

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

**Évaluation de la perception visuelle chez le nourrisson et suite  
à un traumatisme craniocérébral léger chez l'enfant.**

Par

Odile Brosseau-Lachaine

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 Philosophiae Doctor (Ph.D.)  
en Psychologie - recherche & intervention  
option Neuropsychologie clinique

Août, 2007

©, Odile Brosseau-Lachaine, 2007



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :  
**Évaluation de la perception visuelle chez le nourrisson et suite  
à un traumatisme craniocérébral léger chez l'enfant.**

Présentée par :  
Odile Brosseau-Lachaine

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Michelle McKerral, Ph.D.

---

Président-rapporteur

Jocelyn Faubert, Ph.D.

---

Directeur de recherche

Christian Casanova, Ph.D.

---

Codirecteur de recherche

Dave Saint-Amour, Ph.D.

---


Membre du jury

Cary Kogan, Ph.D., C.Psych.

---

Examineur externe

---



## Résumé

Récemment, un nombre grandissant d'études se sont intéressé au développement de la perception visuelle. Une évolution rapide des fonctions est rapportée au cours de la première année de vie. La perception visuelle pourrait être potentiellement compromise par une blessure à la tête dans l'enfance. Jusqu'à ce jour, très peu d'études se sont penchées sur ces questions. Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse ont comme principal objectif d'évaluer le développement de la sensibilité au mouvement de «flux optique», un large patron perçu lors de la locomotion et de mesurer la sensibilité aux stimuli simples et complexes chez les enfants ayant subi un traumatisme craniocérébral léger (TCCL), à l'aide de méthodes psychophysiques.

Dans la première étude présentée, la technique du regard préférentiel à choix-forcé a été utilisée pour évaluer la sensibilité des nourrissons aux stimuli en mouvement radial de cohérence variée comparativement au patron de bruit non-directionnel de part et d'autre du large écran. Les seuils de cohérence au stimulus d'expansion ont été mesurés à l'Expérience 1 pour les nourrissons de 2, 4, 6, 8, et 10 mois, de même qu'à l'Expérience 2, lors de laquelle une cohorte de bébés a été suivie de 2 à 8 mois (longitudinal). Une amélioration significative de la sensibilité au mouvement d'expansion a été observée à l'aide des deux devis expérimentaux. Troisièmement, la sensibilité à l'expansion et à la contraction a été évaluée chez une autre cohorte de bébés, suivie de 2 à 8 mois. Une meilleure sensibilité est rapportée pour l'expansion que pour la contraction du stimulus, suggérant un développement plus hâtif de la sensibilité à la direction correspondant à la locomotion vers l'avant.

Dans la seconde étude de la thèse, la sensibilité aux stimuli visuels simples et complexes de 18 enfants ayant subi un TCCL a été comparée à celle de 18 enfants témoins, tous âgés entre 8 à 16 ans. La sensibilité à des formes statiques et dynamiques de stimuli simples (premier-ordre) et complexes (deuxième-ordre) et au flux optique radial a été évaluée à 1, 4 et 12 semaines après l'accident et à des moments correspondants chez les contrôles. Les résultats démontrent des seuils significativement

affectés aux stimuli complexes (deuxième-ordre statique et dynamique et flux optique) pour les enfants ayant subi un TCCL, comparativement à une sensibilité normale aux stimuli simples, de premier-ordre. De plus, la sensibilité à l'information complexe est demeurée affectée jusqu'à 12 semaines suite à l'accident.

Enfin, ces résultats démontrent une amélioration de la sensibilité au flux optique et qu'un biais pour l'expansion semble présent dès les premiers mois de la vie. Cette amélioration au mouvement radial reflète probablement la maturation des aires corticales qui sous-tendent l'intégration du mouvement à cet âge. De plus, les résultats suggèrent que les enfants ayant subi un TCCL présentent un déficit sélectif du traitement de l'information visuelle de haut-niveau et que celui-ci perdure sur de relativement longues périodes. Les mesures utilisées pourraient éventuellement être utiles pour compléter l'évaluation cognitive des enfants ayant subi un TCCL et aider à prévenir un retour prématuré aux activités sportives.

**Mots-clés :** vision, psychophysique, développement, nourrisson, flux optique, perception du mouvement, stimuli complexe, premier-ordre, deuxième-ordre, traumatisme craniocérébral léger.

## Abstract

Recently, developmental studies have become a focus of interest in vision research. A rapid maturation of visual functions has been described as occurring during the first years of life. Unfortunately, visual perception has the potential to be disrupted after a head injury during the same period. Until now, very few studies have addressed these issues. The aim of the studies presented in this thesis is to assess the development of the sensitivity to “optic flow” stimuli in infants, which is defined as a large-scale pattern perceived during locomotion, and to examine the sensitivity to simple and complex visual stimuli in children who have suffered a mild traumatic brain injury (mTBI).

In the first study, infants’ coherence thresholds to radial optic flow motion during the first months of life were examined. A forced-choice preferential looking technique was used to measure infants’ sensitivities to a large moving radial stimulus varying in coherence on one side and a corresponding non-directional radial noise pattern on the other. Coherence thresholds from 2-, 4-, 6-, 8-, and 10-months-of-age infants were measured using the method of constant stimuli in Experiment 1. In a second experiment, infants were followed longitudinally (tested at 2, 4, 6, & 8 months) using the same stimuli. Significant improvements in the sensitivity to expanding radial motion were found during the first months of life for both experiments. Thirdly, sensitivity to expanding and contracting radial motion was tested for infants followed longitudinally (from 2 to 8 months). Results demonstrated superior sensitivity for expansion as compared to contraction, suggesting that sensitivity to direction corresponding to forward locomotion develops at a faster rate than the reverse direction.

In the second study, the sensitivity to simple and complex visual stimuli of 18 children who have sustained mild TBI was compared with that of 18 matched healthy controls, aged between 8 and 16 years. Sensitivity to static and dynamic forms of simple (first-order) and complex (second-order) stimuli as well as radial optic flow was assessed at 1, 4 and 12 weeks post-injury and at equivalent times for controls. The

results show that thresholds measured for all complex stimuli (static and dynamic second-order and optic flow motion) were significantly elevated for children who sustained a mild TBI children over time whereas no difference in thresholds between groups across all testing conditions was found for simple, first-order information. Moreover, the sensitivity to complex stimuli remained elevated at 12 weeks after the injury.

In conclusion, these results show that optic flow sensitivity is improving during the first months of life and that an expansion bias seems to be present early on in life. The sensitivity improvement for expanding patterns likely reflects the maturation of cortical areas subserving motion integration in infancy. Also, findings suggest that injured children present selective processing deficits for higher-order information and that this deficit persists over relatively long periods. Such measures could be eventually used to complement the assessment of the cognitive status of children who have sustained mTBI and possibly help to ensure a safer return to activities and sports.

**KeyWords :** vision, psychophysics, development, infant, optic flow, motion perception, complex stimuli, first-order, second-order, mild traumatic brain injury.

## Table des matières

Résumé .....	iii
Abstract.....	v
Table des matières .....	vii
Liste des tableaux .....	xiii
Liste des figures.....	xiv
Liste des abréviations .....	xv
Remerciements .....	xviii
CHAPITRE 1.....	1
1.1 Introduction à la thèse.....	2
CHAPITRE 2.....	4
2.1 Introduction .....	5
2.1.1 La perception du mouvement .....	5
2.2 Développement de la perception du mouvement chez l'enfant.....	6
2.2.1 Développement général de la vision chez le nourrisson.....	6
2.2.2 Techniques utilisées pour mesurer la sensibilité aux stimuli visuels chez les nourrissons .....	7
2.2.3 Développement neuronal.....	9
2.2.4 Développement de la perception du mouvement .....	10
2.2.4.1 Développement de la direction du mouvement en translation .....	12
2.2.4.2 Développement de la perception de stimuli complexes .....	15
2.2.5 Que sont les stimuli de flux optique ? .....	17
2.2.6 Développement de la perception de flux optique .....	18
2.2.6.1 Études posturales.....	20
2.2.7 Développement du flux optique : Objectifs et hypothèses .....	21
CHAPITRE 3.....	22
Perception visuelle de stimuli complexes.....	23
3.1 Le flux optique : un phénomène perceptif complexe .....	23
3.1.1 Perception du flux optique : études psychophysiques.....	24
3.1.2 Études neurophysiologiques.....	27



3.1.3	Études d'imagerie cérébrale .....	28
3.1.4	Biais pour l'expansion du mouvement radial .....	29
3.2	Traitement de premier- et de deuxième-ordre .....	32
3.2.1.1	Stimuli de premier-ordre .....	32
3.2.1.2	Stimuli de deuxième-ordre .....	33
3.2.2	Perception de stimuli simples et complexes .....	35
3.2.2.1	Perception du mouvement global complexe.....	37
3.2.2.2	Études sur l'effet consécutif du mouvement .....	38
3.2.2.3	Études neurophysiologiques des stimuli simples et complexes .....	38
3.2.2.4	Études d'imageries : stimuli simples et complexes .....	40
3.2.3	Perception de stimuli simples et complexes chez diverses populations..	41
3.2.3.1	Développement de la perception visuelle complexe .....	41
3.2.3.2	Perception visuelle complexe en vieillissement normal.....	42
3.2.3.3	Perception visuelle complexe chez certaines populations cliniques ...	42
3.2.3.3.1	Patients cérébrolésés.....	42
3.2.3.3.2	Personnes atteintes de troubles neurodéveloppementaux.....	43
3.3	Conclusion sur la perception de stimuli complexes .....	45
CHAPITRE 4.....		46
4.1	Le traumatisme craniocérébral chez l'enfant.....	47
4.1.1	Définition du TCC .....	47
4.1.2	Traumatisme craniocérébral léger .....	49
4.1.2.1	Définition du TCCL.....	49
4.1.2.2	Incidence du TCCL chez les enfants .....	50
4.1.3	Neurophysiologie suite au TCC.....	51
4.1.3.1	Imagerie cérébrale .....	53
4.1.4	Capacités affectées suite au TCC léger .....	54
4.1.4.1	Symptomatologie.....	54
4.1.4.2	Conséquences au plan cognitif.....	56
4.1.4.3	Déficits en perception visuelle .....	58
4.1.4.4	Déficits visuo-moteurs.....	59
4.1.5	Objectifs et hypothèses de la seconde étude.....	60

CHAPITRE 5.....	62
Section expérimentale : Premier article.....	63
Contribution des auteurs de l'article.....	64
5.1 Abstract.....	65
5.2 Introduction .....	66
5.3 General Method.....	68
5.3.1 Apparatus and stimuli.....	68
5.3.2 Procedure.....	69
5.4 Experiment 1: .....	71
5.4.1 The development of sensitivity to expanding flow fields: cross-sectional measurements from 2 to 10 months.....	71
5.4.2 Participants .....	71
5.4.3 Procedure.....	71
5.4.4 Results .....	72
5.5 Experiment 2: .....	73
5.5.1 The development of sensitivity to expanding flow fields: longitudinal follow up from 2 to 8 months of age. ....	73
5.5.2 Methods.....	73
5.5.2.1 Participants .....	73
5.5.3 Results .....	74
5.6 Experiment 3: .....	75
5.6.1 Longitudinal follow-up of expanding and contracting optic flow fields sensitivities. ....	75
5.6.2 Methods.....	75
5.6.2.1 Participants .....	76
5.6.3 Results .....	76
5.7 Discussion.....	77
5.8 Acknowledgements .....	84
5.9 References .....	85
5.10 Figure Legends.....	91
5.11 Figures .....	93

CHAPITRE 6.....	100
Deuxième article.....	101
Contributions des auteurs .....	102
6.1    Abstract.....	103
6.2    Introduction .....	104
6.3    Methods .....	106
6.3.1    Participants .....	106
6.3.2    Apparatus.....	107
6.3.3    Psychophysical tasks .....	108
6.3.3.1    Static conditions .....	108
6.3.3.2    Dynamic conditions.....	109
6.3.3.3    Optic flow stimuli.....	110
6.3.4    Other measures .....	110
6.3.5    Testing Procedures .....	111
6.3.6    Data analysis.....	113
6.4    Results .....	113
6.4.1    Static conditions .....	113
6.4.2    Dynamic conditions.....	114
6.4.3    Optic flow condition.....	115
6.4.4    Other measures .....	116
6.5    Discussion.....	117
6.5.1    Deficits of higher level processing after mTBI .....	117
6.5.2    Low and high levels processing in aging and other pathologies .....	118
6.5.3    Visual deficits and symptoms after TBI .....	119
6.6    Conclusion.....	121
6.7    Acknowledgements .....	123
6.8    References .....	125
6.9    Legends.....	130
6.10    Figures .....	132
CHAPITRE 7.....	137
Discussion générale.....	138

7.1	Développement de la perception du flux optique lors de la première année de vie	138
7.1.1	Sensibilité à la cohérence du mouvement.....	140
7.1.2	Performance jusqu'à l'âge adulte .....	141
7.1.3	Dissociation entre les sensibilités aux directions radiales opposées .....	142
7.1.4	Biais pour l'expansion du flux optique.....	144
7.1.5	Émergence de la sensibilité au flux optique .....	145
7.1.6	Inné vs acquis : génétiquement prédéterminé ou influence de l'environnement? .....	147
7.1.7	Limites de l'étude .....	150
7.1.8	Directions futures .....	151
7.1.9	Conclusion de la première étude .....	152
7.2	Déficit de la perception de stimuli complexes, chez les enfants ayant subi un TCC léger .....	154
7.2.1	Déficit du traitement visuel de haut-niveau suite au TCCL .....	154
7.2.2	Traitement visuel de bas et de haut niveau chez d'autres populations cliniques	157
7.2.3	Déficits visuels suite au TCCL.....	160
7.2.4	Déficit prolongé de la perception de stimuli complexes .....	161
7.2.4.1	Symptômes post-commotionnels.....	164
7.2.5	Impacts fonctionnels du déficit.....	165
7.2.6	Influence de l'attention sur les résultats .....	167
7.3	Limites de la seconde étude.....	168
7.4	Directions et avenues futures de recherche .....	169
7.5	Conclusions de l'étude.....	171
	Conclusions générales .....	172
	Bibliographie .....	174
	Annexe 1.....	i
	Accord des coauteurs des articles de la thèse.....	i
	Annexe 2.....	iv
	Permission de l'éditeur du 1 <sup>e</sup> article.....	iv

Annexe 3.....vii  
Définition du Traumatisme craniocérébral léger.....vii  
Annexe 4.....ix  
Questionnaire des symptômes post-commotionnels.....ix

## Liste des tableaux

<b>Tableau 4-I</b> Critères de gradation des commotions cérébrales .....	50
<b>Tableau 6-I</b> Participants characteristics for mTBI group.....	124
<b>Tableau 7-I</b> Sensibilité de quelques populations cliniques aux stimuli simple/complexe .....	158

## Liste des figures

<b>Figure 2-1</b> : Illustration des principales aires visuelles chez l'humain .....	6
<b>Figure 2-2</b> : Exemple d'un montage qui évalue l'acuité de l'enfant par la technique du regard préférentiel.....	9
<b>Figure 2-3</b> : Schéma démontrant l'émergence et l'amélioration des sensibilités à l'orientation, la direction et la disparité chez le nourrisson.....	13
<b>Figure 3-1</b> : Illustration d'un flux optique rencontré lors de la locomotion.....	24
<b>Figure 3-2</b> : Illustration des sous-régions du complexe MT+ chez l'humain .....	29
<b>Figure 3-3</b> : Exemple de stimuli de premier- et de deuxième-ordre.....	34
<b>Figure 3-4</b> : Illustration des stimuli fréquemment employés par le groupe d'Atkinson, Braddick et Wattam-Bell.....	44
<b>Figure 5-1</b> : Schematic illustration of the preferential looking display for optic flow motion.....	93
<b>Figure 5-2</b> : Results from Experiment 1: cross-sectional measurements.....	94
<b>Figure 5-3</b> : Individual examples of psychometric functions for each age group.....	95
<b>Figure 5-4</b> : Results from Experiment 2: longitudinal follow-up.....	96
<b>Figure 5-5</b> : Individual results from Experiment 3.....	97
<b>Figure 5-6</b> : Bar plot from Experiment 3.....	98
<b>Figure 5-7</b> : Relative sensitivity (dB) for expansion and contraction conditions.....	99
<b>Figure 6-1</b> : Schematic of the first- and second-order stimuli.....	132
<b>Figure 6-2</b> : Results from the static conditions.....	133
<b>Figure 6-3</b> : Results from the dynamic conditions.....	134
<b>Figure 6-4</b> : Results from the optic flow condition .....	135
<b>Figure 6-5</b> : Rivermead post-concussion symptoms questionnaire.....	136

## Liste des abréviations

### Français :

cd/m <sup>2</sup> :	candela par mètre carré
cm :	centimètre
cpd :	cycles par degré
CR :	Champ récepteur
deg. :	Degré
Hz :	Hertz ou cycles par seconde
IRMf :	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
NOC :	Nystagmus optocinétique
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PEV :	Potentiels évoqués visuels
TCC :	Traumatisme craniocérébral
TCCL :	Traumatisme craniocérébral léger
VI :	Aire visuelle primaire
V5 :	Aire visuelle #5

### Anglais :

2AFC :	Two alternative forced choice
DAI:	Diffuse axonal injury
CT scan:	Computerized Tomographic scanning
fMRI:	functional Magnetic Resonance Imaging
GCS :	Glasgow Coma Scale (échelle de coma de Glasgow)
LGN :	Lateral Geniculate Nucleus (corps genouillé latéral)
mTBI :	Mild Traumatic Brain Injury
MT :	Medial Temporal Area
MRI:	Magnetic Resonance Imaging
MST :	Medial Superior Temporal area
MSTd :	dorsal region of the Medial Superior Temporal area



PET :	Positron Emission Tomography
RDK :	Random Dot Kinematogram (kinématogramme de points aléatoires)
SPECT :	Single Photon Emission Computerized Tomography
TAI :	Traumatic Axonal Injury
TBI :	Traumatic Brain Injury

*à Martin,  
à l'avenir.*

## Remerciements

Je tiens sincèrement à remercier tous ceux à qui sans toute cette aventure n'aurait pas eu la même saveur. D'abord; mes directeurs de recherche qui m'ont donné le plus beau cadeau qu'un(e) étudiant(e) doctorant(e) peut désirer: la liberté de réaliser un projet personnel, qui a germé et évolué selon mes propres idées. Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers mon directeur, Jocelyn Faubert, un homme au grand cœur, qui garde la porte toujours ouverte. Jocelyn, ta compréhension, ton positivisme et ta générosité m'ont certes permis d'alléger le poids parfois lourd d'allier deux mondes différents. Merci de ton soutien et de ton énergie.

Je tiens à également à remercier mon codirecteur de thèse, Christian Casanova, qui a été mon directeur à la maîtrise en recherche. Merci Christian de m'avoir donné confiance en mes capacités de chercheure pour le Ph.D. et de m'avoir inculqué de nombreuses valeurs, très utiles en sciences, telles que la rigueur, le sens critique, l'ouverture sur les autres domaines, et l'obsession du détail, entre autres pour les figures!

Je voudrais également envoyer une pensée de remerciement de l'autre côté de l'Atlantique, à M. François Vital-Durand, qui m'a accueilli à bras ouvert un été, dans son laboratoire à Lyon (Inserm & Bébé-vision), chez qui j'ai pu acquérir les connaissances et habiletés nécessaires liées au regard préférentiel chez les nourrissons.

Merci à mes collaborateurs sur le projet TCCL avec les enfants, Robert Forget et Isabelle Gagnon. Votre énergie et votre implication ont été grandement appréciés pour cette aventure qui a été beaucoup plus prenante que prévue.

D'ailleurs, je dois un immense « merci » aux parents et aux enfants eux-mêmes qui ont bien voulu participer à l'une de nos études, qui impliquaient souvent un suivi sur plusieurs mois. Merci de votre générosité, la recherche ne pourrait être possible sans vous.

Merci au personnel de l'École d'optométrie et de la Clinique universitaire de la vision. Plus particulièrement à certains optométristes qui ont bien voulu effectuer les examens de la vision chez plusieurs participants, des tous petits aux plus grands.

