. Even in the case of mild TBI, structural changes and neurochemical alterations occur in these same brain areas, as well as in white matter integrity [11-14]. More precisely, recent work has shown that impairments in emotional processing from facial expressions following TBI can be linked to damage in specific white matter tracts, such as the inferior longitudinal fasciculus and inferior fronto-occipital fasciculus [15], as well as to lower neural activation in the right fusiform gyrus [16]. Moreover, particular lesion localisation can lead to greater impact on negative emotional recognition. Indeed, previous lesion studies showed impairments in fearful and/or disgusted facial expression recognition following anteromedial temporal lobe resection [17], ventromedial prefrontal hypoperfusion [18] or bilateral damage

to the amygdala [19], as well as fearful and/or angry non-linguistic vocal expression recognition deficits following unilateral temporal lobe resection [20] or bilateral lesions to the amygdala [21].

The emerging literature on emotional recognition following TBI demonstrates impairments from both facial and vocal expressions [3-6, 22-32], and especially in the case of negative emotions, such as fear, sadness, disgust and/or anger [4, 6, 22-23, 27-28, 31]. In general, these previous studies used facial and vocal stimuli expressing the six basic emotional categories (happiness, sadness, fear, anger, surprise, disgust). The majority of these studies did not, however, look at the effect of TBI severity; they included mixed samples of mild to severe injuries. Even the mild TBI classification is heterogeneous as it can be complicated by intracranial lesions not necessitating neurosurgical intervention [33-35]. Thus, mild TBI classification can be divided into two subtypes: uncomplicated mild TBI (negative CT-scan) and complicated mild TBI (positive CT-scan). Moreover, some findings indicate greater cognitive disturbances for individuals having sustained a complicated mild TBI as compared to an uncomplicated mild TBI [36-38]. Greater cognitive disturbances are also reported for individuals having sustained a severe TBI as compared to a complicated mild TBI [39]. These results indicate potentially different cognitive functioning in TBI depending on the injury severity. Consequently, when investigating cognitive functioning such as emotional recognition, it is important to distinguish uncomplicated mild, complicated mild and moderate-severe TBI groups.

Additionally, to evaluate emotional recognition from facial expressions in individuals with TBI, most previous studies used static visual stimuli, i.e. photographs [3, 6, 22-25, 27-29, 31-32], which may not reflect real-world abilities. It was also suggested that dynamic

properties facilitate processing of emotional facial expressions [40-42]. In addition, to evaluate emotional recognition from voices following TBI, previous studies used vocal stimuli with verbal content, i.e. affective prosody [5, 22, 26-27, 31]. Stimuli were expressed with an emotional voice tone, but verbal content was semantically neutral (e.g. 'I will be back later') or composed of logatomes (e.g. 'Someone mugged the pazing'), which could possibly be very difficult for individuals with TBI because of the dual demand of listening to verbal meaning and emotional voice tone. To minimise the interaction between the emotional and the linguistic functions of vocal expressions, non-linguistic vocalisations, such as screaming, crying or laughing could be more appropriate. It has also been proposed that non-linguistic vocalisations are the auditory equivalent of facial expressions [43]. To date, no study has looked at emotional recognition from non-linguistic vocalisations following TBI.

Music is another highly powerful non-verbal communication channel to express emotions [44-45], which has been shown to recruit same brain structures as facial and vocal expressions that are known to be crucially involved in emotional processing, such as the amygdala, nucleus accumbens, hypothalamus, hippocampus, insula, cingulate cortex, and orbitofrontal cortex [46]. No previous study has examined emotional recognition from music in individuals with TBI. Yet, musical intervention can be effectively used to address cognitive and emotional issues after brain injury; daily music listening has been shown to improve cognitive functions (selective attention, verbal memory), to reduce negative mood (depression, confusion), as well as to induce long-term neuroplasticity changes in the brain after stroke [47-49]. However, it is unknown whether therapeutic effects could be based on the preservation of emotional recognition from music after brain damage; the underpinnings of emotional recognition from musical expressions following TBI thus need to be investigated. Moreover,

as for facial and vocal emotional expressions, injury severity as well as localisation of brain lesions could have differential impacts on recognition of emotional expressions from music following a TBI. For example, previous lesion studies have shown impairments in fearful (and to some extent sad) music recognition following temporal lobe excision, including amygdala [17, 50-51].

While emotional recognition involves similar brain areas for facial, vocal and musical domains, it is not clear whether neural pathways are shared [45, 52]. Comparisons across these three domains following a TBI would be of interest to provide a better understanding of possible shared mechanisms. Few studies have examined recognition of both facial and vocal emotional expressions in the same group of TBI participants, with variable results [22, 26-27, 31]. A recent study with a large moderate-severe TBI sample (n = 203) [31] demonstrated that recognition of emotional facial expressions was significantly more impaired than that of vocal expressions, which supports overlapping emotion recognition processes in the context of distinct neural systems for visual and auditory modalities. Relationships between auditory channels, such as those underlying the recognition of vocal versus musical expressions, is however unknown following TBI. Although music and vocal expressions are substantially different in their respective nature, emotional recognition processes from these auditory domains appear to recruit, at least partially, similar neural regions, such as the amygdala [53].

The primary objective of the present study was to determine if emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions differed in adults having sustained a mild to severe TBI (uncomplicated mild versus complicated mild versus moderate-severe), as compared to healthy adults without a history of TBI. As a secondary objective we aimed to identify whether there was a relationship between performances across domains that could

suggest common underlying mechanisms. Based on the existing literature, we hypothesised that TBI participants would be significantly impaired in recognising negative emotions from dynamic facial, vocal and musical expressions, as compared to adults without a history of TBI. We also expected that impairments would be more important according to TBI severity, i.e. moderate-severe TBI > complicated mild TBI > uncomplicated mild TBI. As an exploratory hypothesis, we postulated that performances across auditory channels, i.e. emotional vocal and musical expressions, would be correlated. To test these assumptions, we conducted experiments in which dynamic faces, non-linguistic vocalisations and music expressed three basic emotions commonly recognised from these domains: happiness, sadness and fear. Controls tasks were administered to eliminate the possibility of a perceptual disorder underlying a potential deficit in emotional recognition.

2. METHODS

2.1 Participants

A total of 41 adults participated in the study: 11 participants with uncomplicated mild TBI, 9 participants with complicated mild TBI, 10 participants with moderate-severe TBI and 11 healthy controls. TBI participants were recruited from the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau and Centre de réadaptation Constance-Lethbridge in Montréal, Québec, Canada. Clinical and research coordinators solicited patient's permission to be contacted to participate in the research project. Clinical coordinators recruited participants with TBI during their rehabilitation (at least 2 months post-injury) and research coordinators recruited TBI participants having completed rehabilitation from patient databases (maximum 36 months post-injury). Healthy controls were recruited through advertisements in the community.

TBI severity was determined by at least one of the following parameters, as noted in medical records: Glasgow Coma Scale (GCS) score (mild TBI: GCS = 13-15, moderate-severe TBI: GCS < 12), post-traumatic amnesia (PTA) duration (mild TBI: PTA < 24 hours, moderate-severe: PTA > 24 hours) and loss of consciousness (LOC) duration (mild TBI: LOC < 30 minutes; moderate-severe TBI > 30 minutes) [54]. Uncomplicated mild TBI and complicated mild TBI were distinguished according to CT-scan results. Participants with complicated mild TBI presented intracranial lesions (positive CT-scan) which had not required neurosurgical intervention [33-35]. Of the 19 participants with complicated mild or moderate-severe TBI, four had predominantly frontal lobe damage, one had predominantly parietal lobe damage, one had predominantly temporal lobe damage, three had lesions in the frontal and temporal regions, two had lesions in the frontal and parietal regions, one had lesions in the temporal and parietal regions, and seven had diffuse lesions involving the frontal, temporal and parietal lobes.

Exclusion criteria for TBI groups were: (1) younger than 18 or older than 55; (2) a psychiatric or neurological history, including more than one TBI; (3) a penetrating brain injury, such as assault with blunt or sharp object; (4) hearing or visual impairment; (5) history of previous cognitive impairment, such as language deficit or attention deficit disorder. This information was documented in the medical records or during the first appointment. An additional exclusion criterion for healthy controls was a history of TBI. All participants had minimal or no musical training; they had not received musical training for more than five years and if so, they had not played their instrument for at least 15 years before testing.

Demographic and clinical characteristics of the participants are shown in table 1. TBI groups and healthy controls did not differ according to age, gender, years of education,

musical experience, and intellectual functioning indexes (verbal IQ [vocabulary] and performance IQ [matrix reasoning] of the Wechsler adult intelligence scale-III [WAIS-III] [55]) ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests). TBI groups differed significantly according to GCS scores ($\chi^2 = 20.722$, $p = 0.001$, Kruskal Wallis H tests), but did not differ according to time post-injury, post-concussion symptoms scores [56] and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) scores [57] ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests). Healthy controls and TBI groups differed significantly according to post-concussion symptoms scores ($\chi^2 = 15.439$, $p = 0.001$, Kruskal Wallis H tests) and BDI-II scores ($\chi^2 = 12.664$, $p = 0.005$, Kruskal Wallis H tests). All participants presented a BDI-II score below 20 (i.e. below the cut-off for the presence of a possible moderate-severe depression), except for 2 with uncomplicated mild TBI and 2 with complicated mild TBI. However, those four participants scored higher on ‘somatic’ and ‘cognitive’ items (e.g. fatigue, sleep disturbances, concentration difficulties) compared to ‘affective’ items (e.g. sadness), which could be more related to the TBI than depression. Indeed, BDI-II scores were highly correlated with post-concussion symptoms scores ($r = 0.696$; $p = 0.001$).

Insert table 1 about here

2.2 Materials and procedure

2.2.1 Stimuli

Facial expressions. 30 videos of facial expressions (500 milliseconds) were selected from a validated database named STOIC (http://www.mapageweb.umontreal.ca/gosselif/sroyetal_sub.pdf) [58]. Facial expressions were created by professional actors (5 men, 5 women) and were intended to express happiness, sadness or fear (10 stimuli per emotional category).

Vocal expressions. 30 non-linguistic vocalisations (385 to 2229 milliseconds) were selected from a validated database named The Montreal Affective Voices (<http://vnl.psy.gla.ac.uk>) [59]. Stimuli were created by professional actors (5 men, 5 women) and consisted of short interjections using the French vowel “ah” expressing happiness, sadness or fear, i.e. laughs, cries or screams (10 stimuli per emotional category).

Musical expressions. 30 novel musical excerpts (8 to 12 seconds), computer-generated (Musical Instrument Digital Interface files) in a piano timbre and written according to the rules of the Western tonal system, were selected from a validated database from Vieillard et al. (www.brams.umontreal.ca/plab/publications/article/96) [60]. Stimuli (musical excerpts) expressed happiness, sadness or fear emotions (10 stimuli per emotional category).

2.2.2 General procedure

Participants performed a total of 12 tasks (described below): two blocks of experimental tasks (1- emotional recognition, and 2- valence-arousal) and two blocks of control tasks (3- emotional discrimination, and 4- structural discrimination), in which each of the three domains (dynamic facial, vocal, and musical expressions) were presented. Order of the four blocks of experimental and controls tasks was counterbalanced across participants. Within each block, order of each domain (facial, vocal, and musical expressions) was also counterbalanced across participants. Each stimulus was presented in a pseudo-random order (no more than two consecutive presentations of the same emotion) in a self-paced manner. Tasks were displayed on a 17 inch screen computer and auditory excerpts were presented through Professional Beyer Dynamic DT770 headphones at a comfortable volume level. E-prime software was used for stimuli presentation and response recording.

2.2.3 Experimental tasks

Emotional recognition. In three separate tasks, 30 dynamic facial expressions, 30 non-linguistic vocalisations, and 30 musical excerpts were presented. For dynamic facial and vocal expressions, participants were asked to select the emotion that best corresponded to each stimulus among six choices of emotions (i.e. six basic emotional categories usually expressed by facial and vocal expressions, and which were included in initial validation studies: happiness, sadness, fear, anger, surprise and disgust). For musical excerpts, participants were asked to select the emotion that best corresponded to each stimulus among four choices of emotions (i.e. four emotional categories which were part of initial validation studies: happiness, sadness, fear and peacefulness). If necessary, participants were allowed to repeat each stimulus in order to prevent any possible effect of working memory impairment.

Valence and arousal. In three separate tasks, the same stimuli as in the emotional recognition tasks were presented. Participants were asked to rate the stimuli on both emotional valence (very negative to very positive) and emotional arousal/intensity (not at all intense to very intense) using a visual analogue scale (see figure 1).

Insert figure 1 about here

2.2.4 Control tasks

Emotional discrimination. Three separate tasks for each domain were administered, consisting of 36 pairs of dynamic facial expressions, 36 pairs of vocalisations and 36 pairs of musical excerpts. Music was segmented in short excerpts from 1 to 2 seconds with Adobe Audition software. Each pair consisted of two consecutive stimuli expressing the same or different emotions. For each domain, six possible emotional combinations were designed (6 pairs per emotional combination: happy-happy, sad-sad, fear-fear, happy-sad, happy-fear, sad-

fear). Participants were asked to determine if the two stimuli expressed same or different emotions. A practise trial consisting of six examples (one of each possible emotional combinations) was provided with feedback before moving on to the task, during which participants were not allowed to repeat the pairs of stimuli.

Structural discrimination. Three separate tasks for each domain were administered, consisting of 36 pairs of static facial expressions (pictures version of STOIC [58]), 36 pairs of vocalisations, and 36 pairs of short musical excerpts. Each pair included two consecutive stimuli, one upward and one downward. For static facial expressions, pictures were inverted 180 degrees with Photoshop. Vocalisations were cut in small units and reversed with Adobe Audition software. Musical excerpts were retrograded with Sibelius software. Half of the pairs expressed the same stimuli and the other half expressed two different stimuli. Participants were asked to determine if the pairs represented the same or different stimuli. A practise trial consisting of six examples was provided with feedback before moving on to the task, during which participants were not allowed to repeat the pairs of stimuli.

2.2.5 Data analysis

As primary analyses, non-parametric Kruskal Wallis H tests (χ^2) tests were performed to see if at least one of the groups was different from the other groups. When Kruskal Wallis H tests gave significant results, post-hoc Mann-Whitney U tests (U) were conducted, to examine which group was significantly different from the others. Effect size (r) of each significant Mann-Whitney U tests was also calculated (i.e., Z/\sqrt{N}).

As secondary analyses, Pearson correlations (r) and Chi-square (χ^2) were calculated to determine the relationships between tasks performance across domains (facial, vocal and musical expressions) and emotional expressions (happiness, sadness, fear), as well as to assess

the relationship between tasks performance and clinical/demographical variables (injury severity, lesions localisation, time post-TBI, age, gender, level of education, verbal IQ, performance IQ).

3. RESULTS

3.1 Emotional recognition

Dynamic facial expressions

Mean percentages of correct responses for emotional recognition from dynamic facial expressions are shown in figure 2, according to emotions (happiness, sadness, fear) and groups. Analysis revealed a significant effect of group for fearful facial recognition ($\chi^2 = 14.072$, $p = 0.003$). More specifically, recognition of fearful faces was significantly impaired in adults with moderate-severe TBI, as compared to adults with uncomplicated mild TBI ($U = 11.000$, $Z = -2.970$, $p = 0.003$, $r = 0.65$) and healthy controls ($U = 9.500$, $Z = -3.100$, $p = 0.002$, $r = 0.68$). Recognition of fearful faces was also significantly impaired in adults with complicated mild TBI, as compared to adults with uncomplicated mild TBI ($U = 23.000$; $Z = -2.049$, $p = 0.040$, $r = 0.46$) and healthy controls ($U = 23.500$; $Z = -2.020$, $p = 0.043$, $r = 0.45$). No significant differences were found between adults with uncomplicated mild TBI and healthy controls ($U = 60.000$; $Z = -0.034$, $p = 0.973$), or between adults with complicated mild TBI and moderate-severe TBI ($U = 29.500$; $Z = -0.993$, $p = 0.321$). Of note, there was no significant group effect in terms of error patterns between emotions ($p_s > 0.05$).

Insert figure 2 about here

Vocalisations

Mean percentages of correct responses for emotional recognition from vocalisations are shown in figure 3, according to emotions and groups. All groups performed equally for recognition of happiness, sadness and fear ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests).

Insert figure 3 about here

Music

Mean percentages of correct responses for emotional recognition from music are shown in figure 4, according to emotions and groups. All groups performed equally for the recognition of happiness, sadness and fear ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests).

Insert figure 4 about here

3.2 Valence and arousal/intensity tasks

Mean percentages of ratings for valence and arousal/intensity from dynamic facial expressions, vocalisations and music are shown in figure 5, according to emotional expressions and groups. There were no significant group differences in valence and arousal/intensity ratings for all emotional expressions (happiness, sadness, fear) from all domains (dynamic facial, vocal and musical expressions) ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests).

Insert figure 5 about here

3.3 Control tasks: emotional discrimination and structural discrimination

For the emotional discrimination and structural discrimination tasks from facial, vocal and musical expressions, no significant difference ($p_s > 0.05$, Kruskal Wallis H tests) was found between the three TBI groups, as compared to healthy controls (see table 2). Each participant performed well above chance (50%).