Merci à mes collègues et amis du laboratoire de vision et de perception. Nous formons une belle famille d'hétéroclites dans laquelle règne une belle ambiance, un ingrédient primordial à la réussite dans ce domaine parfois ardu. Merci également aux anciens, tel que Clo et Armando : vous avez été des modèles pour moi. Merci de votre aide et des discussions au labo ou en congrès (sur la plage).

Je remercie également mes collègues étudiants des autres labos à l'École, avec qui j'ai partagé séminaires, dîners, chambres de congrès, rires et science bien évidemment! Un merci spécial à Isabelle, avec qui le partage de l'expérience du doc R/I a été plus que thérapeutique, vive l'escalado-thérapie!

Je voudrais remercier également mes compagnons du programme de neuropsychologie clinique, avec qui j'ai partagé plusieurs années d'une expérience particulière, le doctorat. Les liens qui nous unis suite à un stage clinique effectué ensemble sont, je le crois, très puissants. Merci Nadia, Eliane, Fred, Mimi, les stages ou travaux n'auraient pas été les mêmes sans vous!

Merci à tous mes amis, merci de l'intérêt que vous portez à mon cheminement qui peut sembler parfois hors normes.

Également, un grand merci à ma famille et à ma belle-famille, de vos encouragements et de votre intérêt. À mes parents, je vous remercie d'être toujours là pour moi et d'être ce que vous êtes.

Merci Martin, mon époux bien-aimé. Je te remercie de ton soutien indéfectible tout au long de ce marathon de plusieurs années d'études, d'examens, de travaux, de testing au labo, de stages, de congrès, etc. Je t'aime. Et oui, c'est réel, je termine!

Je tiens également à remercier les organismes subventionnaires suivants pour les bourses doctorales octroyées: le Réseau de recherche en santé de la vision du FRSQ, les

Instituts de Recherche en Santé du Canada (IRSC) en partenariat avec la fondation E.A.  
Baker.

Merci.

## **CHAPITRE 1**

## 1.1 Introduction à la thèse

Dès les premiers jours de la vie, l'enfant ouvre ses yeux vers le monde. Les parents, intrigués, se questionnent à savoir ce qu'il peut bien percevoir. Il y a de cela quelques années, la médecine percevait les nouveau-nés pratiquement comme sourds et aveugles. Quelques années plus tard, les progrès de la recherche ont permis d'élucider de nombreuses questions quant aux capacités des enfants, notamment au plan de la perception visuelle. Un développement rapide des différentes fonctions cérébrales qui sous-tendent la vision est rapporté au cours des premières années de vie. La recherche en sciences de la vision a permis de proposer des mécanismes cérébraux bien définis qui analysent l'entrant visuel, tel que pour une hiérarchisation du traitement neuronal pour l'analyse de l'information complexe de haut niveau. Malheureusement, la perception visuelle complexe pourrait être potentiellement compromise par une blessure à la tête dans l'enfance. Les nombreuses connaissances dont nous disposons grâce à la littérature scientifique en perception permettent d'utiliser les méthodes psychophysiques pour l'investigation du traitement de l'information visuelle complexe auprès de populations cliniques ou particulières, tel que les nourrissons en développement et les enfants ayant subi une blessure à la tête.

Cette thèse est présentée sous différents chapitres et s'articule autour de deux pôles; les deux études présentées sous forme d'articles. D'abord, le Chapitre 2 décrit le développement de la perception du mouvement et des stimuli complexes chez l'enfant. Le chapitre suivant, le Chapitre 3, est consacré à la recension des écrits pertinents concernant la perception visuelle des stimuli simples et complexes, tels que le premier- et le deuxième-ordre, en plus de la perception du « flux optique ». Pour introduire la problématique de la seconde étude de la thèse, un chapitre portant sur le traumatisme craniocérébral léger (TCCL) chez l'enfant suit (Chapitre 4). Ensuite, la portion expérimentale de la thèse est présentée lors des deux chapitres suivants. Le Chapitre 5 présente la première étude qui porte sur le développement de la sensibilité au mouvement de flux optique chez le nourrisson. Cette étude représente une première quant aux mesures de seuils de cohérence au mouvement radial d'expansion et de

contraction chez des bébés d'une large étendue d'âge. Le but de la seconde étude est l'investigation de la sensibilité aux stimuli visuels simples et complexes suite à un TCCL chez l'enfant. Cet article, qui est présenté au Chapitre 6, évalue la perception visuelle de cette population à trois reprises au cours des 3 premiers mois post-accident. Les constats généraux tirés des résultats provenant des deux études seront repris et ensuite discutés en fonction des connaissances actuelles dans le domaine. La discussion générale sera alors présentée au Chapitre 7, dernier chapitre de cette thèse.



## **CHAPITRE 2**

## **2.1 Introduction**

Notre environnement visuel est composé de surfaces et de bordures qui sont définies par des différences locales de luminance, de texture, de contraste, de disparité, etc. Notre système visuel détecte, localise et analyse des objets peu importe qu'ils soient définis par une variation de luminance ou par une modulation de toute autre composante de l'image. Les perceptions de la forme et du mouvement sont des aspects essentiels à la vision, puisqu'elles sont une source d'information fondamentale sur l'environnement extérieur. La perception du mouvement nous permet de segmenter un objet de son arrière-plan, elle est essentielle lors de nos déplacements et lorsque nous devons éviter des objets sur notre parcours (Nakayama, 1985).

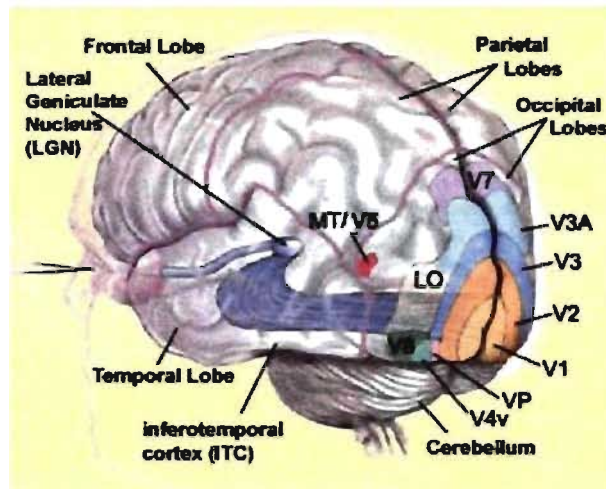
Le cerveau consacre une partie importante de sa superficie corticale au traitement des informations visuelles. Au-delà du cortex visuel primaire (V1), le système visuel est ségrégué en deux voies de traitement de l'information; la voie ventrale, qui projette vers le lobe temporal et est impliquée dans la reconnaissance de la forme, de la couleur et des visages et la voie dorsale qui projette vers le lobe pariétal qui est impliquée dans le traitement de l'information spatiale et la planification visuo-motrice (Milner & Goodale, 1995; Mishkin, Ungerleider, & Macko, 1983). Les deux voies seraient distinctes en termes de connectivités (Felleman & Van Essen, 1991; Young, 1992).

### **2.1.1 La perception du mouvement**

L'inhabilité à percevoir le mouvement entraîne des déficits graves dans la vie quotidienne (Zihl, von Cramon, & Mai, 1983). Le mouvement se définit par un changement en distance dans le temps. Lorsque l'on voit un objet bouger, l'image en mouvement stimule tout d'abord les récepteurs de la rétine. La voie impliquée dans la perception du mouvement, origine d'un sous-groupe de cellules ganglionnaires de la rétine et se poursuit jusqu'aux cortex visuels extrastriés, dont l'aire temporale médiane (MT) ou V5, en passant par les couches magnocellulaires du corps genouillé latéral (ou LGN), le cortex strié (aire visuelle primaire ou V1) et V2 (Wurtz & Kandel, 2000). Une sensibilité à la direction du mouvement est observée dès l'aire V1. L'aire MT est une

zone corticale composée de cellules sélectives à la direction et cette zone analyse les aspects plus complexes du mouvement (Albright, 1984; Maunsell & Van Essen, 1983a; Newsome, Mikami, & Wurtz, 1986; Zeki, 1974).

**Figure 2-1** : Illustration des principales aires visuelles chez l'humain



Source : [http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a\\_02/a\\_02\\_cr/a\\_02\\_cr\\_vis/a\\_02\\_cr\\_vis.html](http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html)

## 2.2 Développement de la perception du mouvement chez l'enfant

Dès la naissance, les capacités visuelles de l'enfant se développent rapidement (Atkinson, 2000). Ils s'éveillent au monde extérieur au fil des semaines en explorant de leurs regards et en réagissant peu à peu aux autres. Étant donné son importance, le développement de la vision est critique au développement normal de l'enfant et sa compréhension permet d'estimer la maturation des aires corticales sous-jacentes (Banton & Bertenthal, 1997). Depuis des décennies, on a assisté à une explosion de la recherche en développement de la vision. Les connaissances ont énormément avancé depuis les années '60, où l'on croyait que le nouveau-né était aveugle et sourd.

### 2.2.1 Développement général de la vision chez le nourrisson

Les parents de nouveau-nés se questionnent fréquemment à propos de ce que leurs enfants peuvent percevoir. L'acuité spatiale du nouveau-né est d'environ un

cycle/degé à la naissance. La résolution spatiale de l'enfant, mesurée par des cartes d'acuité en regard préférentiel, progresse de façon régulière dans la première année (Vital-Durand, Atkinson, & Braddick, 1996). Par exemple, entre 9 et 12 mois, l'enfant peut voir un réseau de barres ayant une fréquence spatiale allant jusqu'à 19 cycles/degé (Vital-Durand, 1992). Au niveau de la sensibilité au contraste spatiale, il semble qu'avec le développement, les enfants ont une meilleure sensibilité au contraste pour des fréquences spatiales plus élevées (Teller, 1997). Contrairement à une certaine immaturité spatiale à la naissance, la résolution temporelle est développée beaucoup plus rapidement. En effet, à 1 et à 2 mois, la résolution temporelle de l'enfant est de 40 Hz et de 50 Hz, déjà très près de celle de l'adulte qui est de 55 à 60 Hz (Landis, 1954; Regal, 1981). Vers deux mois, la vision des couleurs est présente mais rudimentaire, avec une discrimination rouge-vert qui émerge à cet âge (Teller, 1997). De plus, à 2 mois, le bébé peut discriminer certaines couleurs du blanc, tel que le rouge, l'orange, le vert, le bleu et le pourpre (bleuâtre et rougeâtre), mais pas encore le jaune, le jaune-vert et le pourpre moyen. Une amélioration continue se poursuit jusqu'à l'adolescence, quant à la sensibilité au contraste chromatique (Braddick, 1993b). La réponse à la disparité binoculaire est absente chez les enfants de moins de trois mois, elle apparaît et se développe rapidement entre trois et six mois (Held, Birch, & Gwiazda, 1980; Teller, 1982). Le champ visuel est très étroit à la naissance et s'élargi progressivement pour devenir équivalent à celui de l'adulte vers la fin de la première année de vie (Sireteanu, 1999). Ainsi, plusieurs caractéristiques de la vision se développent graduellement et rapidement au cours des premiers mois de la vie, pour ensuite poursuivre un développement qui atteint l'âge adulte à différents moments au cours de l'enfance.

### **2.2.2 Techniques utilisées pour mesurer la sensibilité aux stimuli visuels chez les nourrissons**

Différentes techniques ont été développées pour évaluer la sensibilité des jeunes enfants aux stimuli visuels. La difficulté de cette population est qu'ils ne peuvent pas donner de réponses verbales et ont une compréhension limitée de la tâche. Différentes techniques sont présentement utilisées dans le domaine du développement de la vision, dont les techniques psychophysiques qui se sont adaptés pour l'observation du

comportement de regard des enfants, dont l'habituation et le regard préférentiel. La technique d'habituation consiste en la présentation d'un stimulus donné sur plusieurs essais, jusqu'à ce qu'il devienne familiarisé en le regardant de moins en moins. Ensuite, lors de la phase test, on lui présente un nouveau stimulus et si l'enfant le regarde plus longtemps, on suppose qu'il le considère différent du premier, donc peut le discriminer de l'autre (Atkinson, 2000). Les potentiels évoqués visuels (PEV), une technique électrophysiologique, sont également utilisés chez cette population, qui a l'avantage de ne demander aucune réponse comportementale de la part de l'enfant. La technique du regard préférentiel en est une de choix, car cette méthode comportementale dépend de la perception globale de l'enfant, contrairement aux potentiels évoqués visuels qui seraient davantage contrôlés par les processus corticaux précoces (Teller, 1997).

La technique du regard préférentiel aurait été conçue par Fantz dans les années 1950 (Aslin, 2007) et reprise par Teller, qui l'a perfectionnée et adaptée à la psychophysique (Teller, 1979). Cette technique est basée sur le jugement à choix forcé à deux alternatives (2AFC) de l'expérimentateur. En effet, cette méthode implique que l'observateur fait le choix de la position du stimulus à l'insu, selon le comportement de regard de l'enfant. Par exemple, un choix spatial est présenté à l'enfant, tel qu'un stimulus «cible» (ou positif) présentée d'un côté, et un stimulus «neutre» (ou négatif) présenté de l'autre côté de l'écran. Les deux stimuli doivent être équivalents, sauf pour le trait distinctif de la cible. L'expérimentateur fait donc un choix spatial selon le comportement de regard de l'enfant, sans voir les stimuli visuels. La position du stimulus cible est variée aléatoirement entre la droite et la gauche du centre de l'écran. L'enfant qui démontre une préférence statistiquement significative pour le stimulus cible (ou positif) sur l'autre stimulus (négatif, manquant le trait distinctif de la cible) serait donc capable de discriminer entre les deux stimuli. Cette technique est basée sur le comportement de regard spontané de l'enfant. L'enfant n'apprend pas la technique, c'est l'expérimentateur qui observe l'enfant et se doit de présenter des stimuli cibles intéressants pour l'enfant, qui attirent son regard. En effet, les nourrissons ont certaines préférences intrinsèques, tel que regarder un patron texturé, plutôt qu'homogène. Les cartes d'acuités visuelles fonctionnent sur ce principe (Vital-Durand, 1996).

**Figure 2-2 :** Exemple d'un montage qui évalue l'acuité de l'enfant par la technique du regard préférentiel.



Source : Sireteanu (1999)

### 2.2.3 Développement neuronal

Pour expliquer l'arrivée relativement tardive de l'analyse du mouvement chez l'enfant, plusieurs raisons sont avancées. D'abord, l'immaturité de la rétine, plus particulièrement de la fovéa, pourrait influencer la sensibilité au mouvement de l'enfant. La densité en cônes à la fovéa est deux fois moins importante chez le nourrisson par rapport à l'adulte (Yuodelis & Hendrickson, 1986). De plus, les segments externes de bâtonnets sont la dernière structure de la rétine à se développer (Grun, 1982). L'immaturité des bâtonnets est plus importante près de la fovéa qu'en périphérie de la rétine (Hendrickson & Drucker, 1992; Timmers, Fox, He, Hansen, & Fulton, 1999). Donc, le mouvement d'un objet dans l'espace va activer moins de photorécepteurs dans le temps, par rapport à l'adulte, ce qui pourrait produire une perte de sensibilité au mouvement (Dobkins & Teller, 1996). Plusieurs facteurs optiques semblent compromettre la qualité de la vision à la naissance, dont des aberrations sphériques, la clarté des milieux optiques, une accommodation immature, etc. (Atkinson, 2000).

Il est également très probable que les aires corticales spécialisées dans l'analyse du mouvement ne soient pas encore bien développées. Chez le singe, les premiers neurones corticaux sélectifs à la direction du mouvement – des cellules qui répondent seulement lorsque le stimulus va dans une direction donnée – ont été trouvés au niveau de l'aire visuelle primaire (V1), dans la couche 4B (Dow, 1974). Notons qu'entre le 2<sup>e</sup> et le 8<sup>e</sup> mois de la vie humaine, une prolifération synaptique considérable a été observée

dans le cortex strié (Huttenlocher, de Courten, Garey, & Van der Loos, 1982). La majorité des cellules sélectives à la direction est située dans l'aire temporelle médiane (MT), qui reçoit des projections de la couche 4B (Albright, 1984; Maunsell & Van Essen, 1983a; Zeki, 1974). Dobkins & Teller (1996) suggèrent que vers l'âge de trois mois, l'analogue humain de MT ne soit pas encore fonctionnel à un niveau mature, donc la perception du nourrisson se baserait davantage sur son cortex visuel primaire. Rappelons que le développement neuronal en termes de myélinisation progresse du sous-cortical, au cortex strié (V1), aux cortex extrastriés (Conel, 1947; Yakovlev, 1967). Ainsi, selon la hiérarchie du système, l'aire MST qui est spécialisée dans l'analyse du «flux optique» (voir le chapitre suivant) serait probablement fonctionnelle plus tard dans le développement. Par contre, des données neuroanatomiques récentes soulèvent un questionnement, car il semble que l'aire MT présente une certaine maturation dès la naissance (Bourne & Rosa, 2006).

L'environnement dans lequel évolue l'enfant a probablement des conséquences sur le développement visuel, en raison des mécanismes de plasticité. En effet, les propriétés neuronales du cortex visuel peuvent être modifiées par une exposition spécifique biaisée. Par exemple, des chatons élevés dans un environnement ne comportant qu'une seule direction de mouvement continue ont démontré une prépondérance de neurones « préférant » cette même direction (Cynader, Berman, & Hein, 1975; Tretter, Cynader, & Singer, 1975). Également, les neurones des chatons élevés à la lumière stroboscopique présentent une sélectivité à la direction réduite (Cynader, Berman, & Hein, 1973; Rauschecker & Schrader, 1987).

#### **2.2.4 Développement de la perception du mouvement**

La perception du mouvement est essentielle à plusieurs fonctions visuelles et est une caractéristique importante, présente chez toutes les espèces des plus primitives aux plus évoluées. Des chatons élevés en l'absence de stimulation normale de mouvement démontrent des déficits d'intégration visuo-moteurs, de discrimination et de sensibilité au contraste (Cynader & Chernenko, 1976; Pasternak & Merigan, 1979). Étant donné une telle importance évolutive et fonctionnelle, il est probable que son apparition

survient très tôt dans le développement. En effet, dès la naissance, les bébés s'orientent vers un objet en mouvement. Dès l'âge d'un mois, les nourrissons préfèrent un stimulus visuel dynamique à un stimulus statique (Volkman & Dobson, 1976). Toutefois, notons qu'il y a une différence entre la détection du mouvement, qui produit une modulation temporelle et la discrimination à la direction du mouvement. Tel que mentionné précédemment, une bonne résolution temporelle est observée chez les nouveau-nés, expliquant leur préférence pour les stimuli en mouvement (Regal, 1981). Plusieurs études démontrent que la discrimination de la direction au mouvement apparaît après le développement de la discrimination de l'orientation (Atkinson, 2000; Braddick, 1993b). En effet, il a été démontré que le nouveau-né discrimine entre des réseaux statiques de différentes orientations, dès les premières semaines postnatales (Atkinson, Hood, Wattam-Bell, Anker, & Tricklebank, 1988). La sensibilité à l'orientation augmente rapidement avec l'âge, au cours des trois premiers mois de vie (Atkinson, 2000).

Le nystagmus optocinétique (NOC) est en général présent à la naissance. Cette réponse de mouvements oculaires permet de stabiliser le regard, est effectuée en direction appropriée pour un large patron répétitif en mouvement de translation, à haut contraste, à faible fréquence spatiale (Atkinson, 2000). Ce qui suggère qu'un certain traitement de la direction du mouvement soit fonctionnel dès la naissance pour pouvoir détecter le glissement de l'image sur la rétine qui commande un NOC. Il a toutefois été proposé qu'avant l'âge de deux ou trois mois, ce réflexe oculomoteur soit initialement contrôlé par une voie directe de la rétine aux noyaux sous-corticaux (noyau du tractus optique) (Atkinson & Braddick, 1981; Hoffmann, 1987), avec l'observation d'une asymétrie directionnelle du NOC en stimulation monoculaire. En effet, le NOC monoculaire n'est observable que si la stimulation de mouvement se dirige vers le nez de l'enfant, tandis que le mouvement en direction temporal ne provoque pas de NOC (Atkinson & Braddick, 1981). Il est suggéré que cette voie soit éventuellement raffinée par des entrants binoculaires du cortex, avec l'apparition du NOC nasal à temporal chez les bébés de 8 à 12 semaines (Atkinson, 2000; Braddick, 1993b, 1996; Morrone, Atkinson, Cioni, Braddick, & Fiorentini, 1999). La littérature suggère que les préférences visuelles des nouveau-nés reflètent des mécanismes sous-corticaux (Banks



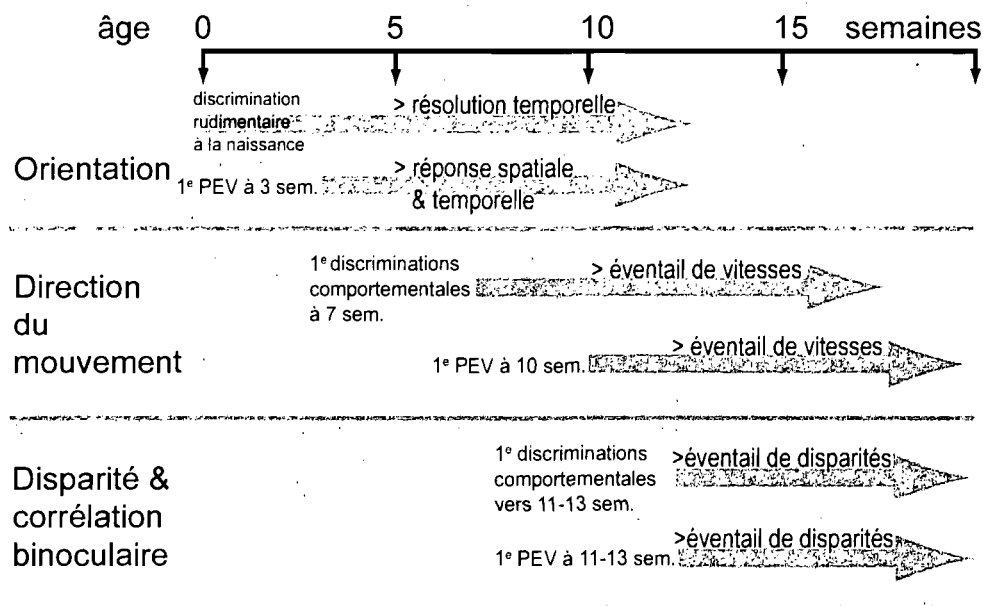
& Salapatek, 1981; M. H. Johnson, 1990). De plus, la poursuite lente pour une cible donnée ne serait pas efficace avant 6 à 8 semaines, un mouvement oculaire qui dépendrait des mécanismes corticaux (Braddick, 1993b). Toutefois, la relation entre le développement des systèmes cortical et sous-cortical qui analysent le mouvement est probablement plus complexe et demande davantage d'études pour pouvoir clarifier le tout.

#### 2.2.4.1 Développement de la direction du mouvement en translation

Les études développementales comportementales et électrophysiologiques ont démontré que les poupons ne pourraient discriminer la direction du mouvement, qui est un bon critère de sensibilité au mouvement, qu'à partir de l'âge de 2 mois, après le développement de la discrimination de l'orientation (voir Figure 2-3; Atkinson (2000)). Utilisant des potentiels évoqués visuels, Wattam-Bell (1991) démontre une première réponse corticale significative à la direction vers 10 semaines. Les mesures comportementales du même chercheur ont démontré une apparition plus hâtive de la sélectivité à la direction relative chez les enfants, vers 7 à 8 semaines (Wattam-Bell, 1992, , 1996a). Cet auteur a évalué la capacité des jeunes sujets à discriminer entre deux régions composées de points aléatoires en mouvement (*Random Dot Kinematograms*; RDK). Dans une des régions, tous les points vont dans la même direction (mouvement uniforme), tandis que l'autre région est ségréguée en trois sections : les éléments de la section du milieu vont dans une direction opposée aux éléments des deux autres sections de l'arrière plan (*stimulus road in the snow*, voir [Figure 3-4](#)). Ces résultats concordent avec ceux d'une étude de regard préférentiel qui rapporte une capacité à segmenter une forme par la direction du mouvement chez les nourrissons de 12 semaines, mais pas chez ceux de 6 semaines (Banton, Dobkins, & Bertenthal, 2001). Avant cet âge qui semble critique (7 à 8 semaines), le comportement discriminatif des nourrissons ne démontre pas d'évidences de sensibilité à la direction du mouvement. Cependant, les poupons d'un mois seraient sensibles à certains aspects du mouvement cohérent, car ils préfèrent les points en mouvement uniforme aux points statiques et les points en mouvement cohérent aux points incohérents (Wattam-Bell, 1996a). En effet, il a été démontré qu'à l'âge d'un mois, les nourrissons seraient insensibles à la direction, dans le

cadre des expériences conduites en regard préférentiel et en habituation (Wattam-Bell, 1996a, 1996b).

**Figure 2-3 :** Schéma démontrant l'émergence et l'amélioration des sensibilités à l'orientation, la direction et la disparité chez le nourrisson.



Adapté de Atkinson (2000)

Selon certains auteurs, la sensibilité au mouvement relatif (déformation) serait différente de celle du mouvement uniforme en translation, donc il y aurait peut-être des mécanismes et un développement différents dans les deux cas (Banton & Bertenthal, 1996, 1997). L'étude de Banton et Bertenthal (1996) a démontré que les enfants de 6, 12 et 18 semaines détectent le mouvement uniforme de façon équivalente (nystagmus optocinétique). Dannemiller et Freedland (1991) ont trouvé que les enfants de 20 semaines détectaient davantage les éléments unidirectionnels que les éléments en direction opposée (mouvement relatif). Par contre, il y a des différences méthodologiques importantes entre les études, comme une réponse mesurée par l'observation du nystagmus optocinétique comparée à une autre mesurée par regard préférentiel.

Vers l'âge de 3 mois, les enfants coderaient réellement la direction du mouvement, ce qui a été avancé par l'étude de Dobkins & Teller (1996). En effet, les

enfants de cet âge pourraient utiliser des mécanismes corticaux sélectifs à la direction pour détecter le contraste d'un réseau à une vitesse supérieure ou égale à 22.3 deg/sec. À l'aide de points aléatoires en mouvement (RDK), des auteurs ont démontré la précision avec laquelle les nourrissons de différents âges discriminent la direction du mouvement d'une région circulaire sur son arrière-plan présentant une autre direction. Ainsi, le seuil de discrimination de la direction serait indéterminé à six semaines, de 22 degrés à 12 semaines, et de 17 degrés à 18 semaines (Banton, Dobkins, & Bertenthal, 2001).

La sensibilité à la direction des nourrissons de plus de 2 mois serait confinée à un éventail de vitesses limitées qui s'élargit au cours du développement. Le seuil de vitesse maximal ( $v_{\max}$ , limite de vitesse supérieure en haut de laquelle il n'y a pas de direction globale perçue) augmente (Wattam-Bell, 1992, , 1996a) et le seuil de vitesse minimal ( $v_{\min}$ , limite de vitesse inférieure, sous laquelle le stimulus paraît statique) diminue avec l'âge (Bertenthal & Bradbury, 1992; Wattam-Bell, 1996a). L'étude de Wattam-Bell (1996a) démontre que les vitesses discriminées de leurs stimuli se situeraient entre 6.7 et 13.9 deg/sec pour les enfants de 10 semaines et entre 3.1 et 28.9 deg/sec à 13 semaines.

La littérature mentionne également qu'avec l'âge, la sensibilité à la cohérence du mouvement augmente. La manipulation de la cohérence des éléments permet d'obtenir une mesure psychophysique de la performance des mécanismes sensibles au mouvement du système visuel de l'observateur. La proportion minimale de points se déplaçant dans une même direction dans un patron de points en mouvement aléatoire, pour percevoir la direction globale du stimulus est mesurée en variant les proportions de cohérence des éléments. En d'autres mots, l'introduction graduelle d'éléments incohérents (bruit) est effectuée jusqu'à ce que l'on perde la perception d'une organisation globale du stimulus. Le seuil est défini comme étant la proportion de cohérence où 75% des réponses sont correctes, et la sensibilité est définie comme étant 1/seuil. Cette tâche demande donc une intégration des signaux locaux en mouvement pour pouvoir extraire la direction globale. La littérature démontre que les seuils de cohérence psychophysiques reflètent les mécanismes corticaux, plus particulièrement des neurones qui ont des propriétés

d'intégration, tel que pour l'aire MT/V5 (Baker, Hess, & Zihl, 1991; Braddick et al., 2001; Britten, Shadlen, Newsome, & Movshon, 1992; Newsome & Pare, 1988).

Wattam-Bell (1994) a étudié la sensibilité d'enfants de trois mois, au mouvement de points aléatoires. Un seuil de cohérence de 50% est rapporté, comparé à 5-7% chez l'adulte. Une étude a voulu mesurer les seuils de cohérence à la fois en regard préférentiel et par le nystagmus optocinétique (NOC) chez les mêmes nourrissons, âgés entre 6 à 27 semaines (Mason, Braddick, & Wattam-Bell, 2003). Les chercheurs ont démontré qu'avec des stimuli similaires, la sensibilité à la cohérence est meilleure lorsque mesurée à l'aide du NOC que par le regard préférentiel. De façon intéressante, des tendances développementales différentes a été démontré avec les deux techniques. En effet, la sensibilité à la cohérence par le NOC reste entre 20 et 25 % et ne s'améliore pas avec l'âge. Cependant, les mesures de regard préférentiel s'améliorent significativement avec le développement. Ces résultats permettent aux auteurs de conclure que les deux techniques s'adressent probablement à des mécanismes sélectifs à la direction différents, tel que sous-cortical pour le NOC et cortical pour la discrimination par le regard préférentiel. Ainsi, l'amélioration de la sensibilité reflèterait probablement la maturation des mécanismes corticaux.

#### **2.2.4.2 Développement de la perception de stimuli complexes**

Le développement des différents attributs de l'image semble suivre le cours de la hiérarchie du système visuel : du plus simple au plus complexe. Le développement des processus d'intégration semble survenir plus tard. La perception visuelle de stimuli complexes a été étudiée à l'aide de contours illusoire, avec un paradigme d'habituation chez des nourrissons de 4 mois (Johnson & Aslin, 1998). Les stimuli utilisés représentent un «bâton» dépassant au-dessus et en dessous d'un rectangle horizontal (boîte), en mouvements opposés. Tous les éléments du stimulus et le fond sont recouverts de la même texture (bruit) les parties du stimulus ne sont visibles que lorsque les éléments sont en mouvement (contours illusoire). Leurs résultats suggèrent qu'à 4 mois, l'enfant perçoit deux objets ségrégués et qu'il verrait les deux parties du bâton comme un seul, défini par des contours illusoire.

La perception des contours illusoirs chez les nourrissons, en regard préférentiel, a été évaluée avec des stimuli tout à fait différents (Curran, Braddick, Atkinson, Wattam-Bell, & Andrew, 1999). Le stimulus employé est composé de lignes sinusoïdales en oscillation, dont les extrémités sont alignés d'un côté (cible), ce qui donne à l'observateur adulte la forte illusion d'un contour vertical, comparé à l'autre côté où les extrémités se chevauchent (stimulus négatif). Ces contours subjectifs, ne sont aucunement définis par la luminance, demandant donc une analyse plus complexe, semblable à celle requise dans la perception de mouvement de 2<sup>e</sup> ordre. Leurs expériences ont démontré que les enfants âgés de huit semaines et plus préfèrent le côté contenant le contour illusoire, donc le perçoivent. Ainsi, les mécanismes non-linéaires nécessaires pour percevoir le contour illusoire seraient possiblement en place dans le système visuel du nourrisson, dès le jeune âge de deux mois. Rieth et Sireteanu (1994) ont aussi rapporté qu'à deux mois, le nourrisson démontre un comportement de regard préférentiel clair pour les lignes décalées d'un réseau, que pour des lignes continues. D'autres expériences ont établi que des enfants de 4-5 mois répondent à la présence d'un contour illusoire vertical et, contrairement aux enfants plus jeunes, ils peuvent même le discriminer d'un contour oblique (Sireteanu, 2000).

La perception du mouvement global chez les nourrissons, demandant une intégration des éléments locaux, a conduit à diverses études développementales. D'abord, l'enfant pourrait se construire une représentation cohérente d'une structure dynamique en rotation, via des mécanismes d'intégration globale. La discrimination du patron cohérent au stimulus incohérent a été démontrée à partir de l'âge de 7 mois (Spitz, Stiles, & Siegel, 1993). D'un autre côté, on a suggéré que des nourrissons âgés de 8 semaines soient capables de discriminer entre des patrons de mouvement (points aléatoires) qui contiennent une information de formes tridimensionnelles d'objets (Arterberry & Yonas, 2000).

La sensibilité des nourrissons au mouvement global de points aléatoires en mouvement vers la droite ou la gauche a été examinée par les réponses optocinétiques (NOC) d'enfants de 6, 12 et 18 semaines (Banton, Bertenthal, & Seaks, 1999). Étonnamment, plus les différentes directions des points divergeaient – demandant une

plus grande intégration – plus les performances des nourrissons déclinaient avec l'âge. Mentionnons que ces stimuli étaient parfaitement intégrés par l'observateur adulte. Les auteurs ont expliqué cet effet surprenant par le développement graduel de la sélectivité neuronale à la direction et par l'affinement de la taille des champs récepteurs. D'ailleurs, les champs récepteurs des jeunes chats (Rusoff & Dubin, 1977) et des jeunes singes (Blakemore & Vital-Durand, 1979) sont plus larges que ceux des animaux adultes. Après l'âge de 18 semaines (4 mois) chez les bébés, il y aurait une amélioration subséquente pour arriver au niveau de perception adulte, suggérant le développement de processus additionnels, comme des interactions de connexions latérales (*long-range*). Finalement, les auteurs suggèrent deux tendances développementales différentes pour le mouvement cohérent (uniforme : (Banton & Bertenthal, 1996)) et pour des distributions de directions (mouvement global), révélant des mécanismes distincts.

Le développement de l'intégration du mouvement chez des bébés de 2, 3, 4 et 5 mois a été investigué à l'aide de plusieurs réseaux de barres ségrégués dans l'espace par Karen Dobkins et collaboratrices (2004). Tous les groupes d'âges ont démontré une intégration significative des différentes composantes locales (réseaux) en un patron de mouvement cohérent (global), suggérant que les aires corticales de plus haut niveau, tel que l'aire MT/V5 serait fonctionnelle à un âge relativement précoce. De plus, l'effet d'intégration obtenu par leur paradigme expérimental diminue significativement avec l'âge, suggérant une réduction de l'étendue spatiale requise pour l'intégration avec le développement, en accord avec les conclusions de l'étude précédemment mentionnée (Banton, Bertenthal, & Seaks, 1999).

### **2.2.5 Que sont les stimuli de flux optique ?**

Afin de faciliter la compréhension de la section suivante, voici un survol des stimuli visuels de flux optique qui feront l'objet d'études dans la section expérimentale de la thèse, afin de mesurer la sensibilité de certaines populations d'enfants. Les stimuli de flux optique sont généralement composés de points aléatoires en mouvement (*Random Dot Kinematograms*, RDK). Ils simulent le mouvement rencontré lors de la locomotion dans l'environnement. La trajectoire des éléments peut suivre différents

types de mouvements : la translation (unidirectionnel : vers la droite ou la gauche), le mouvement radial (en expansion ou en contraction : simulant le flux optique rencontré lors du déplacement vers l'avant et de reculs dans l'environnement), la rotation (dans le sens ou inverse des aiguilles d'une montre) et possiblement la déformation (Koenderink, 1986).

### **2.2.6 Développement de la perception de flux optique**

Au moment de la conception de la première étude de cette thèse, en 2000-2001, très peu d'études n'avaient été publiées sur le développement de la sensibilité au flux optique chez le jeune enfant. Certaines études rapportaient une réactivité posturale en fonction d'un stimulus en mouvement vers l'enfant, très tôt dans la vie. En effet, lors d'une exposition à un stimulus s'approchant vers le nourrisson (*looming*), les bébés âgés de moins d'un mois réagissent significativement davantage par clignements d'yeux que lorsque stimulés par un mouvement qui s'éloignent d'eux, suggérant qu'à cet âge les enfants puissent percevoir une collision imminente spécifiée par une expansion optique (Nanez, 1988; Nanez & Yonas, 1994). Jouen & Lepecq (1989) ont enregistré les mouvements sagittaux de la tête chez 10 nouveau-nés, âgés de seulement trois jours. Des stimuli visuels périphériques bilatéraux leur ont été présentés, nommés «flux optique»; une alternance de zones sombres et lumineuses en mouvement (réseaux). Différents changements de pressions de la tête en phases de stimulation visuelle statique et dynamique ont été relevés (avec un critère d'une différence de pression d'au moins 10%), suggérant une certaine sensibilité ou un effet proprioceptif du flux optique sur la posture du nouveau-né.

C'est dans ce contexte que la première étude de la thèse a germé. Nous savions qu'une certaine sensibilité rudimentaire au flux optique existe tôt dans la vie, avec les études de réactivité posturales. Toutefois, nous n'avions pas encore d'indications sur le développement de la sensibilité authentique au mouvement de flux optique. Lors de la période de collecte de données de notre étude (présentée au Chapitre 5), une explosion d'études récentes est survenue portant sur notre sujet de prédilection. D'abord, une investigation menée par Gilmore et coll. (2004) a porté sur la discrimination de la

direction du *heading* du flux optique chez des nourrissons de 3 à 6 mois, à l'aide de différents types de stimuli de flux optique (terrestre, radial, plus réaliste: environnement 3D). Ces auteurs ont évalué si les poupons de cet âge pouvaient discriminer entre des patrons de flux optique qui spécifient des directions de *heading* différentes. Les résultats suggèrent qu'avant le début de la locomotion, la majorité des nourrissons discriminent entre des changements de direction larges, de plus de 22 degrés (vs moins de 1 degré chez l'adulte). Des résultats similaires ont été obtenus aux différentes manipulations des stimuli et peu de développement a été observé entre 3 et 6 mois. Les auteurs suggèrent donc que ces habiletés spatiales suivent une maturation prolongée et dépendent peut-être de l'expérience active de la locomotion.

Récemment, un groupe de chercheurs japonais s'est intéressé à la question, en utilisant la technique de regard préférentiel (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004b). Ces auteurs ont démontré, chez des nourrissons de 2 à 5 mois, une préférence (ratio de temps de regard) pour un flux optique en mouvement radial en expansion ayant un gradient de vitesses linéaires – qui donne une impression de profondeur - versus un stimulus sans gradient de vitesse. Une amélioration de la préférence mesurée a été rapportée entre 2 et 3 mois d'âge. Cette préférence ne serait pas due aux différences de composantes locales comme telles, mais plutôt à la perception de la profondeur du mouvement du flux en expansion. Une autre étude a été effectuée, sur la recherche visuelle d'un élément qui bouge en une direction donnée (ex : expansion), parmi des éléments qui bougent dans la direction opposée (ex : contraction) (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004a). Une asymétrie pour la direction d'expansion est rapportée, car tous les groupes des bébés (3 à 8 mois) sauf les bébés âgés de 2 mois, démontrent une préférence significative pour la condition de recherche de la cible en expansion. Aucune préférence n'est observée dans la condition contraire, de recherche de la cible en contraction. Une autre étude du même groupe rapporte une anisotropie opposée, pour la contraction du stimulus (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2006). Des nourrissons de 2 et de 3 mois ont été évalués, quant à leurs préférences aux stimuli soit d'expansion ou de contraction (cible), comparé à un stimulus de bruit de directions aléatoires («neutre»). Les bébés de 2 mois ne démontrent pas de préférence pour l'un ou l'autre des stimuli cibles. Par contre, les auteurs rapportent une «préférence négative» à l'âge de 3 mois,



pour le stimulus de contraction, mais aucune préférence significative pour l'expansion. Ainsi, une anisotropie du mouvement d'expansion et de contraction émergerait vers l'âge de 3 mois. Toutefois, cette étude comporte des failles méthodologiques et d'interprétation des résultats importantes qui seront discutés dans la section Discussion.