Insert table 2 about here

3.4 Comparisons across domains

Accuracy for the different tasks across domains (facial, vocal and musical expressions) and emotional expressions (happiness, sadness and fear) showed only one significant correlation ($p_s > 0.05$), that is for the recognition of happy facial and vocal expressions ($r = 0.452$, $p = 0.003$).

3.5 Demographic and clinical variables

Secondary analyses indicated that there were no significant correlation between emotional expressions (happiness, sadness, fear) from all domains (dynamic facial, vocal, musical expressions), and demographic variables such as age, gender, level of education and IQ indexes ($p_s > 0.05$). For participants with TBI, significant correlations were found between Glasgow Coma Scale (GCS) scores and recognition of fearful faces ($r = 0.402$; $p = 0.031$), showing that participants with lower GCS scores (or more severe injuries) performed worse when recognising fearful dynamic facial expressions. No significant correlations were found between emotional expressions from all domains and time post-injury or lesions localisation ($p_s > 0.05$).

4. DISCUSSION

The aims of this study were to assess emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions in adults having sustained an uncomplicated mild, complicated mild or moderate-severe TBI, as compared to healthy adults without a history of TBI, and to determine whether there was a correlation in performances across domains that could suggest common underlying mechanisms.

Results indicated that recognition of dynamic fearful facial expressions was significantly impaired in adults with moderate-severe TBI and in adults with complicated mild TBI, as compared to adults with uncomplicated mild TBI and healthy controls. Effect sizes were medium-large, indicating substantively significant and, thus, strong results. Furthermore, significant correlations confirmed that participants with more severe injuries as reflected in lower Glasgow Coma Scale scores performed worse on recognition of dynamic fearful facial expressions. These novel findings are not explained by a perceptual disorder, as shown by results on control tasks, and add to previous studies that showed, using static visual stimuli, impaired recognition of negative emotions from facial expressions, such as fear, following TBI [4, 6, 22-23, 27-31].

The presence of a recognition deficit for fearful facial expressions in complicated mild TBI and not in uncomplicated mild TBI, the latter showing comparable performance to healthy controls, highlights the importance of distinguishing these two subgroups of mild TBI when conducting clinical research, as they do represent different gradients of brain injury severity and cognitive outcomes [36-38]. Furthermore, it is possible that such behavioral tasks are not sensitive enough to discriminate between adults with uncomplicated mild TBI and those without TBI. Indeed, previous studies of cognitive functioning suggested that standard neuropsychological tests or behavioral methods most often fail to detect dysfunctions in the post-acute stages of uncomplicated mild TBI, whereas more precise measures, such as event-related potentials (ERPs), can identify subtle neurofunctional alterations [61-64]. Further studies using more sensitive techniques would be needed to tap further into emotional recognition and its neural substrates following uncomplicated mild TBI.

Valence-arousal ratings did not differ between groups, even if adults with moderate-severe TBI and adults with complicated mild TBI performed worse than participants with mild TBI and healthy controls on recognition of fearful facial expressions. These results were unexpected since some lesions studies showed that fearful facial expressions, which are poorly recognised, are rated as less intense [17]. However, it is consistent with other findings highlighting a tendency for TBI adults with frontal lesions to perceive sadness, disgust, surprise and fear in facial expressions as intense, even if these emotions are incorrectly labelled [28]. Sixteen out of our 19 participants with complicated mild or moderate-severe TBI did in fact present damage involving the frontal lobes, according to CT-scan reports available in medical files.

The deficit found for fearful expressions after a moderate-severe TBI or a complicated mild TBI appears to be limited to the visual domain. No such discrepancy was found in emotional recognition from non-linguistic vocal and musical expressions, as compared to healthy controls. The absence of a deficit in fear processing involving auditory domains does not seem to reflect a lack of sensitivity of our tasks, since impairments in recognition of fearful non-linguistic vocalisations (screams) as well as of fearful musical excerpts have been shown following brain lesions using quite similar stimulus paradigms [17, 20, 50-51].

The dissociation between visual and auditory channels following TBI is consistent with some previous studies revealing that the recognition of emotional facial expressions appears to be significantly more impaired than that of emotional vocal expressions [27, 31]. Nevertheless, recognition deficits of emotional vocal expressions, such as fear, following TBI have been previously evidenced [5, 22, 26-27, 31]. The nature of tasks used, that is those evaluating affective prosody in previous studies versus those of the present study using

emotional non-linguistic vocalisations (screams, laughs, cries), may account for this inconsistency. Indeed, affective prosody requires dual demand of listening to verbal meaning and emotional voice tone, whereas this interaction is minimised with emotional non-linguistic vocalisations. Moreover, even in healthy individuals, emotional non-linguistic vocalisations have been shown to hold a superior decoding effect over affective prosody [65]. Recent work also indicated that screaming occupies a privileged acoustic function (roughness or dissonance), and induces larger responses in the amygdala, as opposed to speech prosody [66]. Since lesions to the amygdala can occur following TBI [11], the preserved recognition of fearful vocalisations remains however to be explained. This could be achieved by conducting future studies in larger TBI subgroups of different severities, and lesion localisations.

Despite the dissociation observed between facial expressions, and vocal as well as musical expressions, we did not find correlations across auditory domains. This result may be attributed to methodological differences between the emotional recognition tasks using vocal and musical expressions; in the musical task, participants had to select the emotion that best corresponded to stimulus among four choices of emotions, rather than six choices of emotion, as in the vocal task. Consequently, more confusion could occur with voices than with music.

More studies of emotional recognition involving facial, vocal and musical expressions would be of interest to provide better understanding of possible overlapping neural pathways between domains, and eventually contribute to refining intervention models following TBI. For example, in the case of common underlying mechanisms, it would be interesting to investigate if a specific type of training (for example, musical training) could generalise to another domain (for example, voices or faces) via stimulation of shared brain structures involved in emotional recognition. In any case, preservation of emotional recognition from

music following TBI could encourage the use of musical intervention in this clinical population, which should also be the object of future well-controlled effectiveness studies. As music listening modulates activity in brain structures involved in emotional processing [46], improves cognitive functions, has a positive effect on mood as well as on long-term brain neuroplasticity [47-49], the use of musical intervention is in fact promising following TBI to address neurological dysfunctions and resulting functional impairments.

Finally, future studies in larger samples should include measures of the functional impact of recognition deficits of fearful facial expressions. For instance, difficulties in recognising fearful facial expression might lead to a poor perception of threatening situations and to more risk-taking behavior. These also could help to enrich intervention models for emotional recognition after a brain injury.

Conclusions

This original study is one of the first systematic explorations of emotional recognition from dynamic facial, non-linguistic vocal and musical expressions in the same group of participants with TBI, and which specifically looked at the effect of TBI severity (uncomplicated mild versus complicated mild versus moderate-severe). The present findings confirm a deficit in fear recognition from dynamic facial expressions following a moderate-severe TBI and a complicated mild TBI, as compared to adults with uncomplicated mild TBI and healthy individuals. Our results also show that emotional recognition from vocal and musical expressions appear to be preserved in participants with TBI, irrespective of severity. This study contributes to further improving our comprehension of emotional recognition following TBI, with eventual implications for intervention aimed at improving emotional recognition following brain injury.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by: the National Science and Engineering Research Council of Canada and the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau (grants to M.M.), a Canada Research Chair (to I.P.), the Fonds de recherche du Québec-Santé and the Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de Montréal (scholarships to J.D.). We are also grateful to the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau and to the Centre de réadaptation Constance-Lethbridge for their help with recruitment of TBI participants. We thank Olivier Piché, Bernard Bouchard and Nathanaël Lécaudé for technical assistance, as well as the participants who took part in our study.

DECLARATION OF INTEREST STATEMENT

The authors report no declarations of interest.

REFERENCES

- [1] De Guise E, Leblanc J, Feyz M, Meyer K, Duplantie J, Thomas H, Abouassaly M, Champoux MC, Couturier C, Lin H, Lu L, Robinson C, Roger E. Long-Term outcome after severe traumatic brain Injury: the McGill interdisciplinary prospective study. *The journal of head trauma rehabilitation* 2008;23(5):294-303.
- [2] Temkin NR, Corrigan JD, Dikmen SS, Machamer J. Social functioning after traumatic brain injury. *The journal of head trauma rehabilitation* 2009;24(6):460-7.
- [3] Milders M, Ietswaart M, Crawford JR, Currie D. Social behavior following traumatic brain injury and its association with emotion recognition, understanding of intentions, and cognitive flexibility. *Journal of the international neuropsychological society* 2008;14:318-26.
- [4] Knox L, Douglas J. Long-term ability to interpret facial expression after traumatic brain injury and its relation to social integration. *Brain and cognition* 2009;69:442-9.
- [5] Dimoska A, McDonald S, Pell MC, Tate RL, James CM. Recognizing vocal expressions of emotion in patients with social skills deficits following traumatic brain injury. *Journal of the international neuropsychological society* 2010;16(2):1-14.
- [6] Spikman JM, Milders MV, Visser-Keizer AC, Westerhof-Evers HJ, Herben-Dekker M, van der Naalt J. Deficits in facial emotion recognition indicate behavioral changes and impaired self-awareness after moderate to severe traumatic brain injury. *PloS ONE* 2013;8(6):e65581. doi:10.1371/journal.pone.0065581.
- [7] Adolphs R. Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology* 2002; 12(2):169-77.

- [8] Adolphs R, Damasio AR. Neurobiology of emotion at a systems level. In Borod JCE, editors. *The neuropsychology of emotion*. New York: Oxford University Press; 2000, p 194-214.
- [9] Phillips ML, Drevets WC, Rauch SL, Lane R. Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception. *British journal of psychiatry* 2003;54:504-14.
- [10] Bigler ED. Structural imaging. In: Silver JM, MacAllister TW, Yudofsky SC, editors. *Textbook of traumatic brain injury*, second edition. Arlington: American Psychiatric Publishing; 2011, p. 73-91.
- [11] Beauchamp MH, Ditchfield M, Maller JJ, Catroppa C, Godfrey C, Rosenfeld JV, Kean MJ, Anderson VA. Hippocampus, amygdala and global brain changes 10 Years after childhood traumatic brain injury. *International journal of developmental neuroscience* 2001;29(2):137-43.
- [12] Mayer AR, Mannell MV, Ling J, Gasparovic C, Yeo RA. Functional connectivity in mild traumatic brain injury. *Human brain mapping* 2011;32(11):1825-35.
- [13] Yeo RA, Gasparovic C, Merideth F, Ruhl D, Doezema D, Mayer AR. A longitudinal proton magnetic resonance spectroscopy study of mild traumatic brain injury. *Journal of neurotrauma* 2011;28(1):1-11.
- [14] Eierud C, Craddock RC, Fletcher S, Aulakh M, King-Casas B, Kuehl D, LaConte SM. Neuroimaging after mild traumatic brain injury: Review and meta-analysis. *Neuroimage: Clinical* 2014;4:283-94.
- [15] Neumann D, McDonald BC, West J, Keiski MA, Wang Y. Neurobiological mechanisms associated with facial affect recognition deficits after traumatic brain injury. *Brain imaging behavior* 2015. doi:10.1007/s11682-015-9415-3.

- [16] Genova HM, Rajagopalan V, Chiaravalloti N, Binder A, Deluca J, Lengenfelder J. Facial affect recognition linked to damage in specific white matter tracts in traumatic brain injury. *Social Neuroscience* 2015;10(1):27-34.
- [17] Gosselin N, Peretz I, Hasboun D, Baulac M, Samson S. Impaired recognition of musical emotions and facial expressions following anteromedial temporal lobe excision. *Cortex* 2011;47(9):1116-25.
- [18] Vandekerckhove M, Plessers M, Van Mieghem A, Beeckmans K, Van Acker F, Maex R, Markowitsch H, Mariën P, Van Overwalle F. Impaired facial emotion recognition in patients with ventromedial prefrontal hypoperfusion. *Neuropsychology* 2014;28(4):605-12.
- [19] Adolphs R, Tranel D, Damasio H, Damasio AR. Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala. *Nature* 1994;372(6507):669-72.
- [20] Dellacherie D, Hasboun D, Baulac M, Belin P, Samson, S. Impaired recognition of fear in voices and reduced anxiety after unilateral temporal lobe resection. *Neuropsychologia* 2011;49(4):618-29.
- [21] Scott SK, Young AW, Calder AJ, Hellawell DJ, Aggleton, JP, Johnson M. Impaired auditory recognition of fear and anger following bilateral amygdala lesions. *Nature* 1997;385(6613):254-7.
- [22] Spell LA, Frank E. Recognition of nonverbal communication of affect following traumatic brain injury. *Journal of nonverbal behavior* 2000;24(4):285-300.
- [23] Hopkins MJ, Dywan J, Segalowitz SJ. Altered electrodermal response to facial expression after closed head injury. *Brain injury* 2002;16(3):245-57.

- [24] Green REA, Turner GR, Thompson WF. Deficit in facial perception in adults with recent traumatic brain injury. *Neuropsychologia* 2004;42:133-41.
- [25] Croker V, McDonald S. Recognition of emotion from facial expression following traumatic brain injury. *Brain injury* 2005;19(10):787-99.
- [26] McDonald S, Saunders JC. Differential impairment in recognition of emotion across different media in people with severe traumatic brain injury. *Journal of the international neuropsychological society* 2005;11:392-9.
- [27] Ietswaart M, Milders M, Crawford JR, Currie D, Scott CL. Longitudinal aspects of emotion recognition in patients with traumatic brain injury. *Neuropsychologia* 2008;46:148-159.
- [28] Callahan BL, Ueda K, Sakata D, Plamondon A, Murai T. Liberal bias mediates emotion recognition deficits in frontal traumatic brain injury. *Brain and cognition* 2011;77(3):412-8.
- [29] McDonald S, Rosenfeld J, Henry JD, Togher L, Tate R, Bornhofen C. Emotion perception and alexithymia in people with severe traumatic brain injury: one disorder or two? A preliminary investigation. *Brain impairment* 2011;12(3):165-78.
- [30] Babbage DR, Yim J, Zupan B, Neumann D, Tomita MR, Willer B. Meta-analysis of facial affect recognition difficulties after traumatic brain injury. *Neuropsychology* 2011;25(3):277-85.
- [31] Zupan B, Babbage D, Neumann D, Willer B. Recognition of facial and vocal affect following traumatic brain injury. *Brain injury* 2014;28(8):1087-95.
- [32] Rosenberg H, McDonald S, Dethier M, Kessels RPC, Westbrook RF. Facial Emotion Recognition Deficits following Moderate-Severe Traumatic Brain Injury (TBI): Re-examining

the Valence Effect and the Role of Emotion Intensity. *Journal of the international neuropsychological society* 2014;20(10):994-1003.

[33] Williams DH, Levin HS, Eisenberg HM. Mild head injury classification. *Neurosurgery* 1990;27:422-8.

[34] Borg J, Holm L, Cassidy JD, Peloso PM, Carroll LJ, von Holst H, Ericson K, WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. Diagnostic procedures in mild traumatic brain injury: results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine* 2004;43:61-75.

[35] Iverson GL, Lange RT. Concussion versus mild traumatic brain injury: is there a difference? In: Zollman FS, editor. *Manual of traumatic brain injury management*. New York: Demos medial publishing; 2011, p. 43-51.

[36] Borgaro SR, Prigatano GP, Kwasnica C, Rexer, JL. Cognitive and affective sequelae in complicated and uncomplicated mild traumatic brain injury. *Brain injury* 2003;17(3):189-98.

[37] Iverson GL. Complicated vs uncomplicated mild traumatic brain injury: acute neuropsychological outcome. *Brain injury* 2006;20(13-14):1335-44.

[38] Lange RT, Iverson GL, Franzen MD. Neuropsychological functioning following complicated vs. uncomplicated mild traumatic brain injury. *Brain injury* 2009;23(2):83-91.

[39] Carlozzi NE, Kirsch NL, Kisala PA, Tulsy DS. An examination of the Wechsler Adult Intelligence Scales, Fourth Edition (WAIS-IV) in individuals with complicated mild, moderate and severe traumatic brain injury (TBI). *The Clinical Neuropsychologist* 2015;29(1):21-37.

[40] Ambadar Z, Schooler JW, Cohn JF. Deciphering the enigmatic face: the importance of facial dynamics in interpreting subtle facial expressions. *Psychological science* 2005;16(5):403-10.

- [41] Rymarczyk K, Biele C, Grabowska A, Majczynski H. EMG activity in response to static and dynamic facial expressions. *International journal of psychophysiology* 2011;79(2):330-3.
- [42] Trautmann SA, Fehr T, Herrmann M. Emotions in motion: dynamic compared to static facial expressions of disgust and happiness reveal more widespread emotion-specific activations. *Brain research* 2009;1284:100-15.
- [43] Belin P, Fecteau S, Bédard C. Thinking the voice: neural correlates of voice perception. *Trends in cognitive sciences* 2004;8(3):129-35.
- [44] Juslin PN, Sloboda JA. *Handbook of music and emotion: Theory, research, applications*. Oxford University Press; 2011.
- [45] Peretz I, Aubé W, Armony JL. Towards a neurobiology of musical emotions. In: Altenmüller E, Schmidt S, Zimmermann E, editors. *The evolution of emotional communication: from sounds in nonhuman mammals to speech and music in man*. Oxford University Press; 2013, p. 277-99.
- [46] Koelsch S. Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature reviews neuroscience* 2014;15(3):170-180.
- [47] Särkämö T, Tervaniemi M, Laitinen S, Forsblom A, Soinila S, Mikkonen M, Autti T, Silvennoinen HD, Erkkilä J, Laine M, Peretz I, Hietanen M. Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain* 2008;131:866-76.
- [48] Särkämö T, Pihko E, Laitinen S, Forsblom A, Soinila S, Mikkonen M, Autti T, et al. Music and speech listening enhance the recovery of early sensory processing after stroke. *Journal of cognitive neuroscience* 2010;22(12):2716-27.
- [49] Särkämö T, Soto D. Music listening after stroke: Beneficial effects and potential neural mechanisms. *Annals of the New York academy of sciences* 2012;1252(1):266-81.