#### 2.2.6.1 Études posturales

Les études posturales ont évalué les effets du flux optique sur la réactivité posturale de l'enfant. Il appert qu'un mouvement de flux optique en oscillation induit un balancement corporel de l'enfant qui apprend à marcher (Lee & Aronson, 1974). Les jeunes enfants, qui viennent d'apprendre à marcher, ont de la difficulté à maintenir leur équilibre lorsque l'information visuelle est en conflit (Schmuckler, 1989; Stoffregen, Schmuckler, & Gibson, 1987). De plus, le mouvement d'oscillation produit dans une chambre mobile induit une réactivité posturale chez les enfants dès l'âge de 5 mois (Bertenthal & Bai, 1989; Bertenthal, Rose, & Bai, 1997). La réactivité posturale est observée chez les bébés serait plus élevée vers l'âge de 9 mois et diminuerait ensuite (Bertenthal, Rose, & Bai, 1997; Delorme, Frigon, & Lagace, 1989).

Les nourrissons avec expérience de locomotion présenteraient significativement plus de réactivité au flux optique périphérique des murs latéraux d'une chambre mobile que les enfants n'ayant pas encore d'expérience en locomotion (Higgins, Campos, & Kermoian, 1996). Cependant, aucune différence entre les groupes n'a été rapportée quant à leur réactivité lorsque les murs d'avant, de côté et du plafond bougent. Cette idée du rôle de la locomotion dans la réactivité au flux optique a été reprise par une autre étude, avec des nourrissons de 9 mois, avec ou sans expérience de locomotion. Seule une faible relation a été relevée entre le statut de la locomotion et la réactivité au flux optique global (toute la chambre) avec ou sans l'information provenant du plancher (Lejeune et al., 2006).

Des nourrissons âgés de 3 jours seulement réagiraient par des mouvements de «pas» de leurs membres inférieurs, lorsque soutenus au-dessus d'une stimulation visuelle de flux optique terrestre. Ainsi, sans la stimulation tactile sous les pieds, les nouveau-nés feraient davantage de «pas» dans cette condition de flux optique terrestre,

qui stimule le champ visuel inférieur avec un flux lamellaire avançant vers le sujet. Ces résultats intéressants sont tirés d'un résumé de conférence (Barbu-Roth et al., 2005).

### **2.2.7 Développement du flux optique : Objectifs et hypothèses**

Un nombre impressionnant d'études ont été effectuées dans le but de mieux saisir le développement de la perception du mouvement de l'enfant. Mais plusieurs aspects de la sensibilité au mouvement de l'enfant sont aujourd'hui encore peu connus, notamment au niveau de la perception du flux optique, bien qu'un intérêt évident est présentement en cours au niveau de la recherche internationale. Étant donné la complexité du flux optique, il serait probable que la discrimination de ce mouvement s'améliore lentement avec le développement de l'enfant, en concordance avec une maturation neuronale plus lente, d'une aire de plus haut niveau spécialisé dans cette analyse (MST). À ce jour, aucune étude n'a mesuré la sensibilité à la cohérence du mouvement de flux optique chez le jeune enfant.

Ainsi, la première étude, présentée au Chapitre 5, a comme objectif principal de déterminer la sensibilité à un mouvement complexe qu'est le flux optique, chez des jeunes enfants sur une large étendue d'âges afin d'évaluer la tendance de maturation. Des nourrissons normaux n'ayant pas, pour la plupart, encore expérimentés la locomotion ont été évalués. Des seuils de cohérence ont été mesurés, reconnus pour s'adresser aux mécanismes corticaux de sélectivité à la direction. La capacité des nourrissons de différents âges à percevoir le flux optique radial et à en discriminer la direction sera ainsi documentée. L'hypothèse proposée est que la sensibilité au mouvement radial devrait suivre une amélioration lente et progressive avec l'âge. La seconde hypothèse proposée est qu'une meilleure sensibilité au flux optique en expansion soit relevée chez les nourrissons, en accord avec un biais pour l'expansion du flux optique. Ces travaux présentent un intérêt considérable car ils évaluent le développement d'une fonction fondamentale à l'établissement d'un comportement visuo-moteur normal.

## **CHAPITRE 3**

## Perception visuelle de stimuli complexes

### 3.1 Le flux optique : un phénomène perceptif complexe

L'individu qui se déplace dans l'environnement perçoit un patron visuel en mouvement couvrant presque entièrement le champ visuel et qui diffère de ce qui est vu lorsque l'observateur est immobile (Wurtz, 1998). Lors d'un déplacement linéaire vers l'avant, les éléments qui sont stables dans l'environnement semblent prendre une trajectoire radiale, provenant du point vers lequel l'observateur se dirige, en s'agrandissant et en accélérant plus ils s'approchent de l'observateur.

Il y a une cinquantaine d'année, James J. Gibson (1950) a relevé la richesse d'informations dans ce phénomène stéréotypé et il a été le premier à le nommer «flux optique». Il a également noté que les différentes manifestations du flux optique allient les effets de tout mouvement de l'observateur dans l'espace tridimensionnel afin de lui fournir une information visuelle utile pour stabiliser la posture, révéler la structure environnementale et guider la locomotion dans l'estimation de la direction de l'endroit vers laquelle il se dirige («*heading*») (Gibson, 1950, 1966, 1979, 1986; Gibson, Olum, & Rosenblatt, 1955).

Tout mouvement de soi consiste en une translation le long des trois axes dans l'espace (x, y, z) ou une rotation autour de ces mêmes axes. Ainsi, selon Duffy et Wurtz (1995), tout flux optique consiste en un patron visuel d'éléments en mouvement perçu, créé par l'une de ces composantes de mouvement dans l'espace. Koenderink (1986) a divisé le flux optique en quatre composantes élémentaires : la rotation pure, la translation uniforme, la divergence pure (expansion ou contraction radiale) et la déformation. Le mouvement radial en expansion, perçu lors d'un déplacement vers l'avant, est d'une importance particulière puisqu'il décrit fréquemment le mouvement des objets dans une scène visuelle tridimensionnelle (Atchley & Andersen, 1998). Or, ce mouvement requiert une analyse plus complexe, étant composé de plusieurs directions divergentes à intégrer (Niemann, Lappe, Buscher, & Hoffmann, 1999). La Figure 3-1 illustre le patron de mouvement de flux optique perçu lors de la locomotion

vers l'avant; les éléments de l'environnement prennent alors une trajectoire radiale et s'accélèrent plus ils s'approchent de l'observateur.

**Figure 3-1** : Illustration d'un flux optique rencontré lors de la locomotion



Source : Photo M-J Legault (<http://www.parcdescampeurs.com/hiver/photos/photo31.html>)

### **3.1.1 Perception du flux optique : études psychophysiques**

Les études effectuées chez l'adulte, en majorité psychophysiques, ont démontré l'utilité du flux optique et la puissance de ce signal, en plus d'avoir confirmé les affirmations de Gibson. D'ailleurs, il a été démontré que le flux optique est utilisé lors de la navigation en raison de la prévisibilité de ses indices (Crowell & Banks, 1993; van den Berg, 1992).

Le signal visuel peut être très important quant au contrôle de la posture verticale, puisque des sujets immobiles exposés à une simulation de flux optique ont l'impression d'être en mouvement (illusion devection) (Lee, 1980). L'information visuelle aurait

également une influence sur le contrôle de l'équilibre. Plusieurs études ont démontré ce rôle sur l'équilibre: un rôle stabilisateur lorsque l'information visuelle était appropriée à la proprioception (Dichgans, Mauritz, Allum, & Brandt, 1976; Paulus, Straube, Krafczyk, & Brandt, 1989) et déstabilisateur lors d'un conflit (Berthoz, Pavard, & Young, 1975; Bronstein, 1986; Dijkstra, Schoner, & Gielen, 1994).

Le flux optique serait également utilisé dans le but d'estimer rapidement et efficacement la direction vers laquelle nous nous dirigeons (*heading*) (Crowell & Banks, 1993; Perrone & Stone, 1994; Royden, Crowell, & Banks, 1994). Il a été démontré, par une tâche de jugement psychophysique que la direction de la destination (*heading*) peut être trouvée à partir du champ de vitesse du flux optique (Warren, Blackwell, Kurtz, Hatsopoulos, & Kalish, 1991). Dans un patron de mouvement radial simple, sans mouvements oculaires, le centre d'expansion du mouvement peut être utilisé comme un indicateur de la destination (Warren, Morris, & Kalish, 1988).

Dans leur modèle, Perrone & Stone démontrent que notre direction (*heading*) serait estimée en utilisant des détecteurs de mouvements complexes, tel que les neurones de MSTd, qui agissent comme des gabarits pour des exemples spécifiques de mouvement induit par la locomotion dans la scène visuelle (Perrone & Stone, 1994, , 1998).

L'étude de Burr et collaborateurs a démontré que la sommation spatiale survient sur des aires très larges dans le champ visuel, suggérant que les champs récepteurs (CR) impliqués dans la détection du flux optique soient très larges, permettant une analyse «globale» du mouvement (Burr, Morrone, & Vaina, 1998). D'ailleurs, la littérature avance que les mécanismes qui analysent le mouvement complexe de patron de flux optique dépendent de mécanismes de plus bas niveaux, qui encodent les mouvements locaux uniformes en translation (Kim & Turano, 1999; Orban et al., 1992; Perrone & Stone, 1994; Warren & Saunders, 1995). On a démontré que la simple combinaison des mouvements locaux en translation peut prédire les seuils de discrimination de vitesse pour l'expansion du mouvement, appuyant ainsi l'hypothèse que les entrants locaux sont combinés en un détecteur de plus haut-niveau (détecteur de *looming*) (Sekuler, 1992). Ceci suggère qu'une étape initiale de traitement du mouvement local en translation est

nécessaire avant de procéder à un niveau ultérieur d'intégration, où des mécanismes spécialisés, des détecteurs de mouvement global, sont sélectifs au mouvement complexe. En effet, des méthodes différentes sont utilisées en fonction des étapes visées de l'analyse de ce mouvement, tel que des mesures de sensibilité au contraste et à la cohérence du mouvement pour s'adresser respectivement à des mécanismes de bas et de plus hauts niveaux (Morrone, Burr, & Vaina, 1995).

Les études ayant mesuré la sensibilité à la vitesse de stimuli complexes ont relevé que le mouvement radial en expansion paraît plus rapide que les autres types de mouvement (Bex & Makous, 1997; Clifford, Beardsley, & Vaina, 1999; Geesaman & Qian, 1998). Par contre, les seuils de détections mesurés pour le mouvement radial, en rotation et en spirale sont similaires (Burr, Badcock, & Ross, 2001; Meese & Anderson, 2002) et des sensibilités similaires pour le mouvement radial et en rotation sont rapportées (Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). Mais une étude a démontré une sensibilité plus grande pour les directions radiales, comparé à la rotation (Beardsley & Vaina, 2005).

Des recherches ont été effectuées afin de déterminer si notre système visuel utilise des décompositions «cardinales» (i.e. mouvement radial et de rotation) ou différents mécanismes sélectifs à des éventails plus larges de directions du flux, pour représenter le mouvement global de flux optique. Des données expérimentales suggèrent l'existence de mécanismes sélectifs ou de détecteurs spécialisés, pour l'analyse des directions cardinales dans l'espace de mouvement global (Burr, Badcock, & Ross, 2001; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). Ceci renforce l'hypothèse que le patron de flux optique puisse être représenté par un nombre minimal de vecteurs (Freeman & Harris, 1992; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999; Te Pas, Kappers, & Koenderink, 1996).

Mentionnons également l'hypothèse de détecteurs spécialisés, tel que des détecteurs d'objets en expansion (*looming*) qui seraient établis dans le système visuel humain et qui répondrait sélectivement à l'expansion. Par exemple Regan & Beverley (1978b) ont démontré que l'adaptation à l'expansion diminue la sensibilité visuelle à l'expansion. De plus, ils ont observé des différences entre les disparitions des effets

consécutifs de mouvement induits par l'expansion/contraction et ceux induits par la translation (Beverley & Regan, 1979).

Enfin, les études psychophysiques portant sur la cohérence des stimuli en mouvement indiquent l'existence de mécanismes spécifiques aux patrons de mouvement distincts de ceux qui analysent la direction du mouvement (Burr, Badcock, & Ross, 2001; Burr, Morrone, & Vaina, 1998; Meese & Anderson, 2002; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999; Morrone, Burr, & Vaina, 1995).

### **3.1.2 Études neurophysiologiques**

Chez le primate, plusieurs études électrophysiologiques démontrent que les neurones de la région dorsale de l'aire médiane supérieure temporale (MSTd) ont de grands champs récepteurs (CR) et répondent de façon sélective aux différentes directions des stimuli de flux optique, tel que le mouvement radial (expansion et contraction) et de rotation (sens horaire ou anti-horaire) (Duffy & Wurtz, 1991a, 1991b; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994; Lagae, Maes, Raiguel, Xiao, & Orban, 1994; Orban et al., 1992; Saito et al., 1986; Tanaka, Fukada, & Saito, 1989; Tanaka & Saito, 1989). L'aire MST est une aire corticale de haut niveau qui reçoit directement l'information de son aire voisine; l'aire médiane temporale (MT) (Maunsell & Van Essen, 1983a). Le parcours de l'information visuelle en mouvement est analysé le long de la voie dorsale, à partir de l'aire V1 et se projette vers les aires corticales pariétales, telles que MT et ensuite MST (Boussaoud, Ungerleider, & Desimone, 1990). Les neurones de l'aire MT, ayant de plus petits CR, sont sélectivement activés par des patrons moins complexes, en mouvement de translation (Newsome & Pare, 1988). Ainsi, il est proposé que la sélectivité des cellules MST aux patrons de mouvement complexes soit le résultat de l'intégration d'entrants plus simples. Ces neurones répondent à un large éventail de vitesses et démontrent une invariabilité de la réponse aux changements de taille du stimulus (Duffy & Wurtz, 1991b; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994). On rapporte qu'une majorité de cellules préfère que l'information de vitesse soit spatialement structurée, avec des gradients de vitesse (i.e. accélération / décélération des éléments composant le stimulus) (Duffy & Wurtz, 1997).



L'étude de Britten et van Wezel (1998) a soutenu l'hypothèse selon laquelle l'aire MST contribue à l'analyse requise pour déterminer la direction du «*heading*» dans le flux optique. Il a été également suggéré que les neurones de cette aire intègrent les signaux visuels et vestibulaires associés à la locomotion (Bremmer, Kubischik, Pikel, Lappe, & Hoffmann, 1999; Duffy, 1998). Notons également que l'information visuelle du flux optique ne s'arrête pas à l'aire MST. Il a été démontré que d'autres aires qui reçoivent l'information de MST (Boussaoud, Ungerleider, & Desimone, 1990) répondent aux stimuli de flux optique, telles que le cortex intra-pariétal ventral (VIP) (Bremmer, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 2000; Schaafsma & Duysens, 1996), l'aire 7a (Siegel & Read, 1997) et l'aire temporale supérieure-antérieure (STPa) (K. C. Anderson & Siegel, 1999). Les neurones de ces régions corticales ont également des CRs très larges et présentent de fortes préférences pour des mouvements radiaux, en rotation, en spirale et en translation. Chez d'autres espèces, comme le chat, une région particulière, la zone postéro-médiane du cortex suprasylvien latéral serait également spécialisée dans l'analyse du flux optique (Brosseau-Lachaine, Faubert, & Casanova, 2001; J. N. Kim, Mulligan, & Sherk, 1997).

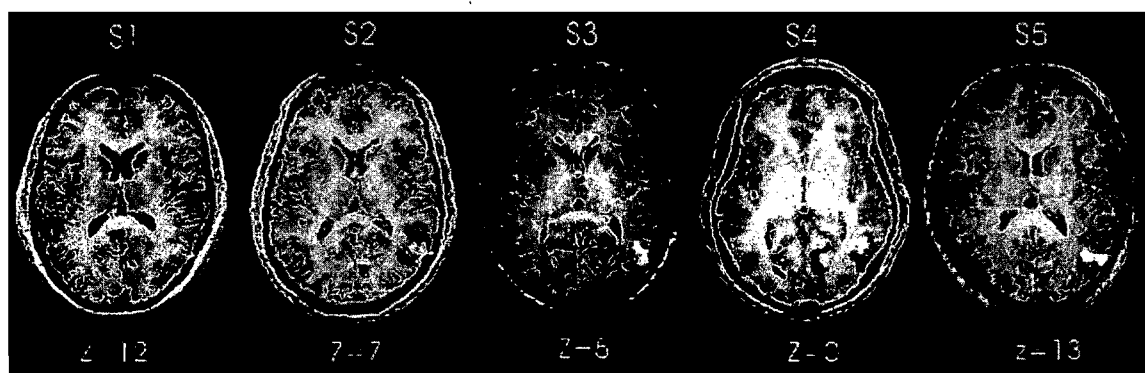
Ainsi, la région corticale MSTd joue un rôle important dans l'analyse de l'information contenue dans le flux optique (Wurtz, 1998). Par le fait même, cette région serait probablement impliquée dans le contrôle de la locomotion (Orban, 1997).

### **3.1.3 Études d'imagerie cérébrale**

La venue des techniques d'imageries a démontré la localisation des régions corticales spécifiquement activées par le mouvement de flux optique, dans le cerveau humain. Celles-ci ont également suggéré l'existence de détecteurs spécialisés dans l'analyse du flux optique. En effet, une étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) chez l'adulte a démontré l'activation sélective d'une aire dans le cortex temporo-occipital, aux composantes du flux optique, tel que le mouvement radial et de rotation. Cette région particulière fait partie du complexe MT/V5 (MT+) et serait distincte de la portion qui est activée par un mouvement de translation. Ceci démontre des subdivisions fonctionnelles à l'intérieur du complexe MT+, qui serait l'analogue

humain des régions MT-MST chez le macaque (Morrone et al., 2000). L'étude de Ptito et collaborateurs effectuée en imagerie TEP, a démontré une activation aux aires V2-V3 et le lobule pariétal supérieur (BA 7), davantage à l'hémisphère droit pour le flux optique radial (Ptito, Kupers, Faubert, & Gjedde, 2001). L'étude de Dukelow a également démontré par l'IRMf des sous-régions distinctes de l'aire MT+, correspondant aux aires MSTd ou MSTl selon la stimulation visuelle (Dukelow et al., 2001). Ainsi, ils illustrent des sous-régions du complexe MT+ de l'humain qui seraient organisées de façon similaire aux régions bien connues du primate.

**Figure 3-2 :** Illustration des sous-régions du complexe MT+ chez l'humain



Coupes axiales de 5 sujets démontrant que la position de l'aire MT (en rouge) est toujours située de façon postérieure à l'aire MST (en jaune) chez tous les sujets (Dukelow et al., 2001).

### 3.1.4 Biais pour l'expansion du mouvement radial

La littérature portant sur les études électrophysiologiques animales démontre clairement ce biais pour l'expansion des stimuli de flux optique radiaux. En effet, une prépondérance en nombre de la sélectivité à l'expansion du mouvement radial, sur les autres types de directions du flux optique, est démontrée dans l'aire MSTd (Duffy & Wurtz, 1991a; Geesaman & Andersen, 1996; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994), l'aire 7a (Read & Siegel, 1997; Siegel & Read, 1997), l'aire STPa (Anderson & Siegel, 1999), l'aire VIP (Schaafsma & Duysens, 1996) du primate et le cortex suprasylvien latéral (LS) du chat (Brosseau-Lachaine, Faubert, & Casanova, 2001). Selon les études, certains auteurs ont rapporté sept fois plus de cellules sélectives à l'expansion que de

cellules sélectives à la contraction dans l'aire MST (Tanaka & Saito, 1989) et d'autres rapportent un ratio de 6:1 (Lagae, Maes, Raiguel, Xiao, & Orban, 1994). De plus, le ratio serait d'environ 3:1, si l'on compare les neurones de MSTd sélectifs aux stimuli d'expansion, comparativement aux autres directions de rotation (Duffy & Wurtz, 1991a; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994; Saito et al., 1986; Tanaka & Saito, 1989).

Par ailleurs, une préférence marquée en faveur des directions centrifuges – i.e. qui s'orientent vers l'extérieur de l'aire centrale - est relevée pour les CR d'aires corticales sélectives à la direction du mouvement, tel que MT chez le primate et le cortex suprasylvien latéral chez le chat (Albright, 1989; Rauschecker, von Grunau, & Poulin, 1987). De plus, ceci est accompagné par des vitesses préférées qui augmentent avec l'excentricité (Rauschecker, von Grunau, & Poulin, 1987). Cette organisation de préférences de directions radiales et de vitesses correspond bien au déplacement caractéristique des éléments générés lors de la locomotion vers l'avant.

Chez l'humain, les études psychophysiques portant sur l'analyse du mouvement complexe n'ont pas clairement démontré ce biais pour l'expansion, tel que rapportée chez l'animal (Beardsley & Vaina, 2005; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). En effet, aucune différence n'a été rapportée entre le mouvement radial et de rotation, pour la discrimination dans un patron bruité (Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). De plus, les études utilisant la détection de la cohérence du mouvement démontrent des seuils similaires pour tous les types de patrons de flux optique (Burr, Badcock, & Ross, 2001; Meese & Anderson, 2002). Beardsley & Vaina (2005) notent toutefois l'incontestable similitude entre ce biais pour l'expansion rapporté dans la littérature animale et le biais pour le mouvement radial. En effet, ils ont rapporté une meilleure sensibilité pour le mouvement radial comparativement au mouvement en rotation, à l'aide d'une nouvelle tâche de discrimination du changement de la direction globale du stimulus de mouvement complexe. En outre, l'étude de Geesaman & Qian (1996) démontre que des patrons de RDK en expansion semblent bouger plus rapidement que ceux en rotation. Pour expliquer cette illusion d'une magnitude d'environ 30%, ceux-ci suggèrent que cette différence entre la vitesse perçue et réelle du

mouvement d'expansion puisse être un corrélat perceptif de l'anisotropie des réponses électrophysiologiques pour l'expansion.

Par ailleurs, une anisotropie des réponses au mouvement en profondeur en faveur d'objets qui approchent vers soi est rapportée dans la littérature (Lewis & McBeath, 2004; Perrone, 1986). De plus, un biais pour l'expansion a été démontré à partir de simple temps de réactions à l'apparition du stimulus, suggérant une anisotropie pour le mouvement centrifuge (Ball & Sekuler, 1980). Par contre, une étude rapporte une sensibilité plus importante pour le mouvement centripète, correspondant à la contraction, avec des mesures de seuils de mouvement global (Edwards & Badcock, 1993).

Takeuchi (1997) a utilisé un paradigme de recherche visuelle, pour mesurer la rapidité à laquelle l'observateur détecte la cible en expansion (ou contraction) parmi d'autres éléments en contraction (ou expansion). Les résultats démontrent une asymétrie pour la détection de l'expansion qui est plus rapide que pour la contraction. Contrairement aux résultats obtenus pour la recherche de l'élément en contraction (recherche sérielle), le temps requis pour la détection de l'expansion semble indépendant du nombre de distracteurs présents (recherche en parallèle). Tel que proposé par von Grünau et Dubé (1994), une explication écologique est avancée pour une telle asymétrie entre l'expansion et la contraction, ils proposent ainsi une plus grande sensibilité pour les détecteurs de mouvements qui répondent davantage aux objets qui avancent vers l'individu.

Par ailleurs, des résultats d'une étude d'imagerie fonctionnelle ont démontré une activation plus importante des régions impliquées à la direction d'expansion que pour la contraction d'un stimulus de flux optique (Ptito, Kupers, Faubert, & Gjedde, 2001).

Certains auteurs avancent que l'existence de ce biais pour l'expansion ou pour le mouvement d'un objet s'approchant, est liée au fait que les humains évoluent dans un contexte où ils se déplacent vers l'avant et non de reculons (Perrone, 1986). Également, d'un point de vue évolutif, les objets qui approchent de nous sont bien plus pertinents que d'autres qui bougent en rotation, par exemple (Geesaman & Qian, 1996).

## **3.2 Traitement de premier- et de deuxième-ordre**

Les théories de la perception du mouvement chez l'humain ont proposé l'existence d'au moins deux processus distincts dans cette analyse (Braddick, 1980; Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988). Un traitement de «premier-ordre» et un second de «deuxième-ordre» seraient impliqués, selon les caractéristiques du stimulus (Cavanagh & Mather, 1989). La majeure partie de la compréhension actuelle de la perception visuelle a été réalisée à l'aide de stimuli de premier ordre, définis par des variations spatio-temporelles de luminance. Mais une classe de stimuli plus complexe a été isolée, les stimuli de deuxième-ordre, qui seraient invisible aux détecteurs simples du système visuel, mais pourtant bien perceptible par les observateurs.

### **3.2.1.1 Stimuli de premier-ordre**

Le mouvement de premier ordre est un mouvement de type simple. Il est également appelé mouvement linéaire ou Fourier (Lu & Sperling, 2001; Wilson, Ferrera, & Yo, 1992). Ce mouvement est défini par des variations spatio-temporelles de luminance de l'image rétinienne. Le réseau sinusoïdal défini par la luminance, un patron foncé à clair, est un stimulus de premier ordre abondamment utilisé. Des filtres linéaires, neurones de l'aire visuelle primaire (V1), signalent le patron modulé par la luminance selon sa correspondance à leurs profils spatiaux et temporels. En effet, le neurone détecte les différences de luminance moyenne du stimulus en effectuant une sommation linéaire de l'excitation et de l'inhibition des régions de son champ récepteur (Hubel & Wiesel, 1962; Movshon, Thompson, & Tolhurst, 1978).

Ce type de stimulus est fréquemment utilisé dans les études, tel qu'en neurophysiologie, pour caractériser les propriétés de bases des neurones (Baker, 1999). Les étapes initiales à l'extraction du mouvement de premier-ordre ont été étudiées de façon extensive par les études physiologiques (Hubel & Wiesel, 1968) et psychophysiques (Anderson & Burr, 1987).

### 3.2.1.2 Stimuli de deuxième-ordre

Le mouvement de deuxième ordre est un mouvement de type complexe, également nommé non-linéaire ou non-Fourier. Dans ce cas-ci, le mouvement n'est pas défini par la luminance, mais par des variations d'autres propriétés de l'image, comme le contraste, la texture, la fréquence spatiale ou le papillotement (*flicker*) (Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988).

Le patron de mouvement de deuxième ordre le plus étudié est sans doute le stimulus modulé par le contraste (voir Figure 3-3). Un tel stimulus est habituellement composé d'un patron «porteur» (*carrier*) souvent de haute fréquence (ex: bruit aléatoire bidimensionnel) modulé par une enveloppe de basse fréquence (ex: sinus modulant l'amplitude du contraste du porteur). Il s'avère que l'on perçoit le mouvement sans qu'il y ait d'énergie détectée par un système linéaire ou Fourier. Ces variations de contraste sont invisibles aux neurones ayant des filtres linéaires, car la luminance moyenne est équivalente dans les différentes zones des champs récepteurs.

Il est toutefois rare de retrouver de l'information de deuxième-ordre pure dans l'environnement; c'est plutôt un phénomène de laboratoire. Mais il est possible d'en retrouver dans certaines situations comme lors de la détection d'un objet en mouvement ayant une surface texturée. Par exemple lorsque l'on détecte la présence d'un insecte bien camouflé, en raison de son déplacement sur un lit de feuilles mortes. Ce type de mouvement serait aussi impliqué dans la perception de contours illusoire et lors de la ségrégation figure-fond (Baker, 1999; Derrington & Henning, 1993). Toutefois, en général, il est plus fréquent de trouver les deux types d'indices dans des situations communes.

Les mécanismes corticaux seraient distincts pour détecter chacune des classes, tôt dans le système visuel (Baker, 1999; Chubb & Sperling, 1988; Clifford & Vaina, 1999; Wilson, Ferrera, & Yo, 1992). L'analyse de second-ordre demanderait un traitement additionnel, donc une analyse corticale plus complexe que pour l'analyse de patrons de premier-ordre, qui se ferait par l'intermédiaire de filtres linéaires simples.

**Figure 3-3** : Exemple de stimuli de premier- et de deuxième-ordre

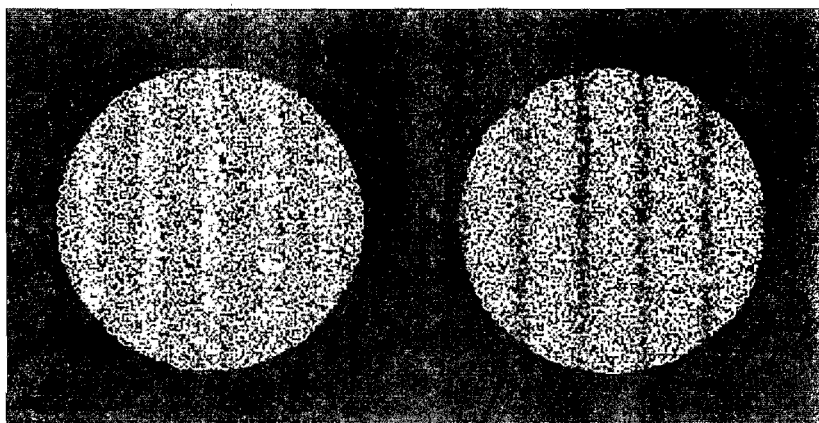


Illustration représentant un stimulus de premier-ordre, à gauche et un de deuxième-ordre, à droite.

Il existerait des neurones spécialisés dans l'analyse de second-ordre, présents tôt dans le système, qui feraient une opération non-linéaire pour détecter les différences de contraste ou de texture entre des régions qui ont la même luminance moyenne. Tout d'abord, le traitement de l'information se ferait à l'aide de filtres linéaires qui détermineraient la sélectivité de la fréquence spatiale du porteur (le bruit, le *carrier*). Ensuite, cette opération serait suivie d'une étape de traitement supplémentaire, une rectification du signal de l'image (non-linéaire). Enfin, il y aurait un dernier filtre linéaire afin de déterminer la sélectivité spatiale et temporelle de l'enveloppe (Baker, 1999). Finalement, l'information serait transmise aux régions extrastriées responsables de l'analyse du mouvement (MT/V5) ou de la forme (V4) (Ledgeway & Smith, 1994a; Vaina, Makris, Kennedy, & Cowey, 1998).

Un grand nombre d'études suggère une analyse des signaux de premier- et de deuxième-ordre par des canaux séparés, bien qu'il n'y ait pas de consensus clair sur le nombre de canaux impliqués (Lu & Sperling, 2001). Cette dissociation quant à l'analyse des deux types de mouvements a été démontrée par plusieurs études psychophysiques.

### 3.2.2 Perception de stimuli simples et complexes

Des évidences psychophysiques appuient l'hypothèse selon laquelle il y a deux traitements indépendants, tôt dans le système, analysant les deux types d'informations. Par exemple, un réseau de premier-ordre (simple) en mouvement provoque un nystagmus optocinétique (NOC), qui est une réponse de mouvement oculaire à un large patron de mouvement de translation. Tandis qu'un stimulus de deuxième-ordre (complexe), de visibilité équivalente ne provoque pas le réflexe (Harris & Smith, 1992). Des chercheurs ont démontré que la discrimination à la direction échoue lorsque des séquences d'images des deux types de mouvements (1<sup>e</sup> et de 2<sup>e</sup> ordre) sont présentées ensemble et doivent être intégrées pour détecter le mouvement, tandis que la direction des stimuli est détectée lorsque les multiples séquences d'images sont définies par la même caractéristique (ex : seulement premier-ordre) (Ledgeway & Smith, 1994a; Mather & West, 1993). On démontre également que le mécanisme détectant le mouvement de premier-ordre serait insensible aux stimuli de l'autre classe de mouvement. De plus, plusieurs variétés de mouvement de deuxième-ordre seraient détectées par le même mécanisme (Ledgeway & Smith, 1994a).

Dans un même ordre d'idées, Nishida et ses collaborateurs (Nishida, Ledgeway, & Edwards, 1997) rapportent que l'adaptation à un type de stimulus n'affecte pas le seuil de perception de mouvement pour l'autre type. Le paradigme d'adaptation est habituellement utilisé pour étudier les différents canaux impliqués dans le système. En effet, leurs expériences démontrent une élévation du seuil du mouvement de premier-ordre, sélectif à la fréquence spatiale, en adaptant seulement avec des stimuli de 1<sup>e</sup> ordre et une élévation spécifique du seuil de mouvement de 2<sup>e</sup> ordre en adaptant seulement avec un stimulus du même ordre. Aussi, le transfert d'adaptation entre les types de stimuli est faible et peu spécifique, appuyant l'idée de mécanismes qui analysent séparément le mouvement des deux classes de stimuli. Les résultats suggèrent également que chacune des voies, qui détecteraient séparément les types de mouvements, consiste en deux canaux de bandes passantes multiples sélectifs à différentes fréquences spatiales et seraient essentiellement indépendantes.



D'autres travaux ont évalué l'effet des artéfacts de premier-ordre (provenant de biais locaux stochastiques dans le bruit statique) dans la perception du mouvement de second-ordre. Lorsque le stimulus de deuxième-ordre utilisé n'a pas d'artéfacts de premier-ordre, les observateurs ne peuvent pas distinguer la direction du mouvement de deuxième-ordre au niveau du seuil. D'ailleurs, les seuils de discrimination à la direction du mouvement sont beaucoup plus élevés (environ 50%) que les seuils de discrimination d'orientation de réseaux, lorsque les artéfacts de premier-ordre sont éliminés. Ils confirment ainsi qu'avec l'utilisation de stimuli de second-ordre «purs», un mécanisme spécialisé, sensible au mouvement de deuxième-ordre, serait présent (Smith & Ledgeway, 1997).

Schofield et Georgeson (1999) ont démontré que le seuil de détection pour chacun des deux types de stimuli stationnaires – premier (bruit défini par la luminance) et deuxième-ordre (bruit défini par le contraste) - peuvent être spécifiquement facilités par des arrière-plans du même ordre, mais ne sont pas facilités par des stimuli d'ordres différents. En effet, des arrière-plans de réseaux étaient présents dans les intervalles. Ils ont donc trouvé une presque indépendance des mécanismes de détection des deux types de stimuli en utilisant une variété de méthodes (sommation sous le seuil, détection mixte, identification au seuil). Mentionnons également que les observateurs sont beaucoup moins sensibles aux stimuli de second-ordre qu'à n'importe quel type de réseau de premier-ordre.

Le mouvement défini par la couleur (petits Gabors chromatiques) serait directement détecté seulement par les mécanismes de mouvement de deuxième-ordre (Baker, Boulton, & Mullen, 1998). D'autres groupes de chercheurs ont rapporté que l'enveloppe de contraste des stimuli de deuxième-ordre est mieux détectée au niveau des basses fréquences temporelles que les stimuli de premier-ordre (Derrington, Badcock, & Henning, 1993; Derrington & Cox, 1998; Smith & Ledgeway, 1998). Cependant, la suggestion d'un système plus lent et à faible résolution temporelle a été récemment remise en question par Schofield et Georgeson (2000). Au niveau des caractéristiques spatiales de la voie du deuxième-ordre, une étude démontre un transfert presque complet d'orientations mais pas des fréquences spatiales, suite à l'adaptation à la position dans

l'espace, contrairement au premier-ordre. Ce qui suggère que les mécanismes corticaux responsables de l'adaptation à la position maintiennent l'information des fréquences spatiales et deux traitements distincts sont également proposés (McGraw, Levi, & Whitaker, 1999). Également, les deux types de mouvements exhiberaient différents degrés de vulnérabilité à l'interférence des stimuli de masques (Bex & Baker, 1997; Derrington & Ukkonen, 1999; Lu & Sperling, 1996).

L'implication possible du système de second-ordre dans l'analyse du flux optique a été suggérée, en ayant découvert un biais spécifique du deuxième-ordre pour la direction du mouvement centrifuge en expansion (Dumoulin, Baker, & Hess, 2001). Ces résultats sont en accord avec une étude ayant démontré la contribution des mécanismes de mouvements de premier- et de deuxième-ordres à la vection, qui est une sensation illusoire de bouger, induite par un stimulus de flux optique (Gurnsey, Fleet, & Potechin, 1998).

### **3.2.2.1 Perception du mouvement global complexe**

La perception du mouvement global de deuxième-ordre a été adressée, avec des stimuli de points aléatoires en mouvement (RDKs) dans lesquels les points sont définis par la variation spatiale du contraste (Ledgeway, 1999). La perception du mouvement global requiert l'intégration spatiale et temporelle de différents vecteurs de mouvements locaux. Une intégration corticale relativement de haut niveau est donc requise (Watamaniuk, Sekuler, & Williams, 1989; Williams & Phillips, 1987; Williams, Phillips, & Sekuler, 1986). Des évidences suggèrent que le mouvement local soit extrait par des mécanismes semblables à ceux utilisés pour le mouvement de premier-ordre (Cavanagh & Mather, 1989; Nishida, Ledgeway, & Edwards, 1997; Smith, Hess, & Baker, 1994). Les résultats de l'étude démontrent que les observateurs ont un seuil de discrimination de la vitesse de l'ordre de 8%, la vitesse globale perçue aurait tendance à diminuer à mesure que la bande-passante de vitesses augmente. Les seuils de discrimination à la direction étaient plus bas (4 deg.) lorsque l'éventail de directions différentes était inférieur à 90 deg., car en haut de cette valeur, les seuils augmentaient. La similarité entre les résultats de cette étude et de d'autres ayant employé des RDKs de

premier-ordre, suggère que l'extraction de la vitesse ou de la direction globale des points de premier- et de deuxième-ordre soit basée sur des principes d'analyses analogues.

### **3.2.2.2 Études sur l'effet consécutif du mouvement**

Les mouvements de premier- et de deuxième-ordre diffèrent quant à leurs habiletés à induire un effet consécutif du mouvement, suggérant des mécanismes neuronaux différents. L'effet consécutif du mouvement est un phénomène qui est induit suite à l'adaptation prolongée d'un stimulus en mouvement unidirectionnel, qui résulte en une perception de mouvement illusoire en direction opposée, à la présentation d'un stimulus statique (Wohlgemuth, 1911). Le mouvement de deuxième-ordre, contrairement aux stimuli définis par la luminance, n'induit peu ou pas d'effet consécutif du mouvement sur un fond immobile (Derrington & Badcock, 1985; Mather, 1991; Turano & Pantle, 1985). Cependant, un fond dynamique (mouvements de directions ambiguës) induit le phénomène de l'effet consécutif du mouvement suite à une exposition au 2<sup>e</sup> ordre (Gurnsey, Fleet, & Potchin, 1998; Ledgeway, 1994; Ledgeway & Smith, 1994b; Nishida, Ashida, & Sato, 1994). Les résultats des différentes études mentionnées ont été interprétés en suggérant que l'effet consécutif «statique» reflète l'activité d'un système de bas niveau (neurones sélectifs à la direction de V1), dominant l'analyse du mouvement de premier-ordre. Tandis que l'effet consécutif «dynamique» révélerait davantage le comportement d'un système de haut niveau (MT/V5), à un degré supérieur du système visuel, dans lequel les signaux des deux types de mouvements seraient intégrés et analysés (Nishida & Ashida, 2000; Nishida, Ashida, & Sato, 1994; Nishida & Sato, 1995). En effet, l'effet consécutif «dynamique» semble refléter une activité corticale de plus haut niveau dans la hiérarchie visuelle puisque leur amplitude est caractérisée davantage par la vitesse du stimulus que par la fréquence temporelle (Ashida & Osaka, 1995).

### **3.2.2.3 Études neurophysiologiques des stimuli simples et complexes**

L'information de deuxième-ordre (complexe) serait détectée par des neurones spécialisés dans l'analyse de ce type de mouvement. Ces neurones sont présents au niveau du cortex extrastrié (Albright, 1992), également à l'aire 17 (V1) et surtout au

niveau de l'aire 18 (V2). Des études ont relevé les réponses neuronales de l'aire V2 du singe à la présentation de stimuli de contours illusoires (Grosf, Shapley, & Hawken, 1993; Peterhans & von der Heydt, 1991). Également, les travaux du groupe de Baker ont démontré une dissociation fonctionnelle en étudiant les réponses des cellules de l'aire 17 et 18 du chat aux stimuli de deuxième-ordre (Mareschal & Baker, 1998a, , 1998b, , 1999; Zhou & Baker, 1993, , 1996). Le stimulus utilisé est un réseau sinusoïdal statique de haute fréquence spatiale (*carrier*) dont le contraste est modulé par une enveloppe sinusoïdale dynamique de faible fréquence spatiale. Environ la moitié des cellules de l'aire 18 répondent aux stimuli de second-ordre. Mentionnons que ces cellules répondent également au stimulus de 1<sup>e</sup> ordre, défini par la luminance. En effet, dans l'environnement, l'information de deuxième ordre survient rarement seule, mais plutôt en concomitance avec l'information de luminance. Ces cellules ont démontré une sélectivité aux fréquences spatiales et temporelles de l'enveloppe des stimuli de deuxième-ordre et ont présenté des réponses temporelles plus lentes pour l'enveloppe que pour le réseau de premier-ordre (Mareschal & Baker, 1998b).