- [50] Gosselin N, Peretz I, Noulhiane M, Hasboun D, Beckett C, Baulac M, Samson S. Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain* 2005;128:628-40.
- [51] Gosselin N, Peretz I, Johnsen E, Adolphs R. Amygdala damage impairs emotion. *Neuropsychologia* 2007;45(2):236-44.
- [52] Peretz I. Towards a neurobiology of musical emotions. In: Juslin P, Sloboda J, editors. *Handbook of Music and Emotion: Theory, research, applications*. Oxford University Press; 2010.
- [53] Aubé W, Angulo-Perkins A, Peretz I, Concha L, Armony JL. Fear across the senses: Brain responses to music, vocalizations and facial expressions. *Social cognitive and affective neuroscience* 2014; 3(10):399-407.
- [54] Arlinghaus KA, Pastorek NJ, Graham DP. Neuropsychiatric assessment. In: Silver JM, MacAllister TW, Yudofsky SC, editors. *Textbook of traumatic brain injury*, second edition. Arlington: American Psychiatric Publishing; 2011, p 55-73
- [55] Wechsler D. *Wechsler adult intelligence scale-third edition (WAIS-III)*. San Antonio: Psychological Corporation; 1997.
- [56] Lovell MR, Iverson GL, Collins MW. Measurement of symptoms following sports-related concussion: reliability and normative data for the post-concussion scale. *Applied neuropsychology* 2006;13(3):166-74.
- [57] Beck AT, Steer RA, Brown GK. *Manual for the Beck Depression Inventory-II*. San Antonio: Psychological Corporation; 2013.

- [58] Roy S, Roy C, Éthier-Majcher C, Fortin I, Belin P, Gosselin F. STOIC: A database of dynamic and static faces expressing highly recognizable emotions. http://www.mapageweb.umontreal.ca/gosselif/sroyetal_sub.pdf.
- [59] Belin P, Fillion-Bilodeau S, Gosselin F. The Montreal Affective Voices: A validated set of nonverbal affect bursts for research on auditory affective processing. *Behavior research methods* 2008;40(2):531-9. <http://vnl.psy.gla.ac.uk>.
- [60] Vieillard S, Peretz I, Gosselin N, Khalfa S, Gagnon L, Bouchard B. Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition and emotion* 2008;22(4):720-52. www.brams.umontreal.ca/plab/publications/article/96
- [61] Broglio SP, Moore RD, Hillman CH. A history of sport-related concussion on event-related brain potential correlates of cognition. *International journal of psychophysiology* 2011;82(1):16-23.
- [62] Gosselin N, Bottari C, Chen J-K, Huntgeburth SC, De Beaumont L, Petrides M, Cheung B, Ptito A. Evaluating the cognitive consequences of mild traumatic brain injury and concussion by using electrophysiology. *Neurosurgical focus* 2012;33(6):1-7.
- [63] Elleberg D, Henry LC, Macciocchi SN, Guskiewicz KM, Broglio SP. Advances in sport concussion assessment: from behavioral to brain imaging measures. *Journal of neurotrauma* 2009;26(12):2365-82.
- [64] Lachapelle J, Bolduc-Teasdale J, Ptito A, McKerral M. Deficits in complex visual information processing after mild TBI: electrophysiological markers and vocational outcome prognosis. *Brain injury* 2008;22(3): 265-74.

[65] Hawk ST, van Kleef GA, Fischer AH, van der Schalk J. “Worth a thousand words”: absolute and relative decoding of nonlinguistic affect vocalizations. *Emotion* 2009;9(3):293-305.

[66] Arnal LH, Flinker A, Kleinschmidt A, Giraud A-L, Poeppel D. Human Screams Occupy a Privileged Niche in the Communication Soundscape. *Current Biology* 2015. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2015.06.043>.

Table 1. Demographic and clinical characteristics of the study participants. Means (and standard deviations) for age, years of education, musical training, intellectual functioning index (verbal IQ and performance IQ of WAIS-III), Glasgow Coma Scale (GCS) scores, time post-TBI, post-concussion symptoms scores and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) scores.

Characteristics	Healthy controls (n = 11)	Uncomplicated mild TBI (n = 11)	Complicated mild TBI (n = 9)	Moderate-severe TBI (n = 10)
Age	34 (7.8)	32.8 (7.9)	40.7 (10.6)	35.6 (12)
Gender (women/men)	6/5	9/2	2/7	4/6
Education (years)	15.5 (2)	14.6 (2.4)	12.6 (3.7)	14.7 (2.5)
Musical training (years)	1.3 (1.6)	2 (3)	1 (3)	1 (3)
Verbal IQ index	103.6 (5)	100.9 (13.4)	100 (7.9)	106 (10.2)
Performance IQ index	118.2 (7.5)	110.5 (11.3)	112.8 (10.9)	114 (12.9)
GCS scores	-	15 (0)	14.4 (0.7) ^a	7.8 (3.1) ^a
Time post-TBI (months)	-	10.6 (7)	11.3 (10.1)	16 (8.9)
Post-concussion symptoms scores	7.8 (6.4)	45.8 (29) ^b	25.2 (26.2)	19.8 (9.6) ^b
BDI-II scores	4.9 (4.4)	15.4 (8.3) ^b	12.7 (8.8)	11.3 (4.5) ^b

^a: $p < 0.05$, as compared to uncomplicated mild TBI

^b: $p < 0.05$, as compared to healthy controls

Table 2. Mean percentages (and standard errors) of correct responses, obtained by TBI groups and healthy controls, for controls tasks (emotional discrimination and structural discrimination) according to dynamic facial, vocal and musical expressions.

	Emotional discrimination	Structural discrimination
Facial expressions		
Healthy controls	87.9 ± 2.8	88.8 ± 2.9
Uncomplicated mild TBI	84.8 ± 2.8	88.8 ± 1.7
Complicated mild TBI	84 ± 2.4	79.6 ± 2.9
Moderate-severe TBI	87 ± 2.5	87.4 ± 1.9
Vocal expressions		
Healthy controls	93.9 ± 1.6	93 ± 2.3
Uncomplicated mild TBI	95.7 ± 2.8	93 ± 2.9
Complicated mild TBI	94.8 ± 2.6	88.5 ± 4.1
Moderate-severe TBI	96.1 ± 1.2	94.3 ± 1.8
Musical expressions		
Healthy controls	87.9 ± 3.2	92.4 ± 2.1
Uncomplicated mild TBI	85.9 ± 2.9	89.1 ± 2.8
Complicated mild TBI	82.4 ± 2.9	87.8 ± 1.7
Moderate-severe TBI	86.1 ± 2.7	89 ± 3.7

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Visual analogue scales used for rating emotional valence (-50: very negative to 50: very positive) and arousal/intensity (0: not at all intense to 100: very intense).

Figure 2. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task involving dynamic facial expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear); *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

Figure 3. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task using vocal expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear).

Figure 4. Mean percentages and standard errors of correct responses obtained in the emotional recognition task involving musical expressions, by healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI and moderate-severe TBI participants, according to emotions (happiness, sadness, fear).

Figure 5. Mean ratings and standard errors of valence (left side) and arousal/intensity (right side) according to the three emotional expressions (happiness, sadness, fear) and group (healthy controls, mild TBI (uncomplicated), complicated mild TBI, moderate-severe TBI).

Figure 1

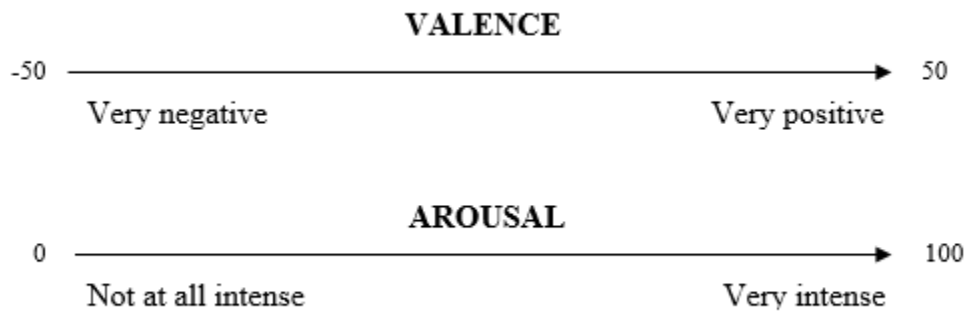


Figure 2

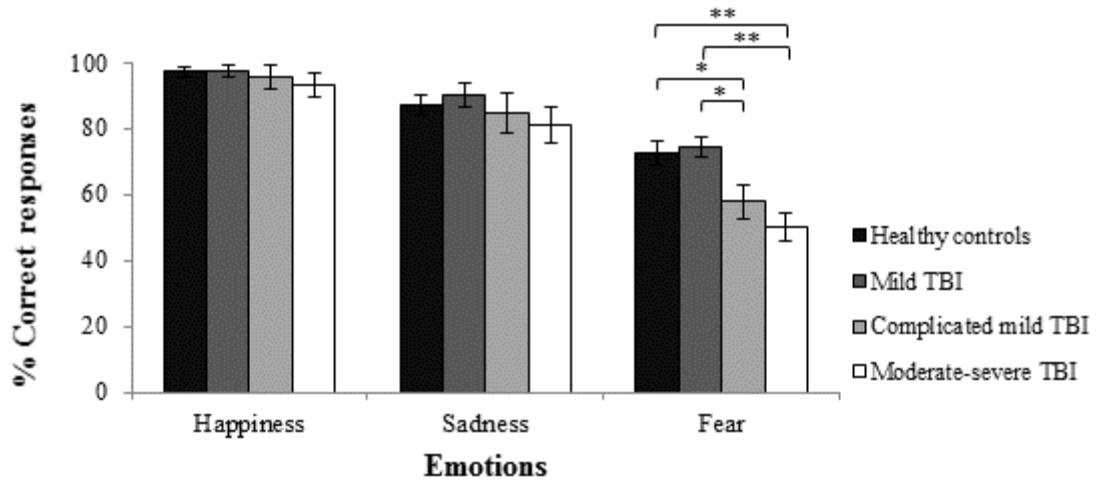


Figure 3



Figure 4

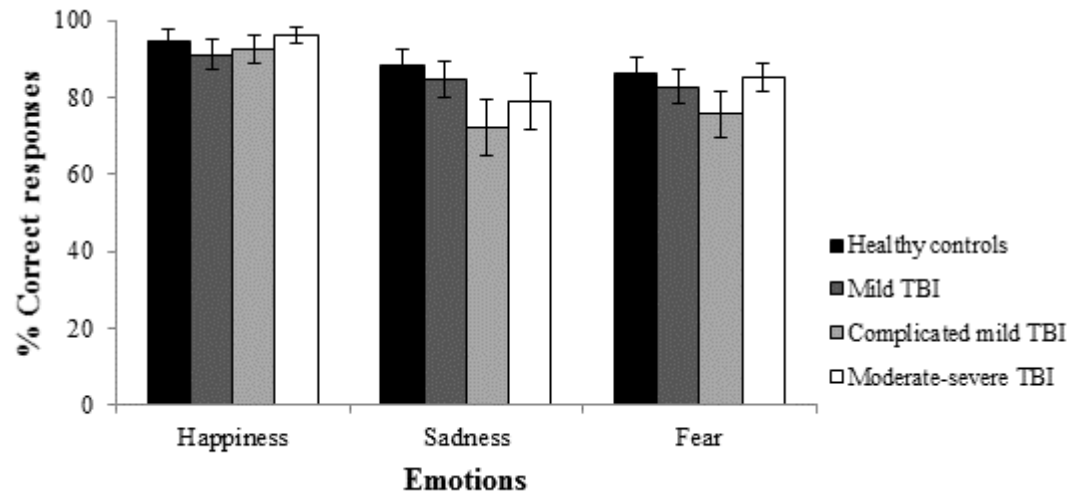
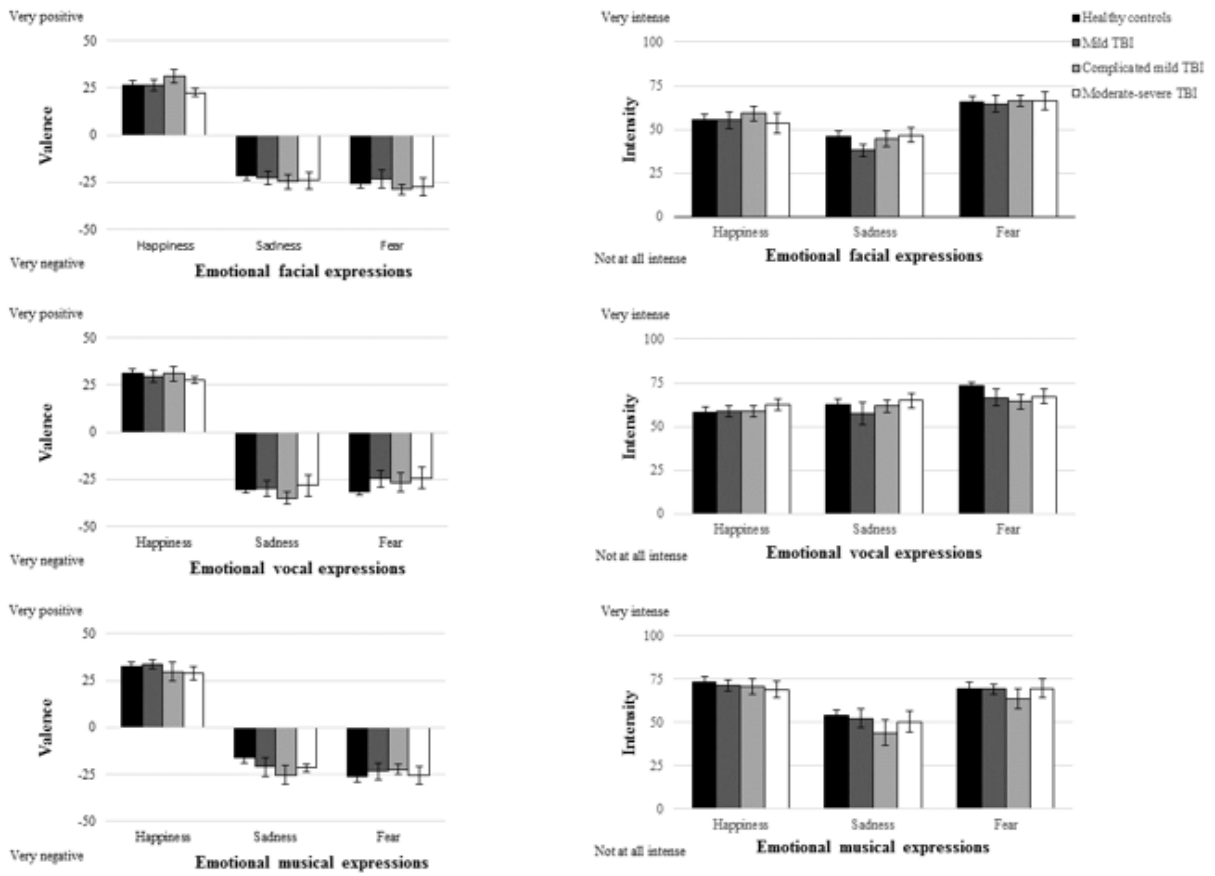


Figure 5



2.2 Article 2: Electrophysiological responses to emotional facial expressions following traumatic brain injury

Joanie Drapeau, Nathalie Gosselin, Isabelle Peretz et Michelle McKerral

Soumis dans *Journal of Neurotrauma*

Electrophysiological responses to emotional facial expressions following traumatic brain injury

Running title: ERPs and emotions from faces following TBI

Drapeau, Joanie M.A.^{1,2,3}, Gosselin, Nathalie Ph.D.^{2,3}, Peretz, Isabelle Ph.D.³ and McKerral, Michelle Ph.D.^{1,2}

¹ Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation (CRIR) – Centre de réadaptation Lucie-Bruneau (CRLB)

² Centre de recherche en neuropsychologie et cognition (CERNEC), Département de psychologie, Université de Montréal

³International Laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS)

Mailing information

Joanie Drapeau (corresponding author)

CRIR-CRLB

2275 avenue Laurier est, Montréal, Québec, Canada H2N 2N8

Tel: 1-514-343-2343

Fax: 1-514-343-5787

Nathalie Gosselin

BRAMS

FAS – Département de psychologie

Pavillon 1420 Mont Royal

CP 6128, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7

Tel: 1-514-343-6111

Fax : 1-514-343-2175

Isabelle Peretz

BRAMS

FAS – Département de psychologie

Pavillon 1420 Mont Royal

CP 6128, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3J7

Tel: 1-514-343-6111

Fax : 1-514-343-2175

Michelle McKerral

CRIR-CRLB

2275 avenue Laurier est, Montréal, Québec, Canada H2N 2N8

Tel: 1-514-343-2336

Fax: 1-514-343-5787

ABSTRACT

Deficits in recognizing emotions from facial expressions have been established in prior behavioral studies of adults having sustained a traumatic brain injury (TBI). However, the mechanisms underlying affected emotional recognition from facial expressions following a TBI remain to be clarified. Event-related potentials (ERPs) are well suited for revealing the rapid temporal sequence of neural processing involved in emotional recognition, making it possible to distinguish the relative contributions of early (attentional and perceptual factors) as well as later stages of processing (higher cognitive functions, including executive components of attention). The present study aimed to measure neural information processing underlying emotional recognition from facial expressions in adults having sustained a mild, moderate or severe TBI as compared to healthy individuals. We thus measured early (N1, N170) and later (N2) ERP components during presentation of fearful, neutral and happy facial expressions in 14 adults with TBI and 11 control participants. Findings indicated significant differences between groups, irrespective of emotional expression, in the early attentional stage (N1), which is affected in TBI. Both groups showed similar perceptual integration of facial features (N170), with greater amplitude for fearful facial expressions, in the right hemisphere. At a higher-level emotional discrimination stage (N2), healthy individuals demonstrated preferential processing for fear as compared to happiness and neutrality, in contrast to adults with TBI who showed similar responses for the three emotion categories. Overall, these findings suggest that reduced early selective attentional processing following TBI may impede higher-level cognitive stage enabling discrimination of fearful facial expressions. This study contributes to further improving our comprehension of emotional recognition following TBI, with eventual implications for intervention and remediation strategies.

Keywords: Traumatic brain injury, Event Related Potentials, Emotions, Facial expressions

INTRODUCTION

Traumatic brain injury (TBI) can lead to long-term physical, behavioral, and cognitive consequences affecting social participation.^{1, 2} A link between such difficulties and poor ability in recognizing emotions from facial expressions has been suggested.³⁻⁵ Indeed, emotional recognition is of crucial importance for successful social interactions. In particular, emotional facial expressions provide central information to understand others' intentions and ultimately guide behaviour.

Deficits in recognizing emotions from facial expressions, especially negative emotions (i.e. fear, anger, sadness or disgust) as compared to positive ones (i.e. happiness), have been established in prior behavioral studies following moderate-severe TBI³⁻¹⁰ and complicated mild TBI (i.e. with positive brain CT-scan or MRI findings not necessitating neurosurgical intervention).¹⁰ In fact, brain regions involved in emotional processing, such as the prefrontal cortex (i.e. ventromedial and the orbitofrontal) and limbic structures (i.e. amygdala, temporal lobes, fusiform gyrus),¹¹⁻¹³ are frequently damaged or disrupted following mild, moderate or severe TBI.^{14, 15} Specific lesions to ventromedial prefrontal lobe, anteromedial temporal lobe or bilateral amygdala have also been related to greater deficits in fearful and disgusted facial expressions.¹⁶⁻¹⁸ Furthermore, recent neuroimaging findings in patients having sustained moderate-severe TBI have revealed that deficits in emotional recognition from facial expressions are linked to lower neural activation in the right fusiform gyrus¹⁹ as well as to damage in precise white matter tracts, such as the inferior longitudinal fasciculus and inferior fronto-occipital fasciculus.²⁰

Despite compelling evidence of impairments in recognizing emotions from facial expressions following TBI, findings have however been equivocal as to whether these deficits

result primarily from specific damage to specialized neural structures that underpin higher-level cognitive functions enabling emotional recognition²¹ or rather arise mainly as a consequence of reduced attentional functioning.^{22, 23} Attention, which is the ability to focus on relevant features, is an essential prerequisite to efficiently recognize emotions. Thus, the mechanisms underlying affected emotional recognition from facial expressions following TBI remain to be clarified; this would be of interest to help refine intervention and remediation strategies.

Event-related potentials (ERPs) represent an ideal method to reveal the rapid temporal sequence of neural processing underlying emotional recognition,^{24, 25} making it possible to distinguish the relative contributions of early (attentional and perceptual factors) and later processing stages (for example, executive components of attention) toward emotional recognition difficulties following TBI. ERPs also have the advantage of being sensitive enough to identify subtle neurofunctional alterations, even in the post-acute stages of uncomplicated mild TBI (i.e. with negative CT-scan findings).^{26, 27}

Several early and late ERP components have been studied in relation to emotional processing from facial expressions in healthy individuals, such as the N1 (early selective attentional processing),²⁸ N170 (perceptual integration of facial features)²⁹ as well as anterior N2 (executive cognitive control^{30, 31} or high-level cognitive processes enabling discrimination between emotional categories³²⁻³³). Some studies have also reported that these ERP components are modulated by emotional valence (negative, neutral, positive) of facial expressions; for instance, preferential processing (i.e. increased ERP amplitude) for negative emotional facial expressions has been demonstrated, as compared to neutral facial expressions.^{25, 32-36} Fearful stimuli, especially, are thought to be prioritized for attention

because of their biological, evolutionary and behavioral relevance.³⁷ Furthermore, it has been proposed that performing an explicit cognitive task, such as categorization or oddball discrimination, may suppress or interfere with the automatic preferential processing of emotional stimuli.³⁸ Thus, an implicit or passive viewing task could be more appropriate to reflect the effect of emotional valence.

To our knowledge, only one study has explored ERP responses to emotions (angry and neutral) from facial expressions with adults having sustained a TBI.³⁹ Participants were asked to perform an oddball task and to detect angry faces as rare stimuli. Participants with TBI showed significantly delayed latencies and lower amplitudes of the P3 component for angry faces, as compared to controls. However, these results may simply reflect non-specific impairment in detecting rare stimuli among distractors or general attentional disturbances, which is demonstrated in the TBI population when performing an oddball task,⁴⁰ rather than impairment in emotional recognition from facial expressions.

The present study aimed to measure neural information processing underlying emotional recognition from facial expressions in adults having sustained a mild, moderate or severe TBI as compared to healthy individuals. To do so, we conducted an experiment in which we measured early (N1, N170) and later (N2) ERP components during presentation of fearful, neutral and happy facial expressions. Rare stimuli (butterflies), which were irrelevant to the study, were also presented to ensure that all participants paid attention to stimuli. As an exploratory hypothesis, we postulated that the later processing stage (N2) would be affected following TBI as compared to healthy controls, suggesting impairments in higher-level cognitive processes enabling discrimination between emotional categories, rather than as a consequence of attentional (N1) or perceptual (N170) difficulties. Also, since negative

emotions from facial expressions have been shown to be impaired following a TBI in prior behavioral studies, we expected that participants with TBI would not demonstrate, as would control participants, preferential processing for fearful facial expressions as compared to happy and neutral facial expressions.

MATERIALS AND METHODS

Participants

Twenty-five out of 39 recruited participants were kept for analysis: 14 participants with TBI (ten adults with uncomplicated mild TBI, one with complicated mild TBI, three with moderate-severe TBI) and 11 healthy individuals. Nine participants with TBI and five healthy individuals were removed from the analysis because of the presence of artifacts, mainly because of loss of trials (more than 50% of trials) due to eye blinks, movements, excessive sweating or very large alpha oscillations. Participants with TBI were recruited from the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau in Montreal, Québec, Canada. Healthy controls were recruited through advertisements in the community. The study was approved by the Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation (CRIR) Research Ethics Committee. All participants provided a written informed consent according to the declaration of Helsinki, prior to testing.

TBI severity was determined by at least one of the following parameters, as noted in medical records: Glasgow Coma Scale (GCS) score (mild TBI: GCS = 13-15, moderate-severe TBI: GCS < 12), post-traumatic amnesia (PTA) duration (mild TBI: PTA < 24 hours, moderate-severe: PTA > 24 hours) and loss of consciousness (LOC) duration (mild TBI: LOC < 30 minutes; moderate-severe TBI > 30 minutes).⁴¹ Uncomplicated mild TBI and complicated mild TBI were also distinguished according to CT-scan or MRI results;

complicated mild TBI presented intracranial lesions which had not required neurosurgical intervention.⁴² Of the participants with complicated mild, moderate or severe TBI, one had predominantly temporal lobe damage, one had lesions in the frontal and temporal regions, and two had diffuse lesions (including frontal, temporal and parietal lobe lesions).

Exclusion criteria for participants with TBI were: (1) younger than 18 or older than 55 years; (2) a psychiatric or neurological history, including more than one TBI; (3) a penetrating brain injury, such as assault with blunt or sharp object; (4) an uncorrected visual impairment; and (5) uses of psychostimulant, antidepressant or antipsychotic treatment. This information was documented in the medical records or during the first appointment. An additional exclusion criterion for healthy controls was a history of TBI.

Demographic and clinical characteristics of the participants are shown in table 1. TBI subgroups (i.e. ten uncomplicated mild TBI, one complicated mild TBI and three moderate-severe TBI) were pooled together because no significant difference was found between-subjects and within-subjects regarding brain responses to emotional expressions (all $p_s > 0.2$, general linear model repeated-measures ANOVA). Participants with TBI and healthy controls did not differ according to age, gender, years of education and intellectual functioning index (verbal IQ [vocabulary] and performance IQ [matrix reasoning] of the Wechsler adult intelligence scale-III [WAIS-III]⁴³) (all $p_s > 0.1$). Healthy controls and participants with TBI differed significantly according to post-concussion symptoms score,⁴⁴ $F(1, 23) = 7.660$, $p = 0.011$, and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) score,⁴⁵ $F(1, 23) = 9.787$, $p = 0.005$. All participants presented a BDI-II score below 20 (i.e. below the cut-off for the presence of a possible moderate-severe depression), except for two participants with TBI. However, these two participants scored higher on ‘somatic’ and ‘cognitive’ items (e.g. fatigue, sleep

disturbances, concentration difficulties) compared to ‘affective’ items (e.g. sadness), which could be more related to the TBI than to depression. Indeed, BDI-II scores were highly correlated with post-concussion symptoms scores ($r = 0.786$, $p = 0.000$).

Insert table 1 about here

Stimuli

Thirty grayscale static facial expressions (256×256 pixels) were selected from STOIC database (http://www.mapageweb.umontreal.ca/gosselif/sroyetal_sub.pdf).⁴⁶ Facial expressions were created by professional actors (five men, five women) and were intended to express fear, happiness and neutrality (10 different stimuli per emotional category). These facial stimuli were cropped to exclude non-facial cues and were equivalent in mean luminance and contrast. A grayscale picture of butterfly (256×256 pixels) was also included. Examples of stimuli are presented in figure 1.

Insert figure 1 about here

Task and procedure

Participants were presented with 330 trials in two blocks of 165 trials each (50 facial expressions per emotional category: fear, neutrality, happiness, and 15 butterflies), in a pseudo-random order, after a practice block of 33 trials (10 facial expressions per emotional category and three butterflies). All stimuli appeared at the center of the computer screen and were viewed from a distance of 1.14 meters. Each trial began with a fixation cross presented for 500 milliseconds (ms), followed by a visual stimulus (facial expressions or butterfly) for 200 ms and a blank screen for 50 ms. Example of the task is presented in figure 2. Participants were instructed to maintain fixation at the centre of the computer screen, to avoid eye movements or blinks during visual stimuli presentation, and to press the space bar on the

computer keyboard whenever a butterfly appeared. E-prime software was used for stimuli presentation and response recording.

Insert figure 2 about here

ERP data recording and analysis

EEG activity was recorded while participants performed the task, with 64 Ag/AgCl active electrodes (Active Two BioSemi) placed over the scalp, according to the extended 10–20 International EEG system.⁴⁷ Horizontal eye movements (HEOG) were recorded with electrodes placed on the external canthus of each eye. Vertical eye movements and eye blinks (VEOG) were recorded from an electrode placed on the inferior orbital region of the left eye and Fp1 electrode. Sampling rate was set to 512 Hz and the data were referenced to the average mastoids during analysis.

Brain Vision Analyser (version 1.5) was used to analyse EEG data. Signals were filtered (0.01 Hz high-pass, 30 Hz low-pass) and were averaged offline. Eye movement artifacts were rejected semi-automatically with the ocular correction ICA method. Thus, trials with ocular artifacts at electrodes of interest ($> 70 \mu\text{V}$), eye blinks (VEOG $> 100 \mu\text{V}$), and large horizontal eye movements (HEOG $> 30 \mu\text{V}$) were excluded from the analysis. EEGs were averaged separately for fear, neutrality and happiness. For every trial, EEG epochs of 1000 ms (including a 200 ms prestimulus period) were averaged after artifact rejection. Epochs were then baseline corrected based on mean amplitude of activity recording during the 200 ms immediately prior to stimulus onset.

ERP components were scored by locating the highest peak within windows after stimulus onset:³¹ N1 (50-150 ms), N170 (150-200 ms) and N2 (200-350 ms). According to prior emotional processing studies with healthy individuals, amplitude deflection of the N1 is

largest over frontocentral electrodes,^{32, 33} the N170 over lateral occipitotemporal sites,^{29, 35, 36} and the N2 at frontal sites.^{32, 33}

Statistical analysis

All ERP components were first investigated to detect which brain regions (frontal, central or posterior) and which electrode sites showed maximum amplitude. For each ERP component (N1, N170, N2) independently, data were analyzed using a general linear model repeated-measures ANOVA, with groups (two levels: TBI and controls) as a between-subjects factor, and emotions (three levels: fear, neutrality, happiness) and electrode sites (if more than one electrode site) as within-subjects factors. As secondary analyses, Pearson correlations (r) and Chi-square (χ^2) were calculated to assess the relationship between ERP responses and clinical/demographical variables (injury severity, time post-TBI, age, gender, level of education, verbal IQ, performance IQ). SPSS 21.0 software was used for data analysis.

RESULTS

Behavioral responses

All participants performed accurately on butterfly detection (healthy controls: mean 100%; participants with TBI: mean 97.9%, standard deviation 2.8), ensuring that they all fully paid attention to the stimuli.

Electrophysiological responses to emotional facial expressions

N1

N1 amplitude deflection was largest over FCz electrode (frontocentral site). Average waveforms within-subjects and average responses between-subjects are shown in figure 3, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Analysis revealed a significant main effect of group, $F(1, 23) = 5.621$, $p = 0.027$, $\eta^2 = 0.196$, indicating that adults with TBI showed reduced N1 amplitude as compared to healthy individuals in processing emotional facial expressions. No significant main effect of emotion ($p = 0.567$) and no significant interaction between groups and emotions ($p = 0.223$) were found.

Insert figure 3 about here

N170

N170 amplitude deflections were largest over P9 (left hemisphere) and P10 (right hemisphere) electrodes (occipitotemporal sites). Average waveforms within-subjects and average responses between-subjects are shown in figure 4, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Analysis revealed no significant main effect of group ($p = 0.737$) and no significant interaction between emotion and group ($p = 0.498$), but a significant main effect of emotion, $F(2, 46) = 8.233$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.267$, indicating that some emotions elicited larger amplitude than others, irrespective of the group. Bonferroni-adjusted pairwise comparisons revealed that, overall, fearful facial expressions elicited larger amplitude than neutral ones ($p = 0.004$), and happy facial expressions elicited larger amplitude than neutral ones ($p = 0.003$). There was also a significant main effect of electrode site, $F(1, 23) = 8.233$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.267$, revealing a stronger amplitude in the right hemisphere, tempered by a significant interaction between electrode site and emotion, $F(2, 46) = 8.123$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.261$. Bonferroni-adjusted pairwise comparisons revealed that, specifically, fearful facial expressions showed larger amplitude in the right hemisphere ($p = 0.006$) as compared to other

emotions. No significant interaction between electrode site and group ($p = 0.368$) and no interaction between electrode site, group and emotion ($p = 0.649$) were found.

Insert figure 4 about here

N2

N2 amplitude deflections were largest over Fz electrode (frontal site). Average waveforms within-subjects and average responses between-subjects are shown in figure 5, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Analysis revealed no significant main effect of group ($p = 0.314$), but a significant main effect of emotion, $F(1, 23) = 10.829$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.496$, indicating that, overall, some emotions elicited larger amplitude than others. This was tempered by a significant interaction between group and emotion, $F(1, 23) = 3.978$, $p = 0.034$, $\eta^2 = 0.266$. Bonferroni-adjusted pairwise comparisons revealed that healthy individuals showed a preferential processing (i.e. larger amplitude) for fearful facial expressions, as compared to neutrality ($p = 0.036$) and happiness ($p = 0.001$), in contrast to adults with TBI, which showed no preferential processing according to emotions from facial expressions.

Insert figure 5 about here

Relationship between electrophysiological responses and demographic variables

No significant correlations were found between ERP responses (N1, N170, N2 components) of all participants and clinical or demographic variables, such as Glasgow Coma Scale score, time post-injury, Beck Depression Inventory score, post-concussion symptoms scale score, level of education, age, gender, as well as IQ index (all $p_s < 0.05$).

DISCUSSION

The aim of this original study was to measure the temporal sequence of neural processing underlying emotional recognition from negative (fear), neutral and positive (happy) facial expressions in adults having sustained a TBI as compared to healthy individuals.