Au cours d'une recherche, les propriétés spatiales et d'orientations des neurones de l'aire 18 du chat ont été examinées, en variant ces caractéristiques des deux composantes du stimulus de deuxième-ordre, le porteur (*carrier*) et l'enveloppe (Mareschal & Baker, 1999). Les résultats démontrent une sélectivité accrue des neurones pour une fréquence spatiale spécifique du porteur, relativement haute, approchant la limite d'acuité de l'animal. Par contre, l'enveloppe provoque des réponses optimales pour des fréquences spatiales plus basses. Les réponses cellulaires aux stimuli semblent indiquer davantage de dépendance à l'orientation de l'enveloppe, qu'à l'orientation du porteur. D'ailleurs, les neurones ont une orientation préférée similaire pour l'enveloppe et le réseau de premier-ordre. Il ne semble pas y avoir de relation systématique entre l'orientation optimale du porteur et de l'enveloppe, ce qui suggère que les neurones non-linéaires corticaux puissent répondre à une grande variété de stimuli de deuxième-ordre.

Au niveau du cortex extrastrié du singe, plusieurs aires semblent être impliquées dans l'analyse de ce type de stimuli, dont MT (V5). Les cellules de cette aire répondent

à une barre de bruit dynamique sur un fond statique (Albright, 1992; Geesaman & Andersen, 1996), à des stimuli définis par la texture (Olavarria, DeYoe, Knierim, Fox, & van Essen, 1992) et à des enveloppes de contraste (O'Keefe & Movshon, 1998). Des évidences davantage concluantes, allant dans le sens d'une spécialisation de l'analyse du mouvement de deuxième-ordre par les aires extrastriées, ont été rapportées par les études d'imagerie et sur les patients cérébrolésés.

#### **3.2.2.4 Études d'imageries : stimuli simples et complexes**

Bien que l'imagerie semble être une approche intéressante dans le but de clarifier l'hypothèse de la spécialisation extrastriée, il peut être difficile d'étudier les réponses métaboliques aux stimuli séparément. En effet, la réponse au stimulus de deuxième-ordre ne doit pas être attribuable aux mécanismes de premier-ordre qui répondent à la texture du porteur (*carrier*) (Baker, 1999). Smith et ses collaborateurs (1998) ont trouvé que la plupart des régions visuelles corticales répondaient aux deux types de stimuli, mais l'aire V3 et VP répondaient davantage aux stimuli de deuxième-ordre qu'à ceux de premier-ordre. Par ailleurs, l'aire V3 du singe analyserait des aspects du mouvement complexe, typiquement observé à un niveau ultérieur du traitement (Gegenfurtner, Kiper, & Levitt, 1997). Plus récemment, on a utilisé l'imagerie fonctionnelle (IRMf) pour démontrer des régions corticales distinctes dans le traitement préférentiel du premier- ou du second-ordre. En effet, on a rapporté une spécialisation corticale pour le traitement du premier- et du deuxième-ordre au niveau de certaines régions des lobes occipital et pariétal. Plus spécifiquement, l'aire hMT+ et le cortex occipital latéral (LO) ont davantage été activés par le second-ordre, tandis que le premier-ordre semble impliquer des aires de plus bas niveau, tel que V1-V2 (Dumoulin, Baker, Hess, & Evans, 2003) (voir Figure 2-1 pour un schéma des aires visuelles).

### **3.2.3 Perception de stimuli simples et complexes chez diverses populations**

Ces stimuli peuvent être très utiles comme outil de mesure du bon fonctionnement cortical chez une population donnée ou bien pour connaître le développement de cette fonction chez l'enfant.

#### **3.2.3.1 Développement de la perception visuelle complexe**

Peu d'études n'ont investigué le développement des stimuli de 1<sup>e</sup> et de 2<sup>e</sup> ordre. D'abord, une étude rapportée dans un chapitre mentionne avoir utilisé le regard préférentiel chez des nourrissons de 8 à 12 semaines pour le premier groupe et de 16 à 20 semaines pour le deuxième (Atkinson, Braddick, & Wattam-Bell, 1993). Des stimuli définis par un mouvement de premier-ou de deuxième-ordre ont été présentés : des patrons de points dans lesquels du bruit visuel dynamique alterné de bandes horizontales (20deg/sec). Le stimulus cible (de premier- ou de deuxième-ordre) a été pairé à un stimulus neutre, dans lequel le bruit et les points sont statiques. Les sujets des deux groupes d'âges préféraient un des stimuli cibles en mouvement (premier- ou second-ordre), au stimulus neutre (statique). Également, les nourrissons ont démontré une préférence significative pour les stimuli de premier-ordre et ce, dans les deux groupes d'âges. Toutefois, les enfants des deux groupes d'âge semblaient sensibles aux stimuli de deuxième-ordre.

Elleberg et collaborateurs (2003) ont évalué la sensibilité au mouvement de premier- et de deuxième-ordre chez des enfants âgés de 5 ans, comparativement aux adultes. De leurs résultats, les auteurs suggèrent que la sensibilité au deuxième-ordre présente une maturation plus lente que celle au premier-ordre. Ils démontrent une différence plus importante pour la sensibilité au deuxième-ordre, qui est inférieure chez les enfants de cet âge.

Récemment, la sensibilité des enfants aux stimuli de premier- et de deuxième-ordre (défini par le contraste) a été adressée lors d'une étude développementale faite en collaboration avec notre laboratoire. À l'aide de la technique du regard préférentiel, un

profil de maturation similaire pour les deux types de stimuli a été démontré, chez les enfants normaux de 8 mois à 7 ans. La sensibilité au premier-ordre et celle au deuxième-ordre s'améliorent tous deux avec l'âge, de façon parallèle (Thibault, Brosseau-Lachaine, Faubert, & Vital-Durand, 2007).

### **3.2.3.2 Perception visuelle complexe en vieillissement normal**

À l'autre extrémité du cycle de la vie, le vieillissement des fonctions est également révélateur. L'étude de Habak et Faubert (2000) démontre un effet du vieillissement normal sur la perception de stimuli complexes. Les seuils de contrastes de sujets jeunes et âgés (âge moyen de 70 ans) ont été mesurés pour des stimuli définis par la luminance (premier-ordre) et par le contraste (deuxième-ordre). Une élévation du seuil de contraste chez les sujets âgés est rapportée, par rapport aux sujets jeunes, pour les deux types de stimuli en mouvement. Par contre, une plus grande élévation du seuil de perception de second-ordre est constatée chez les sujets âgés, comparativement au premier-ordre. Les résultats suggèrent ainsi une dissociation entre les mécanismes qui sous-tendent la perception du mouvement de premier- et de deuxième-ordre. La perte de sensibilité pour les stimuli complexes lors du vieillissement normal serait la résultante d'une altération des étapes additionnelles dans l'analyse corticale de haut niveau.

### **3.2.3.3 Perception visuelle complexe chez certaines populations cliniques**

#### *3.2.3.3.1 Patients cérébrolésés*

Les études effectuées avec des patients ayant des lésions neurologiques renforcent l'hypothèse d'une spécialisation subséquente au niveau du cortex extrastrié. Plant et Nakayama (1993) ont rapporté un déficit sélectif au mouvement de second-ordre, dans l'hémichamp visuel controlatéral aux lésions unilatérales postérieures occipito-pariétales de trois patients. Des chercheurs ont étudié 21 patients cérébrolésés et ont relevé trois patients ayant des lésions temporales supérieure et inféro-pariétale latérale. Ceux-ci démontraient une élévation importante des seuils pour la discrimination de la vitesse de stimuli de premier-ordre et non pas pour les stimuli de

deuxième-ordre (Greenlee & Smith, 1997). Cependant, la situation inverse n'a pas été observée chez leurs patients. Les deux études précédentes ont utilisé des réseaux définis par la luminance et par le contraste, pour évaluer la perception de premier-et de deuxième-ordre, respectivement.

Vaina et ses collaborateurs ont avancé un traitement ségrégué des stimuli de premier- et de deuxième-ordre, suite à l'observation d'une double-dissociation neurologique chez deux patients. À l'aide de patrons de points aléatoires, un déficit relativement plus important de la perception du mouvement de deuxième-ordre que de premier-ordre est relevé chez le patient «FD», dans l'hémichamp controlatéral à sa lésion (Vaina & Cowey, 1996). Tandis qu'un autre patient («RA») aurait démontré un déficit spécifique à la perception du mouvement de premier-ordre, le mouvement complexe étant bien perçu (Vaina, Makris, Kennedy, & Cowey, 1998). Les résultats de l'imagerie par résonance magnétique anatomique indiquent que les deux patients ont des lésions à différentes régions corticales extrastriées (Vaina, Cowey, & Kennedy, 1999). Le patient FD, présentant un déficit perceptif au mouvement de deuxième-ordre aurait une lésion dans la portion caudale du sulcus temporal supérieur, tandis que RA qui présente le déficit opposé, aurait une lésion au niveau supérieur de la fissure calcarine. Les auteurs interprètent les déficits perceptifs de leurs patients en raison d'interruptions distinctes des voies d'analyses de chacun des deux types de mouvements.

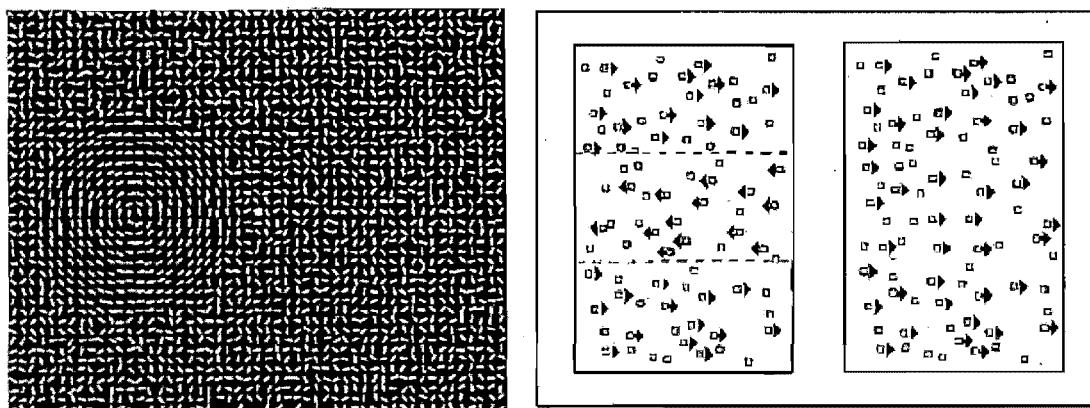
#### 3.2.3.3.2 *Personnes atteintes de troubles neurodéveloppementaux*

Les travaux de Bertone et collaborateurs ont mené à des découvertes intéressantes au plan des personnes atteintes d'autisme de haut niveau, qui ont de plus clarifié le débat entourant l'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005). En effet, l'hypothèse d'une vulnérabilité de la voie dorsale, ou magnocellulaire, est fréquemment rencontré dans la littérature pour diverses pathologies, tel que l'autisme (Spencer et al., 2000), le syndrome de Williams (Atkinson et al., 2006; Atkinson et al., 1997), la dyslexie (Cornelissen, Richardson, Mason, Fowler, & Stein, 1995), la dyspraxie (O'Brien, Spencer, Atkinson, Braddick, & Wattam-Bell, 2002), l'hémiplégie (Gunn et al., 2002), etc. Cette interprétation a été soutenue par



la démonstration d'un traitement intact de la forme globale (ex : cohérence de la forme avec le stimulus «*ball in the grass*»), comparé à une sensibilité atteinte de la cohérence du mouvement (ex : stimulus «*road in the snow*» : voir Figure 3-4). Par contre, ces stimuli ne sont peut-être pas équivalents en termes de complexité. D'ailleurs, on a démontré un développement plus rapide pour le traitement de la cohérence de forme que pour la cohérence du mouvement qui présente une maturation plus lente (Gunn et al., 2002).

**Figure 3-4 :** Illustration des stimuli fréquemment employés par le groupe d'Atkinson, Braddick et Wattam-Bell.



À gauche, le stimulus de cohérence de la forme «*ball in the grass*» est illustré. À droite, le stimulus de cohérence de mouvement «*road in the snow*» est également illustré (Gunn et al., 2002).

Une hypothèse alternative basée sur la complexité de l'information à traiter a été proposée par Bertone et coll. (2003). En effet, plusieurs études qui proposaient une vulnérabilité de la voie dorsale en autisme, utilisaient principalement des stimuli dynamiques complexes (Gepner, Mestre, Masson, & de Schonen, 1995; Milne et al., 2002; Spencer et al., 2000). Ainsi, les études menées par Bertone ont démontré une perception normale pour le stimulus de premier-ordre, simple, en mouvement, et une atteinte sélective pour le stimulus de deuxième-ordre, complexe, en mouvement. De plus, une sensibilité supérieure est rapportée pour l'information statique de premier-ordre et inférieure, pour l'information complexe de second-ordre (discrimination de l'orientation). Or, les déficits perceptifs seraient davantage reliés à la complexité du

réseau neuronal requis pour traiter l'information visuelle. Ainsi, le déficit observé quant au traitement de l'information statique et dynamique complexes serait expliqué par une efficacité réduite des mécanismes neuro-intégrateurs perceptifs en autisme (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005).

Une méthodologie semblable a été utilisée dans le cas du syndrome X fragile, un syndrome génétique présentant des déficits visuo-moteurs et visuo-spatiaux chez ses porteurs (Cornish, Munir, & Cross, 1999) et des anomalies des couches magnocellulaires du thalamus (Kogan, Boutet et al., 2004). Les tests psychophysiques effectués auprès des porteurs du syndrome ont démontré des déficits perceptifs importants pour la perception du mouvement de premier- et de deuxième-ordre, accompagné d'une perception près de la normale pour le premier-ordre statique et affectée pour le deuxième-ordre statique. Les auteurs proposent ainsi une altération généralisée des mécanismes nécessaires à l'intégration (effet de complexité), en plus du déficit du traitement de l'information en mouvement (Kogan, Bertone et al., 2004).

### **3.3 Conclusion sur la perception de stimuli complexes**

Suite à ce survol de connaissances fondamentales sur la perception des stimuli complexes, nous aborderons maintenant la thématique du traumatisme craniocérébral léger (TCCL) chez l'enfant dans la prochaine section de recension des connaissances avant la section expérimentale. Les mesures de sensibilité au flux optique et aux stimuli simples et complexes, tel que le premier- et le deuxième-ordre sont des mesures qui pourront être utilisées comme outil afin de mieux comprendre l'évolution du système visuel lors du développement normal ou bien lors d'une interruption ou d'un trouble dans l'enfance, tel que le TCCL. Ces mesures peuvent certes servir d'outil d'évaluation du traitement de l'information visuelle de bas et de plus haut niveau, comme mesure du fonctionnement du système. C'est ce que nous utiliserons dans la portion expérimentale de la thèse.

## **CHAPITRE 4**

## **4.1 Le traumatisme craniocérébral chez l'enfant**

Le traumatisme craniocérébral (TCC) est un événement qui risque fort de nuire au développement normal de l'enfant. Étant donné la popularité croissante de sports «extrêmes» chez les jeunes, tel que le patin à roues alignées, la planche à roulettes, le vélo de montagne, la planche à neige, etc., ils sont particulièrement à risque de chutes. Les enfants d'âge scolaire sont d'ailleurs la portion la plus active de la population (Kino-Québec. Comité scientifique & Thibault, 2000). Les TCC surviennent principalement suite aux accidents de la route, agressions, chutes, lors d'activités sportives ou récréatives (Bazarian et al., 2005). Il a été rapporté que plus d'un million d'enfants subissent un trauma crânien par année chez nos voisins américains (Kraus, 1995) et que plus de 10% des consultations à l'urgence serait liés à un TCC (Yeates et al., 1999). Par ailleurs, la grande majorité des traumas crâniens subis sont classifiés comme «légers». Ces traumas peuvent causer des déficits neurocognitifs, des difficultés scolaires, des problèmes de comportements et émotionnels et même affecter les habiletés sociales et le fonctionnement adaptatif (Yeates et al., 1999). Malgré l'importance de ce problème de santé publique, les effets du TCC léger chez les jeunes sont encore mal connus.

### **4.1.1 Définition du TCC**

Le traumatisme craniocérébral (TCC) est un des désordres neurologiques des plus communs dans la population. On a prédit que le TCC deviendra la troisième cause mondiale de mortalité et d'invalidité d'ici 2020 (Murray & Lopez, 1997). De nombreuses définitions du TCC existent dans la littérature et peu de consensus émerge. Le TCC est un syndrome clinique de durée variable qui résulte d'une force extérieure transmise au cerveau. L'impact peut provenir d'un choc à la tête, au visage, au cou, ou d'ailleurs avec une force d'impulsion transmise à la tête (Aubry et al., 2002). Les forces d'accélération et de décélération sont considérées comme étant un facteur important dans la genèse du TCC (Gaetz, 2004). D'autres le définissent comme toute perturbation neurologique transitoire résultant d'une force biomécanique à la tête (Giza & Hovda, 2001).

Le TCC peut prendre diverses formes, allant du trauma mineur au plus sévère, dépendamment de différents facteurs. Une échelle a été développée à Glasgow, dans le but de classer la sévérité des TCC, d'où elle tient son nom; «l'échelle de coma de Glasgow» (GCS) (Teasdale & Jennett, 1974). Celle-ci permet une cotation répétée par un professionnel de la santé sur les lieux de l'accident, lors du transport par les ambulanciers, à l'Urgence et lors de l'hospitalisation. Le score global sur un total de 15 est obtenu en additionnant les différents scores provenant des 3 catégories suivantes : la meilleure réponse motrice (1-6), la meilleure réponse verbale (1-5) et l'ouverture des yeux (1-4).

Une nomenclature internationale permet de catégoriser la gravité du traumatisme subi en trois catégories selon les différents signes cliniques et radiologiques : les TCC léger, modéré et sévère (Aubin et al., 2005). Le TCC léger correspond à un score de Glasgow de 13 à 15, à une période d'altération ou de perte de conscience maximale de 30 minutes et à une amnésie post-traumatique, si présente, d'au plus 24 heures. Le TCC modéré correspond à un score de 9 à 12 sur l'échelle de coma de Glasgow et il présente généralement un résultat positif à l'imagerie cérébrale (fracture ou lésion intracrânienne). De plus, la durée de la perte de conscience et de l'amnésie post-traumatique se situe généralement entre 30 minutes et 6 heures (maximum 24 heures) et entre 1 et 14 jours, respectivement. Le TCC sévère obtient un score inférieur à 8 sur l'échelle de Glasgow, présente une période de perte de conscience d'une durée de plus de 6 heures, une amnésie post-traumatique durant plusieurs semaines et des lésions significatives à l'encéphale objectivées à l'imagerie cérébrale. Enfin, un examen neurologique positif est révélé à tous les degrés de sévérités du TCC, mais il est seulement possible que des signes focaux soient démontrés à l'examen du TCC léger. Environ 80 à 90% de tous les TCC sont catégorisés comme légers (Cassidy et al., 2004; Ruff, 2005; Teasdale & Jennett, 1974).

## 4.1.2 Traumatisme craniocérébral léger

Le traumatisme craniocérébral léger (TCCL) est un concept qui évolue au fil des années. Une certaine hétérogénéité des définitions du TCCL circule dans la littérature, en plus des différentes appellations, tels que «commotion», TCC «mineur», etc.