Results indicated significant differences between groups, irrespective of emotional expressions, in the early attentional stage (N1), indicating reduced selective attentional processing for all emotions from facial expressions following TBI, even in the context of attentional facilitation induced by butterfly detection. Findings also revealed that both groups showed statistically similar perceptual integration of facial features (N170), with a preferential processing for fearful and happy facial expressions, as compared to neutral faces, which was stronger in the right hemisphere. Moreover, at a higher-level emotional discrimination stage (N2), healthy individuals demonstrated preferential processing for fear as compared to happiness and neutrality, in contrast to adults with TBI which showed no effect of emotion. Overall, these findings suggest that reduced early selective attentional processing following TBI may impede higher-level cognitive mechanisms enabling discrimination of fearful facial expressions. These novel ERP results are consistent with previous behavioral studies indicating that impaired emotional recognition from facial expressions may arise as a consequence of attentional difficulties following TBI.^{22, 23} Furthermore, the absence of significant differences between groups for perceptual integration of facial features also corroborates prior behavioral findings showing an absence of facial perception disorder following TBI, and that the latter does not appear to be at the basis of impairments in emotional recognition from facial expressions.¹⁰

Although neural processing deficits observed in the early attentional stage following TBI are irrespective of facial emotion expression, they appear to specifically impede fearful facial expressions processing at a higher-level emotional discrimination stage. This limited impact could be explained by the possibility that fear overloads TBI individuals' attentional resources, more than those related to other emotions, thus negatively affecting subsequent fearful facial expressions processing as well as discrimination between emotional categories. Indeed, fear involves more facial features (e.g. raised forehead and eyebrows, open mouth, open eyes) to pay attention and to process, as compared to neutrality or happiness (i.e. smile). Some studies have also demonstrated that even in healthy individuals, attentional load reduces facilitated processing of threatening faces during more elaborate cognitive stages,⁴⁸ and reduces activation of brain areas associated with fear processing, such as fusiform gyri.⁴⁹

This exclusive alteration for fearful facial expressions at a higher cognitive processing level is consistent with previous work suggesting impairments in negative emotional, especially fearful, recognition from facial expressions following TBI.³⁻¹⁰ Nevertheless, prior studies showed impairments after more severe TBI than in the present study. Indeed, most of our participants had sustained an uncomplicated mild TBI. This study thus suggests that alterations in fearful processing from facial expressions may arise even after an uncomplicated mild TBI, and adds evidence supporting ERPs as a sensitive technique to detect neurofunctional changes following mild brain injuries.^{26, 27} Besides, as cognitive functioning can depend on brain injury severity and lesion site,^{50, 51} greater impact on later stages of processing as well as specific deficits in perceptual integration of facial features could be expected following a more severe TBI in light of the pathophysiological injury mechanisms involved and depending on the presence of localized lesions in areas of the brain involved in

facial emotion processing. These aspects should be the object of further well-controlled studies.

Future studies should also include measures of the functional impacts of reduced fearful facial expressions processing after a TBI according to injury severity. As fear is typically prioritised for attention because of its biological indicator of potential danger and survival value,³⁷ reduced processing ability of fearful facial expressions in adults with TBI might lead to a poor perception of threatening situations and to more risk-taking behavior, an aspects that exceeds the scope of the present study but which should be investigated.

Conclusions

This original study is the first systematic exploration of the temporal sequence of neural processing underlying emotional recognition from facial expressions in adults having sustained a TBI as compared to healthy individuals. The present findings indicate that reduced early attentional processing following TBI appear to impede higher-level cognitive stages enabling discrimination of fearful facial expressions. Our results thus suggest that impairments reported in prior behavioral studies of emotional recognition from facial expressions may arise as a consequence of reduced early attentional processing following TBI. Moreover, this study adds evidence supporting ERPs as a sensitive technique to detect subtle neurofunctional changes in emotional processing after milder TBI and contributes to further improving our comprehension of emotional recognition following TBI, with eventual implications for intervention and remediation strategies.

Acknowledgments

This study was supported by: the National Science and Engineering Research Council of Canada and the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau (grants to M.M.), a Canada Research Chair (to I.P.), the Fonds de recherche du Québec-Santé and the Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de Montréal (scholarships to J.D.). We are also grateful to the Centre de réadaptation Lucie-Bruneau for their help with recruitment of TBI participants. We thank Nicolas Robitaille, Thomas Romeas and Nathalie Bouloute for technical assistance, as well as the participants who took part in our study.

Authors Disclosure Statement

No competing financial interests exist.

REFERENCES

1. deGuise, E., leBlanc, J., Feyz, M., Meyer, K., Duplantie, J., Thomas, H., Abouassaly, M., Champoux, M. C., Couturier, C., Lin, H., Lu, L., Robinson, C., and Roger, E. (2008). Long-term outcome after severe traumatic brain injury: the McGill interdisciplinary prospective study. *J Head Trauma Rehabil* 23(5), 294–303.
2. Temkin, N. R., Corrigan, J. D., Dikmen, S. S., and Machamer, J. (2009). Social functioning after traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil* 24(6), 460-467.
3. Milders, M., Ietswaart, M., Crawford, J. R., and Currie, D. (2008). Social behavior following traumatic brain injury and its association with emotion recognition, understanding of intentions, and cognitive flexibility. *J Int Neuropsychol Soc* 14, 318-326.
4. Knox, L., and Douglas, J. (2009). Long-term ability to interpret facial expression after traumatic brain injury and its relation to social integration. *Brain Cogn* 69, 442-449.
5. Spikman, J. M., Milders, M. V., Visser-Keizer, A. C., Westerhof-Evers, H. J., Herben-Dekker, M., and 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. doi:10.1371/journal.pone.0065581.
6. Callahan, B. L., Ueda, K., Sakata, D., Plamondon, A., and Murai, T. (2011). Liberal bias mediates emotion recognition deficits in frontal traumatic brain injury. *Brain Cogn* 77(3), 412–418.
7. Babbage, D. R., Yim, J., Zupan, B., Neumann, D., Tomita, M. R., and Willer, B. (2011). Meta-analysis of facial affect recognition difficulties after traumatic brain injury. *Neuropsychology* 25(3), 277–285.

8. Ietswaart, M., Milders, M., Crawford, J. R., Currie, D., and Scott, C. L. (2008). Longitudinal aspects of emotion recognition in patients with traumatic brain injury. *Neuropsychologia* 46(1), 148–159.
9. Zupan, B., Babbage, D., Neumann, D., and Willer, B. (2014). Recognition of facial and vocal affect following traumatic brain injury. *Brain Inj* 28(8), 1087–1095.
10. Drapeau, J., Gosselin, N., Peretz, I., and McKerral, M. (in revision). Emotional recognition from dynamic facial, vocal and musical expressions following traumatic brain injury. *Brain Inj*.
11. Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Curr Opin Neurobiol* 12(2), 169-177.
12. Phillips, M. L., Drevets, W. C., Rauch, S. L., and Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: the neural basis of normal emotion perception. *Br J Psychiatry* 54, 504-514.
13. Fusar-Poli, P., Placentino, A., Carletti, F., Landi, P., Allen, P., Surguladze, S., and Politi, P. (2009). Functional atlas of emotional faces processing: a voxel-based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies. *J Psychiatry Neurosci* 34(6), 418–432.
14. Bigler, E. D. (2011). Structural imaging, in: *Textbook of traumatic brain injury, second edition*. J. M. Silver, T. W. MacAllister, and S. C. Yudofsky (eds). American Psychiatric Publishing: Arlington, pps. 73-91.
15. Eierud, C., Craddock, R. C., Fletcher, S., Aulakh, M., King-Casas, B., Kuehl, D., and LaConte, S.M. (2014). Neuroimaging after mild traumatic brain injury: review and meta-analysis. *Neuroimage* 4, 283-294.

16. Gosselin, N., Peretz, I., Hasboun, D., Baulac, M., and Samson, S. (2011). Impaired recognition of musical emotions and facial expressions following anteromedial temporal lobe excision. *Cortex* 47(9), 1116-1125.
17. Vandekerckhove, M., Plessers, M., Van Mieghem, A., Beeckmans, K., Van Acker, F., Maex, R., Markowitsch, H., Mariën, P., and Overwalle, F. (2014). Impaired facial emotion recognition in patients with ventromedial prefrontal hypoperfusion. *Neuropsychology* 28(4), 605–612.
18. Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., and Damasio, A. R. (1994). Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala. *Nature* 372(6507), 669-672.
19. Neumann, D., McDonald, B. C., West, J., Keiski, M. A., and Wang, Y. (2015). Neurobiological mechanisms associated with facial affect recognition deficits after traumatic brain injury. *Brain Imaging Behav.* <http://doi.org/10.1007/s11682-015-9415-3>
20. Genova, H. M., Rajagopalan, V., Chiaravalloti, N., Binder, A., Deluca, J., and Lengenfelder, J. (2015). Facial affect recognition linked to damage in specific white matter tracts in traumatic brain injury. *Soc Neurosci* 10(1), 27–34.
21. Rosenberg, H., Dethier, M., Kessels, R. P. C., Westbrook, R. F., and McDonald, S. (2015). 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.
22. Mancuso, M., Magnani, N., Cantagallo, A., Rossi, G., Capitani, D., Galletti, V., and Robertson, I. H. (2015). Emotion recognition impairment in traumatic brain injury

- compared with schizophrenia spectrum: similar deficits with different origins. *J Nerv Ment Dis* 203(2), 87–95.
23. Yim, J., Babbage, D. R., Zupan, B., Neumann, D., and Willer, B. (2013). The relationship between facial affect recognition and cognitive functioning after traumatic brain injury. *Brain Inj* 27(10), 1155–1161.
 24. Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H., and Polich, J. (2008). Affective picture processing: an integrative review of ERP findings. *Biol Psychol* 77(3), 247–265.
 25. Hajcak, G., Weinberg, A., MacNamara, A., and Foti, D. (2012). ERPs and the study of emotion, in: *The oxford handbook of event-related potential components*. E. S. Kappenman, and S. L. Luck (eds). Oxford University Press: New York, pps. 441-472.
 26. Lachapelle, J., Bolduc-Teasdale, J., Ptito, A., and McKerral, M. (2008). Deficits in complex visual information processing after mild TBI: electrophysiological markers and vocational outcome prognosis. *Brain Inj* 22(3), 265–274.
 27. Gosselin, N., Bottari, C., Chen, J.-K., Huntgeburth, S. C., De Beaumont, L., Petrides, M., and Ptito, A. (2012). Evaluating the cognitive consequences of mild traumatic brain injury and concussion by using electrophysiology. *Neurosurg Focus* 33(6), E7: 1–7. <http://doi.org/10.3171/2012.10.FOCUS12253>
 28. Vogel, E. K., and Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology* 37(02), 190–203.
 29. Hinojosa, J. A., Mercado, F., and Carretié, L. (2015). N170 sensitivity to facial expression: A meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 55, 498–509.
 30. Folstein, J. R., and Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology* 45(1), 152–170.

31. Luck, S. J. (2014). A closer look at ERPs and ERP components, in: *An introduction to the event-related potential technique, second edition*. S. J. Luck (eds). The MIT Press: Cambridge, pps 35-70.
32. Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N.-Y., and Luo, Y.-J. (2010). Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial visual presentation. *Neuroimage* 49(2), 1857–1867.
33. Zhang, D., Luo, W., and Luo, Y. (2013). Single-trial ERP analysis reveals facial expression category in a three-stage scheme. *Brain Res* 1512, 78–88.
34. Foti, D., Hajcak, G., and Dien, J. (2009). Differentiating neural responses to emotional pictures: evidence from temporal-spatial PCA. *Psychophysiology* 46(3), 521–530.
35. Blau, V. C., Maurer, U., Tottenham, N., and McCandliss, B. D. (2007). The face-specific N170 component is modulated by emotional facial expression. *Behav Brain Funct* 3, 7.
36. Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., and Nelson, C. A. (2007). An ERP Study of Emotional Face Processing in the Adult and Infant Brain. *Child Development* 78(1), 232–245.
37. LeDoux, J. E. (1996). *The Emotional Brain: The Mysterious Underpinnings of Emotional Life*. Simon & Schuster Paperbacks: New York.
38. Schupp, H. T., Schmälzle, R., and Flaisch, T. (2014). Explicit semantic stimulus categorization interferes with implicit emotion processing. *Soc Cogn Affect Neurosci* 9(11), 1738–1745.
39. Lew, H. L., Poole, J. H., Chiang, J. Y. P., Lee, E. H., Date, E. S., and Warden, D. (2005). Event-related potential in facial affect recognition: potential clinical utility in patients with traumatic brain injury. *J Rehabil Res Dev* 42(1), 29–34.

40. Dockree, P. M., and Robertson, I. H. (2011). Electrophysiological markers of cognitive deficits in traumatic brain injury: A review. *Int J Psychophysiol* 82(1), 53–60.
41. Arlinghaus, K. A., Pastorek, N. J., and Graham, D. P. (2011). Neuropsychiatric assessment, in: *Textbook of traumatic brain injury, second edition*. J. M. Silver, T. W. MacAllister, and S. C. Yudofsky (eds). American Psychiatric Publishing: Arlington, pps. 55-73.
42. Iverson, G. L., and Lange, R. T. (2011). Concussion versus mild traumatic brain injury: is there a difference?, in: *Manual of traumatic brain injury management*. F. S. Zollman (ed). Demos medial publishing: New York, pps 43-51.
43. Wechsler, D. (1997). *Wechsler adult intelligence scale-third edition (WAIS-III)*. Psychological Corporation: San Antonio.
44. Lovell, M. R., Iverson, G. L., and Collins, M. W. (2006). Measurement of symptoms following sports-related concussion: reliability and normative data for the post-concussion scale. *Appl neuropsychol* 13(3), 166-174.
45. Beck, A. T., Steer, R. A., and Brown, G. K. (2013). *Manual for the Beck Depression Inventory-II*. Psychological Corporation: San Antonio.
46. Roy, S., Roy, C., Éthier-Majcher, C., Fortin, I., Belin, P., and Gosselin, F. STOIC: A database of dynamic and static faces expressing highly recognizable emotions. http://www.mapageweb.umontreal.ca/gosselif/sroyetal_sub.pdf
47. Jasper, H. H. (1958). The ten twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography Clin Neurophysiol* 10, 371-375.
48. Van Dillen, L. F., and Derks, B. (2012). Working memory load reduces facilitated processing of threatening faces: An ERP study. *Emotion* 12(6), 1340–1349.

49. Pessoa, L., McKenna, M., Gutierrez, E., and Ungerleider, L. G. (2002). Neural processing of emotional faces requires attention. *Proc Natl Acad Sci* 99(17), 11458–11463.
50. Lange, R. T, Iverson, G. L., and Franzen, M. D. (2009). Neuropsychological functioning following complicated vs. uncomplicated mild traumatic brain injury. *Brain Inj* 23(2), 83-91.
51. Carlozzi, N. E., Kirsch, N. L., Kisala, P. A., and Tulskey, D. S. (2015). An examination of the Wechsler Adult Intelligence Scales, Fourth Edition (WAIS-IV) in individuals with complicated mild, moderate and severe traumatic brain injury (TBI). *Clin Neuropsychol* 29(1), 21-37.

TABLES

Table 1. Demographic and clinical characteristics of the participants. Means (and standard deviations) for age, years of education, intellectual functioning index (verbal IQ and performance IQ of WAIS-III), Glasgow Coma Scale (GCS) scores, time post-TBI, post-concussion symptoms scores and Beck Depression Inventory-II (BDI-II) scores.

Characteristics	Controls (n = 11)	TBI (n = 14)
Age	32.6 (7.9)	36.5 (10.5)
Gender (women/men)	5/6	10/4
Education (years)	15.8 (2.4)	14.8 (3.3)
Verbal IQ	105.9 (7.7)	102.3 (7.8)
Performance IQ	118.6 (7.8)	110.8 (12.4)
GCS scores	-	13.4 (3)
Time post-TBI (months)	-	16.9 (11.3)
Post-concussion symptoms scores	6.7 (7.4)	21.4 (16.3)*
BDI-II scores	2.6 (2.9)	11 (8.5)**

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

FIGURE LEGENDS

Figure 1. Examples of visual stimuli; 1) fearful facial expressions, 2) neutral facial expressions, 3) happy facial expressions, 4) butterflies.

Figure 2. Example of the task.

Figure 3. N1 responses at FCz electrode site, a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Figure 4. N170 responses at P9 electrode site (left hemisphere) and P10 electrode site (right hemisphere) a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Figure 5. N2 responses at Fz electrodes site, a) within-subjects and b) between-subjects, according to emotional expressions (fear, neutrality, happiness).

Figure 1



Figure 2

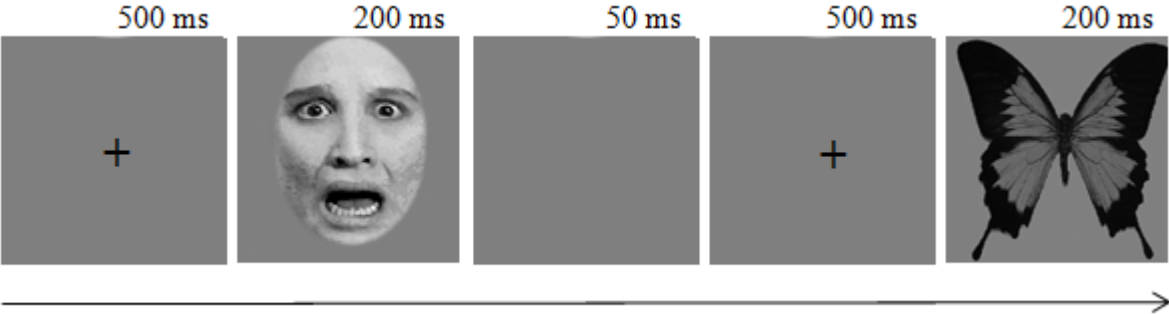


Figure 3

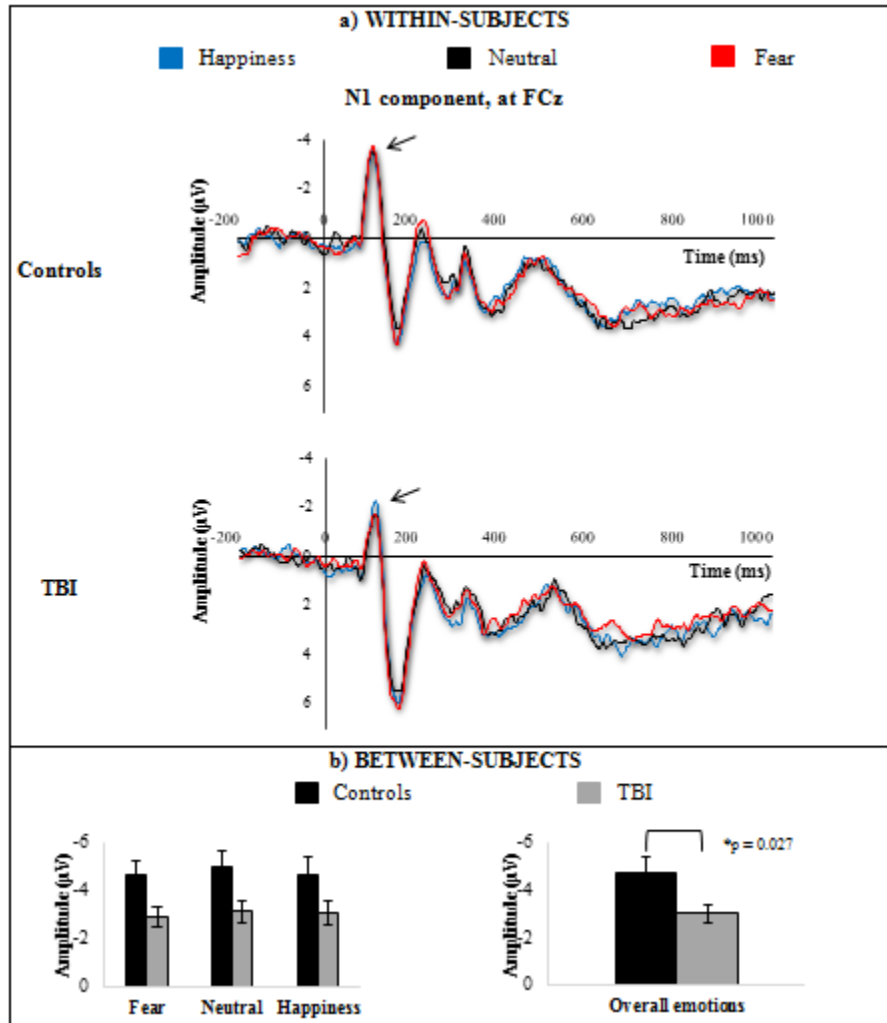


Figure 4

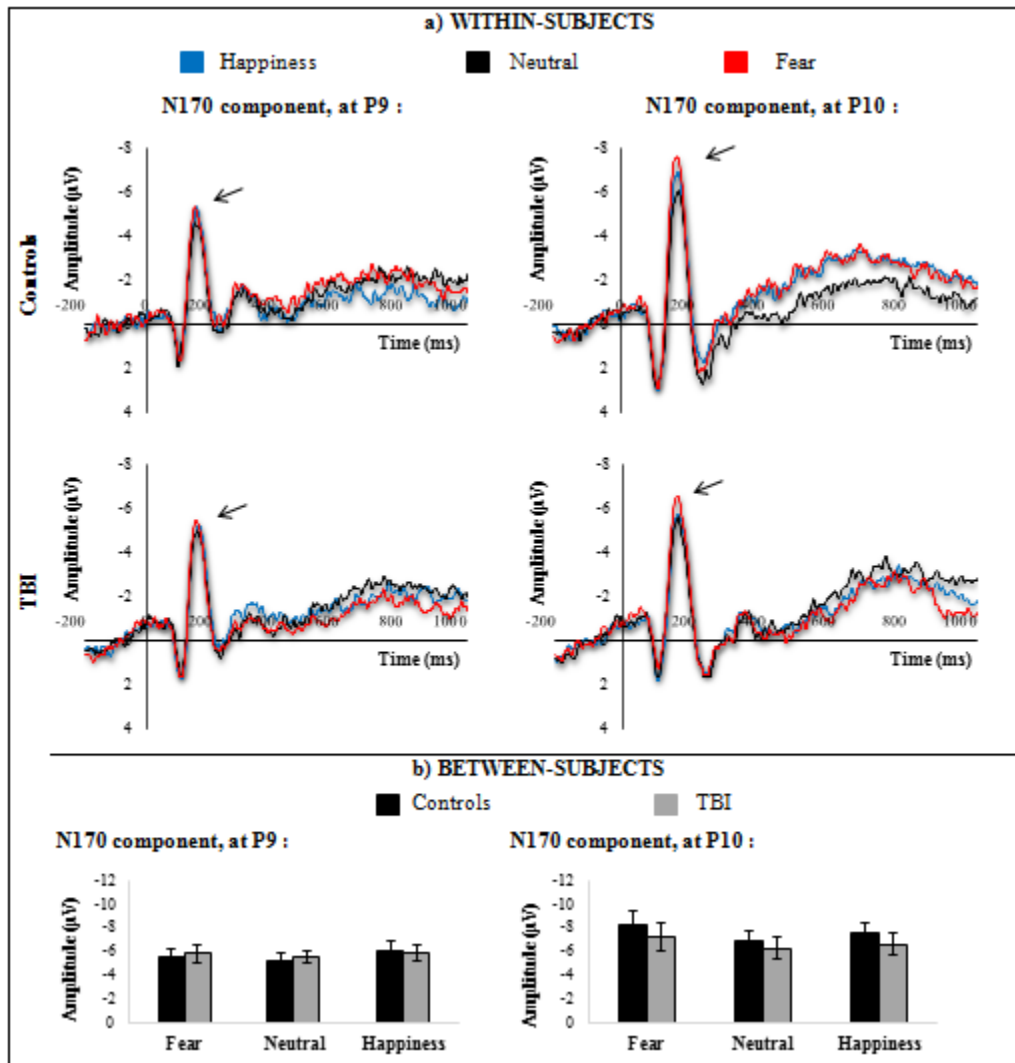
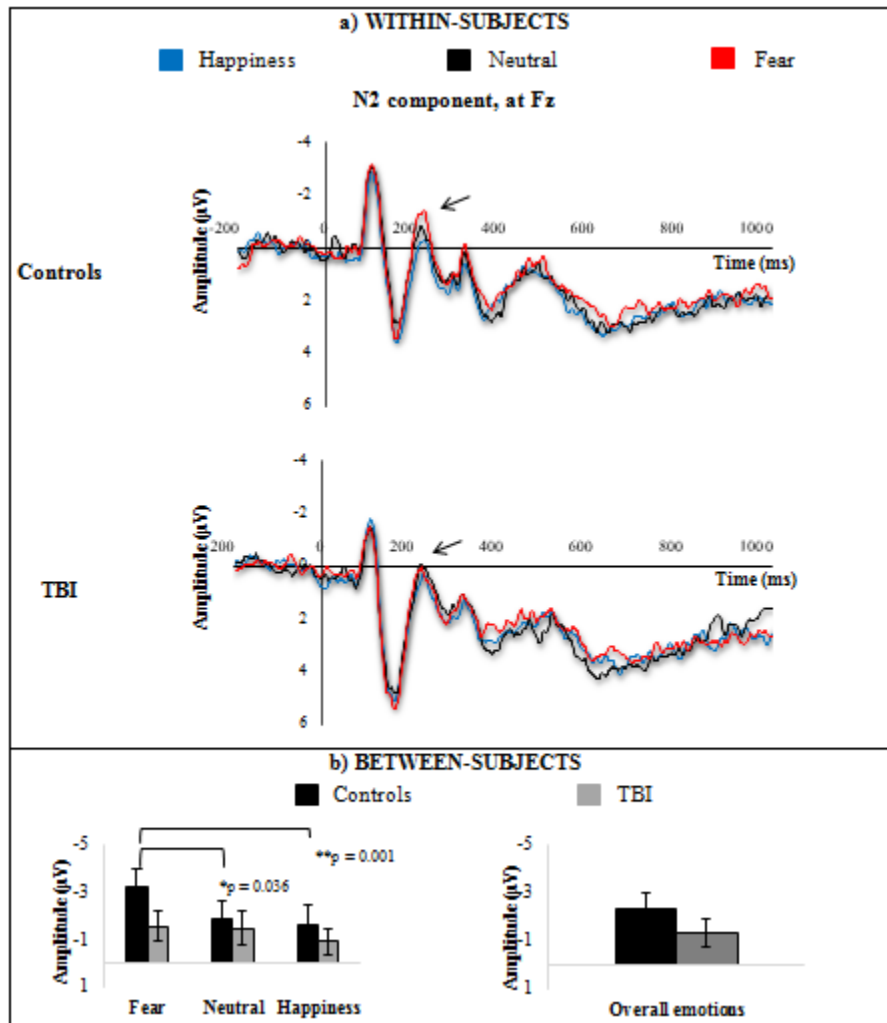


Figure 5



Chapitre 3. Discussion

3.1 Rappel des objectifs

L'objectif principal de la présente thèse était d'étoffer, par le biais de deux études expérimentales originales, les connaissances actuelles portant sur le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales auprès de personnes adultes ayant subi un TCC en comparaison avec des personnes adultes sans TCC. Plus spécifiquement, la première étude visait à 1- déterminer si la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales chez les personnes ayant subi un TCC de divers niveaux de gravité (léger simple versus léger complexe versus modéré-sévère) diffère de celle des personnes sans TCC, et 2- identifier s'il existe une relation entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les trois médiums de communication (expressions faciales, vocales et musicales). La deuxième étude visait à mesurer la séquence chronologique du traitement neuronal (PÉ précoces et plus tardifs) en réponse aux émotions évoquées par les expressions faciales chez les personnes ayant subi un TCC comparativement aux personnes sans TCC.

3.2 Sommaire des résultats

3.2.1 Étude 1

Les résultats de la première étude suggèrent un déficit de la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales dynamiques chez les adultes ayant subi un TCC modéré-sévère et un TCC léger complexe, comparativement à des adultes ayant subi un TCC léger simple et des personnes sans TCC. Les personnes ayant subi un TCC léger simple et les

personnes sans TCC ont performé de manière similaire aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales. Les analyses corrélationnelles confirment par ailleurs que le niveau de gravité de l'accident des personnes ayant subi un TCC (score sur l'échelle de coma de Glasgow) a une influence sur la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales. Ces données ne sont pas expliquées par un trouble de la perception des caractéristiques faciales à la suite d'un TCC, tel que suggéré par les performances aux tâches contrôles qui sont équivalentes entre les groupes. Aucune différence significative n'a également été trouvée entre les groupes pour ce qui est des jugements de valence et d'intensité des émotions évoquées par les expressions faciales. De plus, les résultats montrent que la reconnaissance des émotions ainsi que les jugements de valence et d'intensité évoquées par les expressions vocales et musicales sont préservés chez les participants ayant subi un TCC, indépendamment du niveau de gravité. Enfin, malgré une dissociation observée entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les modalités visuelle et auditive, aucune corrélation n'a été trouvée pour ce qui est de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales et musicales.

3.2.2 Étude 2

Les résultats indiquent que les PÉ au stade attentionnel précoce (composante N1) sont diminués lors de la présentation d'expressions faciales, indépendamment de l'émotion, chez les adultes ayant subi un TCC, majoritairement de gravité légère simple, comparativement aux personnes sans TCC, et ce, même si les participants ont montré une bonne capacité à rester concentrés sur la tâche, tel que suggéré par les résultats à la condition contrôle (détection de papillons parmi les expressions faciales). Les résultats révèlent également l'absence de

différence statistique entre les groupes en ce qui concerne le stade perceptuel des caractéristiques du visage (composante N170); tous les participants ont montré des PÉ amplifiés pour les expressions faciales émotionnelles (peur, joie) comparativement aux expressions faciales neutres, particulièrement dans l'hémisphère droit. De plus, dans le stade cognitif de plus haut niveau permettant la catégorisation d'émotions (composante N2), les personnes sans TCC ont montré un traitement préférentiel automatique (c.-à-d. amplitude augmentée des PÉ) pour les expressions faciales de peur comparativement aux expressions joyeuses et neutres, contrairement aux personnes ayant subi un TCC, ces derniers ne montrant aucune différence dans le traitement neuronal tardif selon l'émotion. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent des changements neurofonctionnels post-TCC qui débutent dès la première étape du traitement neuronal, c'est-à-dire au stade attentionnel initial, lors de la présentation d'expressions faciales émotionnelles. Ces altérations dans le traitement attentionnel précoce chez les personnes ayant subi un TCC semblent par la suite amenuiser le traitement neuronal plus élaboré qui permet de discriminer la peur évoquée par les expressions faciales.

3.3 Interprétation des résultats en lien avec la littérature

3.3.1 Traitement des émotions à la suite d'un TCC: origine des déficits

Les différences significatives suggérées dans les deux études pour le traitement des émotions, particulièrement la peur, évoquées par les expressions faciales chez les personnes ayant subi un TCC, comparativement aux personnes sans TCC, sont compatibles avec les études comportementales antérieures ayant rapporté de tels déficits à la suite d'un TCC (Babbage et al., 2011 ; Callahan, Ueda, Sakata, Plamondon & Murai, 2011; Spikman et al.,

2013; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014). Les résultats des deux études permettent également de constater que les différences significatives pour le traitement de la peur évoquée par les expressions faciales entre les personnes ayant subi un TCC et les personnes sans TCC ne sont pas expliquées par un trouble à percevoir les caractéristiques faciales. Les résultats de la deuxième étude en EEG ont néanmoins montré que les changements neurofonctionnels lors de la présentation d'expressions faciales émotionnelles à la suite d'un TCC débutent dès la première étape du traitement neuronal, c'est-à-dire au stade attentionnel initial. Ceci suggère que les difficultés dans le traitement de la peur évoquée par les expressions faciales semblent être secondaires aux altérations attentionnelles précoces à la suite d'un TCC, ce qui corrobore dans une certaine mesure les données d'études antérieures révélant des corrélations entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions et les résultats aux tests attentionnels (Yim, 2013; Mancuso et al, 2015).

Malgré que des déficits dans la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales aient été observés chez les adultes ayant subi un TCC modéré-sévère et un TCC léger complexe comparativement aux personnes sans TCC dans la première étude, les jugements de valence et d'intensité n'ont pas différé entre les groupes. Ces résultats sont contraires à l'étude de Gosselin, Peretz, Hasboun, Baulac et Samson (2011) qui suggère que les personnes qui ont des difficultés à identifier la peur évoquée par les expressions faciales à la suite de lésions au lobe temporal, la jugent également comme moins intense. Toutefois, d'autres auteurs (Callahan, Ueda, Sakata, Plamondon & Murai, 2011) soulignent que les personnes ayant subi des lésions frontales à la suite d'un TCC ont tendance à percevoir les émotions (peur, tristesse, dégoût, surprise) évoquées par les expressions faciales comme étant plus intenses, même si

celles-ci ne sont pas correctement identifiées. Il est à noter que seize de nos participants dans la première étude (sur 19) présentaient des atteintes frontales.

Les déficits dans la reconnaissance d'émotions à la suite d'un TCC s'avèrent par ailleurs limités à la modalité visuelle. Effectivement, aucune différence significative n'a été démontrée entre les groupes de participants ayant subi un TCC et les personnes sans TCC, pour la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques et musicales. Une telle dissociation entre les modalités visuelle et auditive est compatible avec des études antérieures qui révèlent que la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales est significativement plus altérée que celle des expressions vocales (Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014).

Nonobstant une telle dissociation entre les modalités visuelle et auditive dans les études antérieures, des déficits de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales à la suite d'un TCC ont tout de même été rapportés (Dimoska, McDonald, Pell, Tate & James, 2010; Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; McDonald & Saunders, 2005; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie; 2008; Spell & Frank, 2000; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014), contrairement aux résultats de la première étude de cette thèse. Cette divergence de résultats est très probablement expliquée par la nature des tâches utilisées. Rappelons que l'ensemble des études antérieures ayant examiné la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales ont utilisé des stimuli prosodiques affectifs avec un contenu verbal sémantique neutre ou dénué de sens (Dimoska, McDonald, Pell, Tate & James, 2010; Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; McDonald & Saunders,

2005; Milders, Ietswaart, Crawford & Currie; 2008; Spell & Frank, 2000; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014), qui sont plus exigeants sur le plan attentionnel que les expressions vocales non linguistiques, puisqu'ils requièrent la capacité à inhiber la tendance naturelle à traiter le contenu sémantique de la phrase en concordance avec l'intonation émotionnelle de la voix. La reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques (versus les expressions prosodiques) est donc possiblement plus aisée à la suite d'un TCC. Par ailleurs, même chez des personnes sans trouble neurologique, les émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques sont plus faciles à reconnaître que les émotions évoquées par la prosodie affective (Hawk, van Kleef, Fischer & van der Schalk, 2009). Des travaux récents ont également suggéré que les expressions vocales non linguistiques de peur (c.-à-d. les cris) ont une fonction acoustique privilégiée sur la prosodie affective, en raison de leur caractère dissonant et rude (« *rough* »), et activeraient l'amygdale de manière plus importante (Arnal, Flinker, Kleinschmidt, Giraud & Poeppel, 2015).