### 4.1.2.1 Définition du TCCL

D'abord, le TCCL a été clairement défini par le *American Congress of Rehabilitation Medicine* (ACRM, 1993). Plus récemment, le *Task Force*<sup>1</sup> de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (2004) a recommandé une définition opérationnelle, qui reprend essentiellement celle de l'ACRM. Ainsi, le TCCL est une atteinte cérébrale aiguë qui résulte d'un transfert d'une force externe vers le crâne et les structures sous-jacentes. Un diagnostic de TCCL sera émis si au moins un des critères d'inclusions suivant est manifesté ; toute période d'altération de l'état de conscience lors de l'accident (confusion, désorientation), toute période de perte de conscience de 30 minutes ou moins, toute période de perte de mémoire des événements immédiatement avant ou après l'accident (amnésie post-traumatique) durant moins de 24 heures et/ou tout autre signe neurologique transitoire (signe neurologique localisé, convulsion, lésion intracrânienne) ne nécessitant pas d'intervention chirurgicale. Un score de Coma de Glasgow (GCS) entre 13 à 15 sera obtenu à l'Urgence, 30 minutes ou plus suivant le traumatisme. De plus, les manifestations précédentes ne doivent pas être dues à une intoxication à la drogue, alcool ou médication, ni être causées par d'autres blessures ou traitement de ces autres blessures (lésions systémiques, faciales ou intubation), ni résulter d'autres troubles (traumatisme psychologique, barrière linguistique, ou autres pathologies coexistantes chez l'individu), ni être causées par un TCC de nature pénétrante (voir l'[Annexe 2](#)). Advenant la possibilité où la perte de conscience excède 30 minutes, ou l'amnésie post-traumatique persiste après 24hrs ou que le score de coma Glasgow descend sous 13 après 30 minutes, le diagnostic n'en sera pas un de TCC léger.

---

<sup>1</sup> Regroupement d'experts, rassemblés pour évaluer et faire une synthèse des meilleures preuves (*best-evidence*) de la littérature scientifique, et faire des recommandations afin réduire les coûts médicaux et sociaux reliés au TCCL.

Le terme «commotion» ou «commotion cérébrale» est aussi fréquemment employé pour le TCCL, mais plus spécifiquement pour l'événement qui survient dans le cadre d'une activité sportive, tel que chez les athlètes pratiquant des sports de contacts. On définit la commotion comme étant un processus pathophysiologique complexe affectant le cerveau, induit par des forces biomécaniques traumatiques (Aubry et al., 2002). L'*American Academy of Neurology* (1997) définissent celle-ci comme étant un traumatisme qui induit une altération de l'état mental et/ou des symptômes post-commotionnels, sans qu'il n'y ait nécessairement de perte de conscience. Des critères spécifiques à la gradation des commotions cérébrales ont été élaborés par l'*American Academy of Neurology* (1997), tel que démontré au Tableau 1 qui décrit les 3 grades de commotions en sports. L'épisode de confusion et l'amnésie peuvent survenir immédiatement après ou plusieurs minutes après le coup à la tête (AAN, 1997). Une telle gradation a été auparavant utile dans l'évaluation objective des athlètes ayant subi un TCC léger, une condition plutôt hétérogène. De plus, elle a permis de mieux guider le retour au jeu, en connaissant la sévérité de la commotion subie.

**Tableau 4-I** Critères de gradation des commotions cérébrales

Critères	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Perte de conscience	aucune	aucune	Toute perte de conscience, brève (sec.) ou prolongée (min.)
Confusion	Momentanée, transitoire	transitoire	présente
Symptômes post-commotionnels	Se résout <15 min.	Entre 15 min. – 1hr.	Dure plus que 15 min. et peut persister > 1hr.

Adapté de l'*American Academy of Neurology* (1997) et de Ruff (2005)

#### 4.1.2.2 Incidence du TCCL chez les enfants

L'incidence du TCC léger chez la population pédiatrique varie selon les études et elle risque même d'être sous-estimée lorsque l'on tient seulement compte des admissions en milieu hospitalier (Cassidy et al., 2004), car moins d'un tiers des

commotions seraient vues par un médecin (Thurman, Branche, & Sniezek, 1998). Une étude canadienne a utilisé les données issues d'un sondage national en santé pour estimer la prévalence des commotions rapportées lors l'année précédente (1996-1997). Chez les enfants de 0 à 14 ans, l'estimé obtenu était de 200 cas par 100 000 habitants (intervalle de confiance de 95% : entre 120-300), avec un peu plus de la moitié des commotions rapportées qui sont survenues en sports (Gordon, Dooley, & Wood, 2006). On a estimé une prévalence de 135 pour 100 000 enfants, âgées entre 6 et 16 ans, dans une autre étude qui a dénombré les incidents impliquant la tête et ayant en plus des symptômes commotionnels, rapportés dans les écoles de la province d'Ontario en 2000 (Willer, Dumas, Hutson, & Leddy, 2004). Plus spécifiquement, Les chutes sont la principale cause rapportée dans ce cadre scolaire, bien que les enfants plus vieux risquent davantage de subir une commotion lors d'activités sportives. Toujours selon cette étude, la fréquence des incidents rapportés diminue avec l'âge et les garçons ont 2.23 fois plus de risques de subir une commotion avec symptômes que les filles. Toutefois, Gordon et coll. (2006) démontrent que les deux sexes sont autant représentés chez les enfants de 0-14 ans, tandis qu'une sur-représentation masculine est évidente chez les jeunes adultes (15-34 ans). Enfin, une étude américaine rapporte une incidence annuelle de TCCL (1998-2000) particulièrement élevée chez les enfants âgés de 5 à 14 ans; de 733.3 cas par 100 000 habitants (Bazarian et al., 2005), qui concorde toutefois à la prévalence estimée au-delà de 600/ 100 000 habitants par le *Task Force* de l'OMS (Cassidy et al., 2004).

#### **4.1.3 Neuropathologie suite au TCC**

Un traumatisme à la tête peut résulter en une panoplie de dysfonctionnements physiques, cognitifs et comportementaux, possiblement dus à des atteintes des systèmes organiques sous-jacents. Les changements exacts causés par le traumatisme restent encore peu connus, mais il reste que pour le TCCL, une cascade neurométabolique complexe incluant des dommages microscopiques aux niveaux neuronal, axonal et vasculaire semblent expliquer en partie les dysfonctionnements subis (Gaetz, 2004).



Les premières investigations pathologiques post-mortem ont observé une dégénération diffuse et répandue de la matière blanche au niveau du tissu neuronal (Strich, 1961). Des lésions focalisées (p.ex. : contusions, hématomes) et/ou diffuses des structures cérébrales sont susceptibles de survenir en réponse aux forces d'accélération et de décélération  $(A/D)^2$  qui résultent en des tensions dans la boîte crânienne suite aux TCC de différentes sévérités (Gaetz, 2004; Levin, Amparo et al., 1987; Oppenheimer, 1968). Néanmoins, dans les cas de traumatismes produits par des forces mineures à modérées, les différentes caractéristiques des neurones en soi semblent les rendre plus susceptibles à des lésions diffuses (Gaetz, 2004). En effet, on a observé que les axones<sup>3</sup> sont plus souvent endommagés à la transition de densités des tissus du cortex cérébral tel qu'entre la matière blanche et la matière grise (Gentry, Godersky, Thompson, & Dunn, 1988; Povlishock, 1993). Par ailleurs, grâce à une étude d'imagerie par résonance magnétique il a été relevé que chez des patients ayant subi un TCC léger, les lésions neuronales ont été localisées entre les matières blanches et grises et dans la matière blanche associée plutôt qu'au niveau du tronc cérébral et du corps calleux (Mittl et al., 1994). Suite au traumatisme, ces changements diffus incluent des lésions axonales diffuses (*Diffuse axonal injury*; DAI) et des lésions microvasculaires diffuses (Povlishock & Katz, 2005). Bien que le concept de «lésions axonales diffuses» (DAI) soit encore fréquemment rencontré dans la littérature, certains auteurs préfèrent utiliser le terme de «lésions axonales traumatiques» (*traumatic axonal injury*; TAI) puisque les dommages aux axones semblent être davantage regroupés dans certaines aires que véritablement diffusés (Gaetz, 2004).

Des lésions axonales traumatiques (TAI) surviennent fréquemment suite à un TCC. C'est un processus qui se succède dans le temps, des premières minutes suivant le trauma à des jours après. En effet, à l'intérieur de quelques minutes après l'événement, des pathologies cellulaires sont observées, tel qu'une compaction des neurofilaments<sup>4</sup> ou

---

<sup>2</sup> Un impact n'est pas nécessaire pour observer des dommages significatifs.

<sup>3</sup> Les axones contiennent de nombreux éléments microscopiques, tels que des microtubules, qui contribuent au transport axonal rapide de l'information.

<sup>4</sup> Les neurofilaments sont en quelque sorte l'ossature ou le cytosquelette de l'axone, un des éléments microscopiques de l'axone.

une enflure des axones (Pettus, Christman, Giebel, & Povlishock, 1994). Quelques heures après l'accident, une progression typique des anomalies au niveau des axones se poursuit graduellement, même en l'absence d'épanchement sanguin. Ensuite, une série progressive de changements neurophysiologiques aux axones a été observée, tel qu'une enflure réactive. Cette dernière résulterait possiblement par une cascade causée par l'étirement des axones, suivi par un influx de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans la cellule. Il est en effet reconnu que la tension mécanique infligée aux neurones est un médiateur important dans le traumatisme fait aux axones (Bain, Raghupathi, & Meaney, 2001). Les axones se détachant même parfois des segments distaux et proximaux. Les changements axonaux démontrent différents parcours suite au TCC, tel qu'une dégénérescence (mort cellulaire) pour certains et une tentative de régénération pour d'autres axones (pour une revue, voir Gaetz (2004) et Povlishock & Katz (2005)). Le traumatisme a généralement comme conséquence des changements métaboliques anormaux, dont un état « hyperglycolisé » suivi par une consommation anormale du glucose autant chez les traumatisés crâniens sévères que légers (Bergsneider et al., 2000). La neurotransmission serait également affectée, ainsi que l'apport sanguin qui serait diminué (Gaetz, 2004). À présent, il est généralement accepté que les lésions axonales proviennent principalement des tensions ou des forces mécaniques (Bain, Raghupathi, & Meaney, 2001). De plus, même des forces mineures d'A/D peuvent causer des lésions neuronales.

#### **4.1.3.1 Imagerie cérébrale**

Le TCCL, ou les commotions, sont habituellement associés à des résultats de neuroimagerie structurels conventionnels normaux, tel qu'au CT scan (Aubry et al., 2002). Toutefois, l'on ne doit pas interpréter cela comme l'absence d'un trauma neuronal, car une distinction entre les sensibilités des techniques neuroradiologiques (CT vs. IRM) a été démontrée pour détection d'un trauma suite à un TCC léger (Levin, Williams, Eisenberg, High, & Guinto, 1992; Mittl et al., 1994). De plus, certaines techniques d'imageries fonctionnelles, qui seraient plus sensibles au métabolisme cérébral, telles que le SPECT, la tomographie par émissions de positrons (TEP) ou l'IRMf seraient davantage à même de révéler les dysfonctionnements cérébraux chez les gens qui ont subi un TCCL (Ashwal et al., 2000; Garnett, Blamire, Rajagopalan, Styles,

& Cadoux-Hudson, 2000; Jantzen, Anderson, Steinberg, & Kelso, 2004; Kant, Smith-Seemiller, Isaac, & Duffy, 1997). Toutefois, ces techniques d'imageries sont onéreuses, parfois invasives et leur utilisation demandent un personnel technique qualifié.

#### **4.1.4 Capacités affectées suite au TCC léger**

L'étude des conséquences du TCCL chez les enfants est d'autant plus importante étant donné qu'ils sont en pleine période de développement et d'apprentissage. Il a été rapporté que la récupération suite au TCCL serait plus longue chez les adolescents (14-18 ans) que chez les jeunes adultes (17-25 ans) (Field, Collins, Lovell, & Maroon, 2003). En plus d'être plus à risque de subir un TCCL (Kevin E. Gordon, Dooley, & Wood, 2006), les jeunes semblent être également plus vulnérables. De plus, ils seraient plus à risque de subir une seconde commotion suite à une première. En effet, une étude longitudinale récente démontre que les enfants ayant eu une blessure à la tête ont plus de deux fois plus de risque d'en subir une subséquente, que les enfants ayant eu une blessure ailleurs qu'à la tête (Swaine et al., 2007). Sachant que les commotions répétées chez un même individu sont susceptibles de causer des effets cumulatifs (Syndrome du second impact) (Guskiewicz et al., 2003; Iverson, Gaetz, Lovell, & Collins, 2004) l'étude de Swaine et coll. soulève donc des inquiétudes.

##### **4.1.4.1 Symptomatologie**

Dans les minutes ou les heures suivant une commotion chez l'enfant ou l'adulte, divers symptômes surviennent habituellement, tel que des céphalées, des étourdissements et/ou des vertiges, des nausées et/ou des vomissements. Après quelques jours ou semaines, il est usuel que des symptômes post-commotionnels persistent, tels que des maux de tête, étourdissements, problèmes d'attention/concentration, troubles de mémoire, fatigabilité, irritabilité et/ou faible tolérance à la frustration, perturbation du cycle sommeil/éveil, intolérance aux bruits, sensibilité à la lumière forte, vision embrouillée, anxiété et/ou humeur dépressive (Alexander, 1995; Neurology, 1997). Ces derniers symptômes peuvent être regroupés en symptômes physiques, cognitifs ou comportementaux.

Les céphalées sont les manifestations les plus fréquemment rencontrés suite à un TCCL (Carroll et al., 2004; Farmer, Singer, Mellits, Hall, & Charney, 1987; Ponsford et al., 1999). Bien que la perte de conscience soit le symptôme le mieux reconnu de l'extérieur, suite à une commotion ou au TCCL, seulement 9% des joueurs de football au collégial en présente (Guskiewicz, Weaver, Padua, & Garrett, 2000). L'amnésie semble être un meilleur indicateur que la perte de conscience, quant au pronostic suite au TCCL. En effet, chez de jeunes athlètes commotionnés qui ont présenté une amnésie rétrograde ou antérograde, davantage de symptômes et de déficits neuropsychologiques est rapportée, environ 2 jours après l'événement (Collins et al., 2003).

Plusieurs échelles ou questionnaires ont été validées chez l'adulte, afin d'objectiver les symptômes post-commotionnels (Guskiewicz et al., 2003; Piland, Motl, Guskiewicz, McCrea, & Ferrara, 2006). Une échelle couramment utilisée est celle du questionnaire des symptômes post-commotionnels de Rivermead, qui permet de relever la présence et la sévérité de 16 symptômes fréquemment expérimentés suite à un TCCL, tels que des céphalées, des nausées, des étourdissements, etc. (N. S. King, Crawford, Wenden, Moss, & Wade, 1995) (voir l'Annexe 3). Ces échelles s'avèrent être très utiles dans le suivi des personnes atteintes d'un TCCL, comme outil de mesure du rétablissement et pour guider le retour aux activités sportives. Par ailleurs, la clinique recommande généralement d'observer une période de repos, sans activités physiques et cognitives, afin d'éviter l'aggravation des symptômes post-commotionnels et la prolongation de la période de récupération. Suite à la résolution des symptômes, un retour progressif aux activités est normalement recommandé (Gordon, 2006).

La littérature suggère qu'environ 80-90% des personnes ayant subi un TCC léger présentent un rétablissement favorable à l'intérieur de 3 mois (phase aiguë). Toutefois, pour environ 10 à 20% des patients, des symptômes post-commotionnels persistent en phase post-aiguë (après 3 mois post-accident) et affectent significativement ceux-ci (Alexander, 1995; Binder, Rohling, & Larrabee, 1997; Ruff, 2005; Vanderploeg, Curtiss, & Belanger, 2005; Wong, Regennitter, & Barrios, 1994). Une controverse subsiste toujours dans la littérature quand à l'origine des difficultés de cette minorité, atteinte du syndrome post-commotionnel (voir Ruff (2005)). Chez les enfants, on

rapporte toutefois que les symptômes attribuables au TCCL, présents lors des premières semaines, ne se prolongeraient pas au-delà de quelques semaines à 3 mois (Carroll et al., 2004). Cependant, certains enfants ont davantage de risques d'expérimenter des difficultés persistantes, tel que pour des jeunes ayant déjà subi d'autres TCCL, ayant des troubles d'apprentissages ou des facteurs de stress familiaux (Ponsford et al., 1999).

#### 4.1.4.2 Conséquences au plan cognitif

Certains déficits cognitifs peuvent survenir suite à un TCC léger; l'évaluation neuropsychologique reste fiable et sensible pour saisir ceux-ci (Belanger & Vanderploeg, 2005). La littérature chez l'adulte reconnaît généralement que des déficits cognitifs légers surviennent immédiatement après l'accident, tel que lors de la première semaine et qui se résolvent habituellement dans les semaines suivantes (Dikmen, McLean, & Temkin, 1986; Ponsford et al., 2000; Reitan & Wolfson, 1999; Stewart, Kaylor, & Koutanis, 1996; Voller et al., 1999). Par ailleurs, une étude de méta-analyse récente abonde dans le même sens, avec la démonstration d'un effet significatif du temps post-accident sur la performance neuropsychologique, qui s'atténue avec le temps (Frencham, Fox, & Maybery, 2005). On suggère également que la majorité de la récupération s'effectue à l'intérieur des 3 premiers mois après l'accident (i.e. phase aiguë) (Binder, Rohling, & Larrabee, 1997; Carroll et al., 2004; Frencham, Fox, & Maybery, 2005; Ponsford et al., 2000). Une étude démontre même le parallèle entre la présence et la résolution des troubles cognitifs et des anomalies vues à l'imagerie (IRM) (Levin, Williams, Eisenberg, High, & Guinto, 1992).

Peu d'études publiées adressent les effets à long terme chez l'adulte, c'est-à-dire au-delà de la phase aiguë, plus de 3 mois après l'accident. L'étude de Dikmen et coll. (1986) conclue à la non-persistance à long terme (1 an) des difficultés neuropsychologiques rencontrées suite au TCCL. Par ailleurs, la revue de la littérature du *Task Force* (entre 1980 et 2002) suggère qu'il n'y aurait pas de déficits cognitifs directement attribuables au TCCL au-delà de 1 à 3 mois, dans la majorité des cas (Carroll et al., 2004). Toutefois, une étude récente de Vanderploeg et collaborateurs (Vanderploeg, Curtiss, & Belanger, 2005) a mis en évidence des difficultés résiduelles

subtiles au niveau de certains aspects de l'attention complexe et de la mémoire de travail, chez des personnes ayant subi un TCCL des années auparavant (8 ans en moyenne). De plus, un sous-groupe de personnes symptomatiques (29% des participants ayant subi un TCCL) a démontré de faibles performances aux tests cognitifs plus d'un an après le traumatisme (Sterr, Herron, Hayward, & Montaldi, 2006).

Certaines études de méta-analyses ont démontré qu'en effet, certaines fonctions cognitives seraient davantage affectées, tel que l'attention, la mémoire de travail et la vitesse de traitement de l'information (p.ex : temps de réactions) (Binder, Rohling, & Larrabee, 1997; Carroll et al., 2004; Frencham, Fox, & Maybery, 2005). De plus, on a démontré un certain effet sur les fonctions exécutives et la mémoire des participants ayant subi un TCCL, avec la mémoire qui serait particulièrement affectée en phase aiguë, avec une résolution des difficultés avec le temps (Frencham, Fox, & Maybery, 2005). Cette méta-analyse relève certes un effet du TCCL sur le fonctionnement neuropsychologique, mais on le qualifie toutefois de modeste. On propose par ailleurs d'utiliser à l'avenir des tâches plus sensibles et complexes afin de mieux cerner les effets subtils du TCCL.