L'absence de déficit dans la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales et musicales comparativement à la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales n'est sans contredit pas expliquée par un manque de sensibilité des tâches, puisque des difficultés ont déjà été montrées chez des patients présentant des lésions cérébrales, par le biais des mêmes stimuli (Dellacherie, Hasboun, Baulac, Belin & Samson, 2011; Gosselin et al., 2005; Gosselin, Peretz, Hasboun, Baulac & Samson, 2011; Gosselin, Peretz, Johnsen & Adolphs, 2007). Toutefois, il est possible que les tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les trois médiums de communication ne soient pas équivalentes en termes de difficulté ou de charge attentionnelle.

Effectivement, il est suggéré que les expressions vocales non linguistiques détiennent plusieurs avantages comparativement aux expressions faciales, chez des personnes sans trouble neurologique (Hawk, van Kleef, Fischer & van der Schalk, 2009). Les émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques sont plus faciles à reconnaître et plus efficaces pour attirer l'attention que les expressions faciales, puisque d'un point de vue adaptatif, elles ne nécessitent pas de contact visuel et peuvent rejoindre plusieurs individus dispersés sur un large territoire (Hawk, van Kleef, Fischer & van der Schalk, 2009). De plus, pour des raisons davantage méthodologiques, la tâche de reconnaissance des émotions évoquées par les expressions musicales a pu être plus facile que la tâche de reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales et, dans une certaine mesure, celle de reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales puisque les participants devaient sélectionner l'émotion qui correspondait le mieux au stimulus parmi quatre choix d'émotions, plutôt que six choix d'émotions. Par conséquent, plus d'erreurs pouvaient se produire lors de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions faciales et vocales. D'ailleurs, ces différences méthodologiques entre les tâches (quatre choix d'émotions versus six choix d'émotions) peuvent aussi expliquer le fait qu'aucune corrélation n'ait été trouvée comme prévu entre les performances aux tâches de reconnaissance des émotions évoquées par les expressions vocales et musicales, malgré une dissociation entre les modalités visuelle et auditive.

3.3.2 La peur: un déficit isolé?

Puisque le traitement de la peur évoquée par les expressions faciales s'est avéré essentiellement diminué chez les personnes ayant subi un TCC dans les deux études

empiriques de cette thèse, ces résultats soulèvent comme questionnement : est-ce que le traitement de la peur est un déficit isolé à la suite d'un TCC?

La majorité des études comportementales soutiennent que les personnes ayant subi un TCC présentent des déficits plus importants dans la reconnaissance des émotions négatives, notamment la peur, comparativement aux personnes sans TCC (Babbage et al., 2011 ; Callahan, Ueda, Sakata, Plamondon & Murai, 2011; Spikman et al., 2013; Zupan, Babbage, Neumann & Willer, 2014). Néanmoins, certains auteurs ont récemment trouvé que lorsque les variables de complexité des expressions faciales émotionnelles sont contrôlées (p. ex. analyses selon l'intensité de l'expression), les personnes ayant subi un TCC présentent un déficit global dans la reconnaissance de toutes les catégories d'émotions plutôt qu'un déficit spécifique dans la reconnaissance de la peur (Rapcsak et al., 2000; Rosenberg et al., 2015; Rosenberg, McDonald, Dethier, Kessels & Westbrook, 2014). Ces derniers rapportent de plus qu'il est vrai que la reconnaissance des émotions négatives, telles que la peur, demeure plus difficile que la reconnaissance des émotions positives, mais ce, chez tous les individus, même sans atteinte cérébrale. Pourtant, chez une personne sans trouble neurologique, la peur est censée être reconnue plus efficacement et rapidement, en raison de sa saillance sur les plans évolutif et comportemental (Ledoux, 1996). Une explication possible aux difficultés plus marquées pour la peur, et ce, pour tous les participants, est que la peur est largement confondue avec la surprise dans un grand nombre d'études comportementales (Ietswaart, Milders, Crawford, Currie & Scott, 2008; Rosenberg et al., 2015; Rosenberg, McDonald, Dethier, Kessels & Westbrook, 2014). En effet, ces deux émotions partagent plusieurs caractéristiques faciales semblables, telles que le front et les sourcils soulevés, la bouche légèrement ouverte et les yeux écarquillés.

Les études en EEG offrent toutefois l'avantage de mesurer l'activité cérébrale lors de la présentation d'expressions émotionnelles sans qu'une réponse de la part du participant ne soit nécessaire, et donc, sans que des confusions entre les émotions ne soient enregistrées. Dans la deuxième étude de cette thèse, on remarque que, dans le stade cognitif de plus haut niveau, les personnes sans TCC traitent préférentiellement la peur comparativement aux autres émotions, ce qui n'est pas le cas pour les personnes ayant subi un TCC, ces derniers ne montrant aucune différence dans le traitement neuronal selon l'émotion. En effet, à la suite d'un TCC, les changements neuronaux observés indépendamment de l'émotion dans le stade attentionnel précoce amenuisent exclusivement le traitement préférentiel de la peur évoquée par les expressions faciales dans le stade cognitif plus tardif. Ce résultat est compatible avec des études antérieures qui ont démontré qu'une surcharge attentionnelle chez des personnes sans trouble neurologique compromet le traitement neuronal préférentiel des stimuli menaçants dans les stades tardifs (Van Dillen & Derks, 2012). La deuxième étude de cette thèse apporte donc, par le biais de l'EEG, des données supplémentaires au profit de déficits plus importants du traitement de la peur évoquée par les expressions faciales à la suite d'un TCC, en raison d'une charge attentionnelle possiblement trop élevée pour la traiter de manière préférentielle.

Outre les raisons attentionnelles, il ne faut pas exclure que la localisation précise de certaines lésions cérébrales à la suite d'un TCC puisse amener des déficits limités dans la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales. En effet, des atteintes circonscrites au lobe préfrontal ventromédian et au lobe temporal, incluant l'amygdale, peuvent entraîner des déficits dans la reconnaissance de la peur évoquée par les expressions faciales (Adolphs, Tranel, Damasio & Damasio, 1994, 1995; Gosselin, Peretz, Hasboun,

Baulac & Samson, 2011; Vandekerckhove et al., 2014). Toutefois, en raison de l'hétérogénéité des atteintes cérébrales des participants qui ont subi un TCC dans notre deuxième étude, il est difficile d'associer des déficits isolés de certaines catégories d'émotions avec la localisation précise de lésions cérébrales post-accident.

3.4 Retombées cliniques et directions futures

3.4.1 Importance de distinguer le niveau de gravité du TCC

Les deux études empiriques présentées dans cette thèse soulignent l'importance de distinguer les personnes ayant subi un TCC selon le niveau de gravité. Effectivement, la première étude représente la première exploration du traitement des émotions suggérant des différences entre les deux sous-groupes de TCC léger (simple ou complexe) au regard du traitement de la peur évoquée par les expressions faciales. La deuxième étude est également la première exploration du traitement neuronal des émotions évoquées par les expressions faciales auprès de personnes ayant subi un TCC majoritairement de gravité légère simple, et qui montre des changements neurofonctionnels comparativement aux personnes sans TCC. Les résultats des deux études empiriques bonifient donc les connaissances actuelles sur le traitement des émotions selon le niveau de gravité du TCC. Ces résultats sont par ailleurs compatibles avec les études antérieures qui portent sur le fonctionnement cognitif et qui rapportent que les atteintes cognitives varient en fonction du niveau de gravité du TCC (Arlinghaus, Pastorek, & Graham, 2011; Borgaro, Prigatano, Kwasnica & Rexer, 2003; Carlozzi, Kirsch, Kisala & Tulsy, 2015; Iverson, 2009; Lange, Iverson & Franzen, 2009; Lezak, 2012). D'autres études avec un plus grand échantillon de personnes ayant subi un TCC

de divers niveaux de gravité seraient nécessaires afin de répliquer nos résultats comportementaux et électrophysiologiques.

3.4.2 L'EEG, comme technique d'évaluation du traitement des émotions

La deuxième étude est l'une des premières explorations du traitement des émotions évoquées par les expressions faciales auprès de personnes ayant subi un TCC, à l'aide de l'EEG. Cette étude apporte des preuves supplémentaires comme quoi l'EEG, au-delà des méthodes comportementales, est une technique d'évaluation qui a plusieurs avantages dans l'exploration du traitement des émotions, et particulièrement auprès de personnes ayant subi un TCC :

1. L'EEG, en raison son excellente résolution temporelle, permet de cibler l'origine des déficits dans le traitement des émotions, en évaluant l'activité cérébrale liée aux différentes étapes du traitement neuronal (précoces et plus tardives).
2. L'EEG est nettement sensible pour identifier des altérations neurofonctionnelles dans le traitement des émotions, et ce, même à la suite d'un TCC léger simple.
3. L'EEG permet d'enregistrer de manière automatique le traitement préférentiel de certaines émotions, notamment la peur, sans qu'une réponse de la part du participant ne soit nécessaire.

Bien que l'EEG représente une technique d'évaluation avec plusieurs avantages dans l'étude du traitement des émotions, elle comporte malgré tout certains défis. En effet, il est encore possible que les émotions, notamment la peur, perdent leur statut spécial de saillance dans ce type d'expérimentations contrôlées :

“When I view the stimuli in an emotion ERP experiment and I see a dozen pictures containing snakes over a 10-min period, I don’t feel the kind of fear and revulsion that I experience when I encounter an actual snake while riding my mountain bike on a trail in the woods. My attention is oriented to the picture of the snake, and I realize that it’s something I’d rather not look at, but I don’t feel my heart pounding (in case you can’t tell, I really don’t like snakes).” (Luck, 2014, p. 106)

Les recherches futures en EEG portant sur le traitement des émotions pourraient utiliser des stimuli plus dynamiques, tel qu’il a été fait dans la première étude de cette thèse, afin d’être le plus représentatif possible de la réalité. La réalité virtuelle, de pair avec l’EEG, pourrait également être une avenue intéressante dans l’étude du traitement des émotions à la suite d’un TCC. Enfin, il serait avantageux d’examiner la séquence chronologique du traitement neuronal (étapes précoces et tardives) en réponse aux émotions évoquées par les expressions dynamiques vocales et musicales auprès des personnes ayant subi un TCC.

3.4.3 Impacts fonctionnels et interventions éventuelles

À la lumière des résultats obtenus dans les études présentées dans cette thèse, notamment les altérations plus marquées pour le traitement de la peur évoquées par les expressions faciales, les recherches futures devraient inclure des mesures de l’impact fonctionnel de tels déficits à la suite d’un TCC. Par exemple, une diminution de la reconnaissance de la peur pourrait conduire à une mauvaise perception des situations menaçantes et à des comportements à risque. De telles mesures de l’impact fonctionnel seraient aussi pertinentes selon le niveau de gravité du TCC et pourraient contribuer à

l'enrichissement des modèles d'intervention en ce qui a trait au traitement des émotions à la suite d'un TCC.

Un nombre grandissant d'études portant sur les interventions axées sur le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales a d'ailleurs émergé dans la dernière décennie (p. ex. Bornhofen & McDonald, 2008; Neumann, Babbage, Zupan & Willer, 2015; Radice-Neumann & Zupan, 2009) et celles-ci se sont montrées efficaces auprès de personnes ayant subi un TCC modéré à sévère. Par exemple, dans l'étude de Neumann, Babbage, Zupan et Willer (2015), l'intervention consistait à 1- porter attention aux caractéristiques faciales pertinentes et à les associer avec une émotion spécifique (p. ex. les sourcils sont inclinés au milieu + les paupières sont tombantes + les lèvres commencent à tirer vers le bas dans les coins = cette personne est triste), 2- accroître la conscience de ses propres émotions par l'introspection et l'imitation, pour mieux reconnaître les émotions d'autrui, et 3- développer une meilleure compréhension conceptuelle des émotions, en les associant à son expérience émotionnelle ou ses réactions physiologiques (p. ex. augmentation de la tension musculaire + rythme cardiaque qui s'accélère + papillons dans l'estomac + yeux grand ouverts + sourcils surélevés = expérience de peur). L'efficacité de ce type d'intervention peut par ailleurs appuyer, dans une certaine mesure, les résultats de la deuxième étude de cette thèse, qui suggèrent que les difficultés dans le traitement des émotions (la peur) semblent être secondaires aux altérations attentionnelles précoces à la suite d'un TCC. En effet, le fait d'entraîner les personnes ayant subi un TCC à porter attention aux caractéristiques faciales pertinentes facilite, du moins en partie, la reconnaissance des émotions (Neumann, Babbage, Zupan & Willer, 2015).

Enfin, la préservation de la reconnaissance des émotions évoquées par les expressions musicales suggérée dans la première étude de cette thèse, de pair avec les effets positifs de l'intervention musicale trouvés dans les études antérieures (Särkämö et al., 2008, 2010, 2012, 2013, 2014), pourrait encourager l'utilisation de l'intervention musicale visant à favoriser la récupération cognitive et l'amélioration de l'humeur auprès de personnes ayant subi un TCC.

3.5 Conclusion

L'objectif principal de la présente thèse était d'étoffer les connaissances actuelles portant sur le traitement des émotions évoquées par les expressions faciales, vocales et musicales auprès de personnes adultes ayant subi un TCC en comparaison avec des personnes adultes sans TCC. Pour ce faire, nous avons étudié, sur le plan comportemental, la reconnaissance des émotions de base (joie, tristesse, peur) évoquées par des expressions faciales dynamiques, vocales non linguistiques et musicales auprès de personnes ayant subi un TCC de divers niveaux de gravité. Nous avons ensuite exploré, sur le plan de l'EEG, la séquence chronologique du traitement neuronal (ondes précoces et tardives) pendant la présentation d'expressions faciales statiques évoquant la peur, la neutralité et la joie. À la lumière des résultats présentés et discutés, les apports scientifiques de cette thèse sont nombreux. Notamment, des déficits dans le traitement de la peur évoquée par les expressions faciales sont observés pour la première fois auprès de personnes ayant subi un TCC léger complexe, en plus des déficits obtenus chez les personnes ayant subi un TCC modéré-sévère. Des changements neurofonctionnels dans le traitement de la peur évoquée par les expressions faciales sont également trouvés chez un groupe de personnes ayant subi un TCC majoritairement de gravité légère simple. L'évaluation du traitement des émotions par le biais

de l'EEG a également permis de mieux saisir les origines des déficits du traitement des émotions évoquées par les expressions faciales à la suite d'un TCC, lesquels semblent secondaires à des altérations attentionnelles précoces. De plus, le traitement des émotions évoquées par les expressions vocales non linguistiques et musicales appert préservé à la suite d'un TCC, indépendamment du niveau de gravité. En somme, outre les apports scientifiques originaux et importants, les conclusions de cette thèse affinent notre compréhension du traitement des émotions à la suite d'un TCC et pourraient contribuer au développement éventuel d'interventions axées sur les émotions à la suite d'un TCC.

Bibliographie

- Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(2), 169–177.
- Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H., & Damasio, A. (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., & Damasio, A. R. (1995). Fear and the human amygdala. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *15*(9), 5879–5891.
- Ambadar, Z., Schooler, J. W., & Cohn, J. F. (2005). Deciphering the enigmatic face: the importance of facial dynamics in interpreting subtle facial expressions. *Psychological Science*, *16*(5), 403–410.
- Arlinghaus, K. A., Pastorek, N. J., & Graham, D. P. (2011). Neuropsychiatric assessment. In J. M. Silver, T. W. MacAllister, & S. C. Yudofsky (eds.), *Textbook of traumatic brain injury* (2nd edition, p. 55-73). Texas: American Psychiatric Publishing.
- Arnal, L. H., Flinker, A., Kleinschmidt, A., Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2015). Human Screams Occupy a Privileged Niche in the Communication Soundscape. *Current Biology*, *25*(15), 2051–2056.
- Aubé, W., Angulo-Perkins, A., Peretz, I., Concha, L., & Armony, J. L. (2015). Fear across the senses: brain responses to music, vocalizations and facial expressions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *10*(3), 399–407.

- Babbage, D. R., Yim, J., Zupan, B., Neumann, D., Tomita, M. R., & Willer, B. (2011). Meta-analysis of facial affect recognition difficulties after traumatic brain injury. *Neuropsychology, 25*(3), 277–285.
- Baker, F., & Tamplin, J. (2006). *Music Therapy Methods in Neurorehabilitation: a Clinician's Manual*. London and Philadelphia: Jessica Kingsley Publications.
- Belin, P., Fecteau, S., & Bédard, C. (2004). Thinking the voice: neural correlates of voice perception. *Trends in Cognitive Sciences, 8*(3), 129–135.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., & McCarthy, G. (1996). Electrophysiological Studies of Face Perception in Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience, 8*(6), 551–565.
- Bigler, E. D. (2011). Structural imaging. In J. M. Silver, T. W. MacAllister, & S. C. Yudofsky (eds.), *Textbook of traumatic brain injury* (2nd edition, p. 73-91). Texas: American Psychiatric Publishing.
- Blau, V. C., Maurer, U., Tottenham, N., & McCandliss, B. D. (2007). The face-specific N170 component is modulated by emotional facial expression. *Behavioral and Brain Functions, 3*, 7.
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudez, P., & Evans, A. C. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience, 2*(4), 382–387.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 98*(20), 11818–11823.

- Borgaro, S. R., Prigatano, G. P., Kwasnica, C., & Rexer, J. L. (2003). Cognitive and affective sequelae in complicated and uncomplicated mild traumatic brain injury. *Brain Injury, 17*(3), 189–198.
- Bornhofen, C., & McDonald, S. (2008). Emotion perception deficits following traumatic brain injury: a review of the evidence and rationale for intervention. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS, 14*(4), 511–525.
- Broglio, S. P., Moore, R. D., & Hillman, C. H. (2011). A history of sport-related concussion on event-related brain potential correlates of cognition. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology, 82*(1), 16–23.
- Callahan, B. L., Ueda, K., Sakata, D., Plamondon, A., & Murai, T. (2011). Liberal bias mediates emotion recognition deficits in frontal traumatic brain injury. *Brain and Cognition, 77*(3), 412–418.
- Carlozzi, N. E., Kirsch, N. L., Kisala, P. A., & Tulskey, D. S. (2015). An examination of the Wechsler Adult Intelligence Scales, Fourth Edition (WAIS-IV) in individuals with complicated mild, moderate and Severe traumatic brain injury (TBI). *The Clinical Neuropsychologist, 29*(1), 21–37.
- Dellacherie, D., Hasboun, D., Baulac, M., Belin, P., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of fear in voices and reduced anxiety after unilateral temporal lobe resection. *Neuropsychologia, 49*(4), 618–629.
- Dimoska, A., McDonald, S., Pell, M. C., Tate, R. L., & James, C. M. (2010). Recognizing vocal expressions of emotion in patients with social skills deficits following traumatic

- brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 16(2), 369–382.
- Dockree, P. M., & Robertson, I. H. (2011). Electrophysiological markers of cognitive deficits in traumatic brain injury: a review. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 82(1), 53–60.
- Eierud, C., Craddock, R. C., Fletcher, S., Aulakh, M., King-Casas, B., Kuehl, D., & LaConte, S. M. (2014). Neuroimaging after mild traumatic brain injury: Review and meta-analysis. *NeuroImage: Clinical*, 4, 283–294.
- Eimer, M., & Holmes, A. (2002). An ERP study on the time course of emotional face processing. *Neuroreport*, 13(4), 427–431.
- Elleberg, D., Henry, L. C., Macciocchi, S. N., Guskiewicz, K. M., & Broglio, S. P. (2009). Advances in sport concussion assessment: from behavioral to brain imaging measures. *Journal of Neurotrauma*, 26(12), 2365–2382.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology*, 45(1), 152–170.
- Foti, D., Hajcak, G., & Dien, J. (2009). Differentiating neural responses to emotional pictures: evidence from temporal-spatial PCA. *Psychophysiology*, 46(3), 521–530.
- Frühholz, S., & Grandjean, D. (2013). Multiple subregions in superior temporal cortex are differentially sensitive to vocal expressions: A quantitative meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(1), 24–35.
- Fusar-Poli, P., Placentino, A., Carletti, F., Landi, P., Allen, P., Surguladze, S., ... Politi, P. (2009). Functional atlas of emotional faces processing: a voxel-based meta-analysis of

- 105 functional magnetic resonance imaging studies. *Journal of Psychiatry & Neuroscience : JPN*, 34(6), 418–432.
- Genova, H. M., Rajagopalan, V., Chiaravalloti, N., Binder, A., Deluca, J., & Lengenfelder, J. (2015). Facial affect recognition linked to damage in specific white matter tracts in traumatic brain injury. *Social Neuroscience*, 10(1), 27–34.
- Gosselin, N., Bottari, C., Chen, J.-K., Huntgeburth, S. C., De Beaumont, L., Petrides, M., ... Ptito, A. (2012). Evaluating the cognitive consequences of mild traumatic brain injury and concussion by using electrophysiology. *Neurosurgical Focus*, 33(6), E7: 1–7.
- Gosselin, N., Peretz, I., Hasboun, D., Baulac, M., & Samson, S. (2011). Impaired recognition of musical emotions and facial expressions following anteromedial temporal lobe excision. *Cortex*, 47(9), 1116–1125.
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnsen, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia*, 45(2), 236–244.
- Gosselin, N., Peretz, I., Noulhiane, M., Hasboun, D., Beckett, C., Baulac, M., & Samson, S. (2005). Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain: A Journal of Neurology*, 128(Pt 3), 628–640.
- Hajcak, G., Weinberg, A., MacNamara, A., & Foti, D. (2012). ERPs and the study of emotion. In E. S. Kappenman, & S. L. Luck (eds.), *The oxford handbook of event-related potential components* (p. 441-472). New York: Oxford University Press.
- Hawk, S. T., van Kleef, G. A., Fischer, A. H., & van der Schalk, J. (2009). “Worth a thousand words”: absolute and relative decoding of nonlinguistic affect vocalizations. *Emotion (Washington, D.C.)*, 9(3), 293–305.

- Hinojosa, J. A., Mercado, F., & Carretié, L. (2015). N170 sensitivity to facial expression: A meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *55*, 498–509.
- Ietswaart, M., Milders, M., Crawford, J. R., Currie, D., & Scott, C. L. (2008). Longitudinal aspects of emotion recognition in patients with traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, *46*(1), 148–159.
- Iverson, G. L. (2006). Complicated vs uncomplicated mild traumatic brain injury: Acute neuropsychological outcome. *Brain Injury*, *20*(13-14), 1335–1344.
- Jasper, H. (1958). The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *10*, 371–375.
- Johnstone, T., van Reekum, C. M., Oakes, T. R., & Davidson, R. J. (2006). The voice of emotion: an fMRI study of neural responses to angry and happy vocal expressions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *1*(3), 242–249.
- Juslin, P. N., & Sloboda, J. A. (2001). *Music and Emotion: Theory and Research*. New York: Oxford University Press.
- Juslin, P. N., & Sloboda, J. A. (2010). *Handbook of Music and Emotion: Theory, Research, and Applications*. New York: Oxford University Press.
- Khalfa, S., Bella, S. D., Roy, M., Peretz, I., & Lupien, S. J. (2003). Effects of relaxing music on salivary cortisol level after psychological stress. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *999*, 374–376.
- Knab, A. M., & Lightfoot, J. T. (2010). Does the difference between physically active and couch potato lie in the dopamine system? *International Journal of Biological Sciences*, *6*(2), 133–150.

- Knox, L., & Douglas, J. (2009). Long-term ability to interpret facial expression after traumatic brain injury and its relation to social integration. *Brain and Cognition*, *69*(2), 442–449.
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(3), 170–180.
- Lachapelle, J., Bolduc-Teasdale, J., Ptito, A., & McKerral, M. (2008). Deficits in complex visual information processing after mild TBI: electrophysiological markers and vocational outcome prognosis. *Brain Injury*, *22*(3), 265–274.
- Lange, R. T., Iverson, G. L., & Franzen, M. D. (2009). Neuropsychological functioning following complicated vs. uncomplicated mild traumatic brain injury. *Brain Injury*, *23*(2), 83–91.
- LeDoux, J. E. (1996). *The Emotional Brain: The Mysterious Underpinnings of Emotional Life*. New York: Simon & Schuster Paperbacks.
- Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., & Nelson, C. A. (2007). An ERP Study of Emotional Face Processing in the Adult and Infant Brain. *Child Development*, *78*(1), 232–245.
- Lew, H. L., Poole, J. H., Chiang, J. Y. P., Lee, E. H., Date, E. S., & Warden, D. (2005). Event-related potential in facial affect recognition: potential clinical utility in patients with traumatic brain injury. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, *42*(1), 29–34.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Bigler, E. D. & Tranel, D. (2012). *Neuropsychological Assessment* (5th edition). New York: Oxford University Press.

- Lindquist, K. A., Wager, T. D., Kober, H., Bliss-Moreau, E., & Barrett, L. F. (2012). The brain basis of emotion: a meta-analytic review. *The Behavioral and Brain Sciences*, 35(3), 121–143.
- Luck, S. J. (2014). A closer look at ERPs and ERP components. In S. J. Luck (eds.), *An introduction to the event-related potential technique* (2nd edition, p. 35-70). Cambridge: The MIT Press.
- Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N.-Y., & Luo, Y.-J. (2010). Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial visual presentation. *NeuroImage*, 49(2), 1857–1867.
- Mancuso, M., Magnani, N., Cantagallo, A., Rossi, G., Capitani, D., Galletti, V., ... 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.
- McCrea, M., Janecek, J. K., Powell, M. R., & Hammeke, T. A. (2014). Traumatic brain injury and postconcussion syndrome. In M. W. Parsons, & T. A. Hammeke (eds.), *Clinical neuropsychology: a pocket handbook for assessment* (3rd edition). Washington DC: American Psychological Association.
- McCullagh, S., & Feinstein, A. (2011) Cognitive changes. In J. M. Silver, T. W. MacAllister, & S. C. Yudofsky (eds.), *Textbook of traumatic brain injury* (2nd edition, p. 279-295). Texas: American Psychiatric Publishing.
- McDonald, S., & Saunders, J. C. (2005). Differential impairment in recognition of emotion across different media in people with severe traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 11(4), 392–399.

- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *NeuroImage*, 28(1), 175–184.
- Milders, M., Ietswaart, M., Crawford, J. R., & 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: JINS*, 14(2), 318–326.
- Neumann, D., Babbage, D. R., Zupan, B., & Willer, B. (2015). A randomized controlled trial of emotion recognition training after traumatic brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 30(3), E12–23.
- Neumann, D., McDonald, B. C., West, J., Keiski, M. A., & Wang, Y. (2015). Neurobiological mechanisms associated with facial affect recognition deficits after traumatic brain injury. *Brain Imaging and Behavior*.
- Nieoullon, A. (2002). Dopamine and the regulation of cognition and attention. *Progress in Neurobiology*, 67(1), 53–83.
- Orientations ministérielles pour le traumatisme craniocérébral léger 2005-2010 (2005). *Gouvernement du Québec*. 134 p.
- Peretz, I. (2010). Towards a neurobiology of musical emotions. In P. N. Juslin, & J. Sloboda (eds.), *Handbook of Music and Emotion: Theory, research, applications* (p. 99–126). New York: Oxford University Press.
- Peretz, I., Aubé, W., & Armony, J. L. (2013). Towards a neurobiology of musical emotions. In E. Altenmüller, S. Schmidt, & E. Zimmermann (eds.), *Evolution of emotional communication: From sounds in nonhuman mammals to speech and music in man* (p. 277–299). New York: Oxford University Press.

- Phillips, M. L., Drevets, W. C., Rauch, S. L., & Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception. *Biological Psychiatry*, *54*(5), 504–514.
- Radice-Neumann, D., Zupan, B., Tomita, M., & Willer, B. (2009). Training emotional processing in persons with brain injury. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *24*(5), 313–323.
- Radley, J. J., & Morrison, J. H. (2005). Repeated stress and structural plasticity in the brain. *Ageing Research Reviews*, *4*(2), 271–287.
- Rapcsak, S. Z., Galper, S. R., Comer, J. F., Reminger, S. L., Nielsen, L., Kaszniak, A. W., ... Cohen, R. A. (2000). Fear recognition deficits after focal brain damage A cautionary note. *Neurology*, *54*(3), 575–575.
- Regroupement des associations de personnes traumatisées craniocérébrales du Québec (2015). Le TCC, c'est quoi? [En ligne]. Consulté le 1 novembre 2015. <http://www.raptccq.com/raptccq/le-tcc-cest-quoi.html>
- Rosenberg, H., Dethier, M., Kessels, R. P. C., Westbrook, R. F., & McDonald, S. (2015). 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.
- Rosenberg, H., McDonald, S., Dethier, M., Kessels, R. P. C., & Westbrook, R. F. (2014). Facial emotion recognition deficits following moderate-severe Traumatic Brain Injury (TBI): re-examining the valence effect and the role of emotion intensity. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, *20*(10), 994–1003.

- Rymarczyk, K., Biele, C., Grabowska, A., & Majczynski, H. (2011). EMG activity in response to static and dynamic facial expressions. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 79(2), 330–333.
- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, 14(2), 257–262.
- Särkämö, T., Pihko, E., Laitinen, S., Forsblom, A., Soinila, S., Mikkonen, M., ... Tervaniemi, M. (2010). Music and speech listening enhance the recovery of early sensory processing after stroke. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(12), 2716–2727.
- Särkämö, T., Ripollés, P., Vepsäläinen, H., Autti, T., Silvennoinen, H. M., Salli, E., ... Rodríguez-Fornells, A. (2014). Structural Changes Induced by Daily Music Listening in the Recovering Brain after Middle Cerebral Artery Stroke: A Voxel-Based Morphometry Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00245>
- Särkämö, T., & Soto, D. (2012). Music listening after stroke: beneficial effects and potential neural mechanisms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252, 266–281.
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2013). Music perception and cognition: development, neural basis, and rehabilitative use of music. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(4), 441–451.
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., Laitinen, S., Forsblom, A., Soinila, S., Mikkonen, M., ... Hietanen, M. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain: A Journal of Neurology*, 131(Pt 3), 866–876.

- Schirmer, A., & Kotz, S. A. (2006). Beyond the right hemisphere: brain mechanisms mediating vocal emotional processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(1), 24–30.
- Schupp, H. T., Schmälzle, R., & Flaisch, T. (2014). Explicit semantic stimulus categorization interferes with implicit emotion processing. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *9*(11), 1738–1745.
- Scott, S. K., Young, A. W., Calder, A. J., Hellawell, D. J., Aggleton, J. P., & Johnson, M. (1997). Impaired auditory recognition of fear and anger following bilateral amygdala lesions. *Nature*, *385*(6613), 254–257.
- Smith C. (2011). Neuropathology. In J. M. Silver, T. W. MacAllister, & S. C. Yudofsky (eds.), *Textbook of traumatic brain injury* (2nd edition, p. 23-37). Texas: American Psychiatric Publishing.
- Société de l'assurance automobile du Québec (2003). Le traumatisme crânio-cérébral: brochure à l'intention des familles et des personnes atteintes. *Gouvernement du Québec*. 74 p.
- Spell, L. A., & Frank, E. (2000). Recognition of Nonverbal Communication of Affect Following Traumatic Brain Injury. *Journal of Nonverbal Behavior*, *24*(4), 285–300.
- Spikman, J. M., Milders, M. V., Visser-Keizer, A. C., Westerhof-Evers, H. J., Herben-Dekker, M., & 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. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0065581>
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Schroeder, U., Grossenbacher, P. G., Federlein, J., Büttner, T., & Przuntek, H. (1999). Knowing no fear. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, *266*(1437), 2451–2456.

- Teasdale, G., & Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet (London, England)*, *2*(7872), 81–84.
- Trautmann, S. A., Fehr, T., & Herrmann, M. (2009). Emotions in motion: Dynamic compared to static facial expressions of disgust and happiness reveal more widespread emotion-specific activations. *Brain Research*, *1284*, 100–115.
- Vandekerckhove, M., Plessers, M., Van Mieghem, A., Beeckmans, K., Van Acker, F., Maex, R., ... Van Overwalle, F. (2014). Impaired facial emotion recognition in patients with ventromedial prefrontal hypoperfusion. *Neuropsychology*, *28*(4), 605–612.
- Van Dillen, L. F., & Derks, B. (2012). Working memory load reduces facilitated processing of threatening faces: An ERP study. *Emotion*, *12*(6), 1340–1349.
- Von Holst, H., & Cassidy, J. D. (2004). Mandate of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine*, (43 Suppl), 8–10.
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, *37*(02), 190–203.
- Yim, J., Babbage, D. R., Zupan, B., Neumann, D., & Willer, B. (2013). The relationship between facial affect recognition and cognitive functioning after traumatic brain injury. *Brain Injury*, *27*(10), 1155–1161.
- Zhang, D., Luo, W., & Luo, Y. (2013). Single-trial ERP analysis reveals facial expression category in a three-stage scheme. *Brain Research*, *1512*, 78–88.
- Zupan, B., Babbage, D., Neumann, D., & Willer, B. (2014). Recognition of facial and vocal affect following traumatic brain injury. *Brain Injury*, *28*(8), 1087–1095.

Annexes

Annexe I

Tableau 1. Échelle de coma de Glasgow

Ouverture des yeux	
Spontanée	4
À la douleur	3
Stimulation verbale	2
Aucune	1
Réponse verbale	
Orientée	5
Confuse	4
Inappropriée	3
Incompréhensible	2
Aucune	1
Réponse motrice	
Obéissante aux ordres	6
Flexion adaptée	5
Flexion non-adaptée	4
Décortication	3
Décélération	2
Aucune	1