Chez l'enfant, plusieurs études n'indiquent peu ou pas de troubles cognitifs ou de problèmes de comportements à court ou à long terme suite au TCCL (Anderson, Catroppa, Rosenfeld, Haritou, & Morse, 2000; Bijur, Haslum, & Golding, 1990; Campos et al., 2000; Carroll et al., 2004; Jaffe, Polissar, Fay, & Liao, 1995; Ponsford et al., 1999; Yorkston, Jaffe, Polissar, Liao, & Fay, 1997). Toutefois, chez un groupe d'enfants d'âge scolaire ayant subi un TCCL, des chercheurs ont démontré qu'un sous-groupe (environ 35%) présente davantage de symptômes post-commotionnels après 3 mois, qu'à la 1<sup>e</sup> semaine post-incident. Les auteurs ont relevé une diminution du fonctionnement neuropsychologique à la 1<sup>e</sup> semaine (résorption de la différence après 3 mois), davantage de difficultés comportementales perçues par l'entourage, et des volumes réduits de la matière blanche, à l'intérieur de ce sous-groupe de jeunes chez qui une augmentation des symptômes post-commotionnels est rapportée (Yeates et al., 1999). Ainsi, cette étude démontre que la majorité des jeunes ayant subi un TCC léger n'ont pas démontré une augmentation significative des symptômes, ni de conséquences au

plan neuropsychologique, comportemental et neuroanatomique. Toutefois, le tiers de leur échantillon présente visiblement des difficultés. Au plan neuropsychologique, les enfants symptomatiques ont démontré davantage de difficultés aux tests portant sur l'attention sélective, la mémoire de travail, les habiletés de planification et d'inhibition; des fonctions exécutives. Ces fonctions sont reconnues pour impliquer les lobes préfrontaux, qui sont particulièrement vulnérables aux TCC modérés ou sévères (Yeates et al., 1999). Par contre, quant à la différence de volume de matière blanche, on suggère qu'il pourrait s'agir d'une différence pré-morbide qui pourrait mettre ces individus plus à risque de manifester des symptômes suite au trauma. Une autre investigation a démontré un déficit dans une tâche visuo-perceptive chez des enfants, 6 mois et 1 an après avoir subi leur TCCL. De plus, cette étude relève que davantage de cours de rattrapage en lecture ont été suivis par les enfants ayant subi un TCCL auparavant (Wrightson, McGinn, & Gronwall, 1995).

#### **4.1.4.3 Déficiences en perception visuelle**

Un nombre très restreint d'études ont investigué les conséquences d'un TCC sur la perception visuelle, et encore moins dans la population pédiatrique. Des difficultés à interpréter des images à un test visuo-perceptif après un suivi à long terme a été rapporté, chez des enfants qui avaient subi un TCC léger à l'âge préscolaire (Wrightson, McGinn, & Gronwall, 1995). En effet, ces auteurs ont démontré une capacité diminuée à identifier des objets dissimulés à l'intérieur d'un temps limite, à 6 et 12 mois suite au traumatisme et de plus grandes chances d'avoir des difficultés d'apprentissages en lecture vers l'âge de 6.5 ans.

Chez l'adulte, une investigation électrophysiologique a permis de démontrer que certains types de potentiels évoqués visuels (PEV) de plus haut niveau peuvent être sensibles au TCC de différentes sévérités, ce qui suggèrent des déficits subtils dans l'analyse de l'information visuelle de plus grande complexité (Lachapelle, Ouimet, Bach, Ptito, & McKerral, 2004). Ainsi, il est possible que le traitement de l'information visuelle soit affecté suite au TCC et contribuerait peut-être même aux déficits visuo-

attentionnels (Halterman et al., 2006; Vanderploeg, Curtiss, & Belanger, 2005) et visuo-moteurs relevés dans la littérature.

#### 4.1.4.4 Déficits visuo-moteurs

Récemment, les réponses posturales de jeunes athlètes universitaires ayant subi un TCCL ont été investiguées, à la présentation d'un flux optique en réalité virtuelle (Slobounov, Tutwiler, Sebastianelli, & Slobounov, 2006). Leurs résultats suggèrent un dysfonctionnement de l'intégration sensorielle, au moins 30 jours après l'accident, en raison d'une altération observée des réponses posturales par le mouvement du champ visuel. Cet effet déstabilisateur de la vision sur la posture a d'ailleurs déjà été relevé dans la littérature, chez la population vieillissante (King, Crawford, Wenden, Moss, & Wade, 1995; Ring, Nayak, & Isaacs, 1988).

Chez les enfants, des habiletés d'équilibre affectées ont été démontrées lors des 3 mois suivant le TCCL, malgré un examen neurologique normal et l'absence de trouble moteur apparent à la sortie de l'hôpital (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a). L'instabilité posturale mesurée s'est améliorée au cours des semaines, mais elle était toutefois toujours présente à la dernière évaluation, à 12 semaines. Il est intéressant de mentionner que toutes les mesures simples d'équilibre (tâches statiques) n'étaient pas affectées, contrairement à celles plus complexes, demandant davantage d'intégration sensorielle de plus haut niveau.

Le même groupe de chercheurs a investigué les performances visuo-motrices des enfants de 7 à 16 ans ayant subi un TCCL, qui normalement ne présentent pas de difficultés avec des paradigmes classiques de temps de réponses. Les enfants neuro-traumatisés ont manifesté des temps de réponses déficitaires jusqu'à 12 semaines, lors de conditions expérimentales spécifiques, impliquant des tâches visuo-motrices complexes (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004b). Les auteurs suggèrent que la nature complexe du stimulus visuel à détecter pourrait avoir contribué à la différence de performance visuo-motrice entre le groupe témoin et les jeunes ayant subi un TCCL. Ils concluent d'ailleurs en proposant entre autres de futures recherches sur la perception de stimuli visuels complexes, afin de mieux cerner leurs difficultés et déterminer leur



impact sur leurs participations aux activités physiques. Ces précédents résultats sont particulièrement préoccupants, puisqu'ils démontrent l'effet néfaste du TCCL persistant au-delà de la période de restriction d'activités physique de 4 semaines, imposée suite au TCC (Swaine & Friedman, 2001), ce qui pourrait mettre ces enfants à risque d'une chute subséquente. Qui plus est, une autre étude révèle que malgré un retour normal aux activités physique 3 mois après le TCCL, les enfants semblent manquer toutefois de confiance en leurs capacités de performance, avec une perception affectée de leur efficacité personnelle (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2005). Cette perception diminuée pourrait découler des déficits persistant précédemment mentionnés, pour les fonctions sensori-motrices de haut-niveau. Il est également possible que l'efficacité personnelle diminuée des enfants provienne de différents déficits subtils persistants, dont une difficulté d'intégration de l'environnement visuel.

#### **4.1.5 Objectifs et hypothèses de la seconde étude**

Étant donné le peu de connaissances que nous avons actuellement sur la perception visuelle suite au TCCL chez les enfants, il apparaît important d'évaluer celle-ci, plus particulièrement au niveau de la perception de stimuli complexes. Afin d'évaluer la capacité d'intégration de l'information visuelle des enfants ayant subi un TCCL, des paradigmes expérimentaux d'identification de direction et d'orientation de stimuli simples et complexes seront utilisés, en plus des stimuli de flux optique. De tels paradigmes utilisent des stimuli visuels de premier- et de deuxième-ordre, qui diffèrent en termes de quantité d'intégration neuronale requise pour percevoir leur direction ou orientation et visent respectivement les fonctions corticales de bas et de plus haut niveau (Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988; Nishida, Ledgeway, & Edwards, 1997; Wilson, Ferrera, & Yo, 1992). Étant donné les conséquences diffuses et subtiles du TCCL sur la fonction neurologique, les mesures de sensibilité de stimuli simples et complexes semblent être des mesures de choix pour objectiver l'impact du TCCL chez des êtres en développement. Par ailleurs, la sensibilité de ces mesures de premier- et de deuxième-ordre a déjà été démontrée lors de perturbations neuronales subtiles chez différentes populations cliniques (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005; Habak & Faubert, 2000; Kogan, Bertone et al., 2004). De plus, la sensibilité au

mouvement de flux optique est évaluée, étant un stimulus d'une grande valeur écologique car ce type de perception est impliqué lors d'activités physiques couramment pratiquées chez les jeunes (planche à neige, ski, vélo, course, etc.).

La seconde étude, présentée au Chapitre 6, évalue la perception de stimuli simples et complexes, chez des enfants ayant subi un TCCL, lors des 3 premiers mois suivant le traumatisme. Cette étude longitudinale a comme objectif de déterminer si les enfants ayant subi un TCCL présentent une sensibilité affectée aux stimuli simples et complexes, lorsque comparés à un groupe témoin correspondant en termes d'âge et de genre. Également, l'évolution de la performance perceptive des enfants avec ou sans TCCL a été évaluée à 3 reprises, au cours des 12 premières semaines suivant l'accident. Une première hypothèse émise est que les enfants ayant subi un traumatisme présentent une sensibilité affectée au plan de la perception de stimuli complexes, contrairement aux stimuli simples. Quant à l'évolution de la performance, nous supposons qu'elle sera améliorée à l'intérieur de la période aiguë, tel qu'il a été largement suggéré dans la littérature concernant les symptômes et les troubles cognitifs.

## **CHAPITRE 5**

## **Section expérimentale : Premier article**

### **Infant sensitivity to radial optic flow fields during the first months of life.**

Odile Brosseau-Lachaine <sup>1,2</sup>, Christian Casanova <sup>2</sup> & Jocelyn Faubert <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de psychophysique et de perception visuelle

<sup>2</sup> Laboratoire des Neurosciences de la vision

École d'optométrie, Université de Montréal, Montréal, Canada.

Article en cours d'acceptation dans : *Journal of Vision* (2008)

## **Contribution des auteurs de l'article**

**Odile Brosseau-Lachaine** : Élaboration du protocole, démarches pour l'approbation éthique au comité, recrutement des participants, évaluation des participants (cueillette des données), analyse des données, analyse statistique, interprétation des résultats et rédaction de l'article.

**Christian Casanova** : Supervision lors de l'élaboration du protocole, de l'interprétation des résultats et de la rédaction du manuscrit.

**Jocelyn Faubert** : Supervision lors de l'élaboration du protocole, de l'interprétation des résultats et de la rédaction du manuscrit.

## 5.1 Abstract

Little is known about the development of the sensitivity for “optic flow”, a large-scale pattern perceived during locomotion. The present study aimed to examine infants’ coherence thresholds to radial optic flow motion during the first months of life. Using a forced-choice preferential looking technique, infants’ sensitivities were measured with a moving radial stimulus varying in coherence on one side and a corresponding non-directional radial noise pattern on the other. Coherence thresholds for 11 infants from each of 2-, 4-, 6-, 8- and 10-months-of-age groups were studied by a constant stimuli method. In the second experiment, seven infants were followed longitudinally (tested at 2, 4, 6, & 8 months) using the same stimuli. Results of both studies demonstrated significant improvement for the sensitivity of expanding radial motion during the first months of life. Finally, the 2 directions of radial motion were tested (expanding and contracting) for participants followed longitudinally (from 2 to 8 months). Data showed superior sensitivity for expansion versus contraction direction of motion. This dissociation may suggest that sensitivity to direction corresponding with forward locomotion (expansion) develops at a faster rate than the opposite direction encountered when moving backwards (contraction). The sensitivity improvement for expanding patterns likely reflects the maturation of cerebral areas subtending motion integration in infancy.

Keywords : visual development; optic flow; infants; motion coherence

## 5.2 Introduction

During locomotion we perceive a large-scale pattern of visual motion called “optic flow”, which results from the dynamic projection of the visual scene onto the retina (Gibson, 1979). The analysis of this ecological motion serves important perceptual and behavioral functions, such as determining heading direction (Gibson, 1950), time to contact (Lee, 1980) and stabilizing posture (see: (Duffy, 2000; Lappe, Bremmer, & van den Berg, 1999; Vaina & Rushton, 2000) for reviews). Given its importance, the development of neural mechanisms mediating this type of motion information is expected to take place very soon after birth.

Several studies have demonstrated that optic flow motion information presented to the retina is processed hierarchically by mechanisms operating within area V1 and progressing to areas MT/V5, then to medial superior temporal area (MST) with progressively increasing receptive field size (Maunsell & Newsome, 1987; Tanaka & Saito, 1989; Tohyama & Fukushima, 2005). Specialized brain areas have been shown to be selectively involved in optic flow processing such as the medial superior temporal (MST) cortex in primates (Duffy & Wurtz, 1991a, 1991b; Saito et al., 1986; Tanaka, Fukada, & Saito, 1989; Tanaka et al., 1986; Tanaka & Saito, 1989) and MT+ complex in humans (Dukelow et al., 2001; Morrone et al., 2000). Behavioral data support the notion of such specialized processing as adult psychophysics’ evidenced the existence of global motion detectors with optic flow mechanisms integrating over large regions in the visual field (Morrone, Burr, & Vaina, 1995; Snowden & Milne, 1997). Evidence has also demonstrated that the coherence threshold technique may probe the higher-level mechanisms that integrate complex motion (Morrone, Burr, & Vaina, 1995).

Among the different type of optic flow-related motions expansion is of particular interest because it best defines motion during forward egomotion. The neurophysiological literature has consistently reported a directional bias for expanding motion in motion sensitive areas (K. C. Anderson & Siegel, 1999; Bremmer, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 2000; Geesaman & Andersen, 1996; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994; Lagae, Maes, Raiguel, Xiao, & Orban, 1994; Read & Siegel, 1997;

Siegel & Read, 1997). Furthermore, an imaging study has shown greater cerebral activation for the expansion condition than for the contraction condition (Ptito, Kupers, Faubert, & Gjedde, 2001).

To date, the development of mechanisms mediating translational (i.e., unidirectional) motion processing has been well documented in human infants. Starting at near birth, preferences for moving over static stimuli has been shown using preferential looking experiments (Kremenitzer, Vaughan, Kurtzberg, & Dowling, 1979; Volkman & Dobson, 1976) with some studies demonstrating the emergence of real directional mechanisms after 2 months of age (Banton, Dobkins, & Bertenthal, 2001; Wattam-Bell, 1996a). However, relatively little is known about the development of motion-sensitive mechanisms selective to radial motion, such as optic flow, which necessitates the involvement of higher-level motion processing.

The rudimentary ability to detect motion in depth appears to emerge very early in life with defensive responses such as blinking or head movements perceived at around one month of age (Ball, Ballot, & Dibble, 1983; Ball & Tronick, 1971; Yonas, Pettersen, & Lockman, 1979) or earlier (Jouen & Lepecq, 1989). Only recently have researchers addressed the development of perceptual mechanisms mediating optic flow stimuli in infants. Gilmore and colleagues (2004) found that the majority of infants assessed in their study were able to discriminate between optic flow displays with large changes of heading but with minimal development between 3 and 6 months. Interestingly, another group has shown that infants prefer radial expansion flow with a linear-speed-gradient over a zero-speed-gradient stimulus and these researchers have shown an improvement of performance between 2 and 3 months of age (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004b).

The aim of the present study was to assess the developmental changes in radial motion sensitivity, which represents optic flow encountered during locomotion, during the first months of life. The question was one of interest in that the maturation of perceptual mechanisms was assessed prior to onset of locomotion. Instead of simple presence or absence of infants' responses to flow information as a function of age, coherence thresholds were chosen as a measure of the cortical development of brain



areas involved to optic flow processing. We believe that such a measure is more informative than looking time preferences. In the first experiment, infants' sensitivities over a large age range were measured to assess the evolution of sensitivity over time. In a second experiment, the performance of a subgroup of infants in a longitudinal follow-up was compared. A final goal of the present study was to determine the within subject evolution of sensitivity over time for both motion directions (expanding and contracting) in order to track the developmental changes in sensitivity of these components of optic flow information.

## 5.3 General Method

### 5.3.1 Apparatus and stimuli

Stimuli were generated with the Vpixx© software ([www.vpixx.com](http://www.vpixx.com)) and driven by a Macintosh G3 computer. Stimuli were rear-projected by a LCD projector (InFocus LP725) onto a diffused translucent screen (Da-Lite© screen), subtending 104 x 79 deg. of visual angle. The image had a resolution of 800 x 600 pixels and the refresh rate was 60 Hz. A camera was set above the center of the screen and was connected to a video recorder for on-line viewing and recordings of the participant during the experimental sessions.

During each trial, a pair of stimuli display was presented on the screen. Figure 1 demonstrates dimensions of the two stimuli displays (79 x 45 deg). Each display contained 150 bright dots (58 cd/m<sup>2</sup>) with an apparent uniform dot density (evenly distributed), on a dark rectangle region (2 cd/m<sup>2</sup>; for a Michelson contrast of 93%), on a gray background (30 cd/m<sup>2</sup>;  $u' = 0,1910$  and  $v' = 0,4942$ ).

*INSERT FIGURE 1 APPROXIMATELY HERE*

The uniform dot density was achieved by reusing the dots that were falling off the display ("dead" dots) to fill the regions with the lowest time-averaged dot density. Therefore, the number of dots over space-time was maintained constant (see movie). The luminance calibration was done using a Minolta Chroma Meter (CS-100). Each dot

subtended  $0.66^\circ \times 0.66^\circ$  at the viewing distance of 57 cm. The moving dots had continuous trajectories and each frame lasted 16.67ms where the position of each element was updated on every video frame of the stimulus animation (60 times /second). The incoherent dots or noise of both displays had a behavior where the dots were "jittering" back and forth along its radial path. That is, each incoherent dot had a 50% chance (with replacement) of changing direction on each frame. See the movie for alternating examples of expanding and contracting motion and the jitter noise.

One side contained coherent optic flow motion, referred to as the target display, which has a signal-to-noise ratio of varying levels. This optic flow stimulus simulated an observer traveling in translation through a circular tunnel, where the dots were randomly distributed along the walls. On the screen, the dots were moving in a radial trajectory, in expansion from the origin of motion, which was set in the center of each stimulus. The other side contained the neutral stimulus, which was equivalent to the target display in all respects (i.e., dot speed, density, radial trajectory, etc.) except for the coherence of motion, which was always set at 0% (incoherent motion or non-directional noise). This non-directional radial motion led to a planar (no impression depth or self motion) and erratic (non-directional) motion impression. The side that contained the target display was randomly selected. Non-directional radial motion has been chosen as neutral stimuli because it differed from the target stimuli only in the global directionality of the information. Furthermore, we observed in pilot experiments that a random directional noise pattern was much more salient than the target display and the infants always looked at the control stimulus. Therefore, we used this random directional motion as the central fixation target before each trial. In order to simulate the optic flow field seen when traveling down a tunnel, dot speed accelerated with the square of the distance from the origin of expansion, or by a factor of four as the distance doubled. In this study, the dots' speed were of  $1.25^\circ/\text{sec}$  at an eccentricity of  $5^\circ$  and would travel at a speed of  $5^\circ/\text{sec}$  at  $10^\circ$ , to  $20^\circ/\text{sec}$  at  $20^\circ$  of his origin.

### 5.3.2 Procedure

During testing sessions the infant sat on his/her parent's lap at approximately 57cm from the screen. In order to minimize possible distractions the screen was surrounded perpendicularly by a wall on one side and by a gray curtain on the other. The room lighting was dimmed and the viewing was binocular. The parent was asked to simply hold their child and not take into account the stimuli presented to them during testing. A forced-choice preferential looking procedure was used to estimate the sensitivity to radial flow field stimuli varying in coherence. Before each trial, a central target (dark circle subtending  $15^\circ$  filled with bright dots moving in random directions at a speed of  $12^\circ/\text{sec}$ ) was presented at the center of the screen (gray background at  $30 \text{ cd/m}^2$ ) in order to get the infant to fixate centrally. The use of random directional motion as a central target was motivated from a pilot study where we observed that the infants' attention was strongly attracted by this noise stimulus. When the child was looking toward the center of the screen the experimenter initiated the trial and the paired display was presented. The experimenter was not seen by the child and made a force choice response by judging on which side the infant gazed (eye movements, with or without direction of the head and upper body). The experimenter was blind to the stimulus presentation and viewed the gazing behavior of the infant-participant on a TV-monitor that was recorded on-line by the camera. Each trial was presented until a clear gazing-behavior (right or left side) was made by the infant (usually lasting a few seconds), and was ended by entering the response. For some children, the direction of the first preferential look was consistent, but for others, both sides were compared before a final choice was made. This was qualitatively assessed in practice trials before the testing, where the experimenter observed the responses of each child while knowing on which side that target was presented. When the infant was unsettled during a trial the trial was canceled. During the testing session the participant and parent took as many breaks as required. The research was approved by the institutional ethics review board of the University of Montreal. Written informed consent was obtained by the parents of all infant participants of this study before proceeding.

## **5.4 Experiment 1:**

### **5.4.1 The development of sensitivity to expanding flow fields: cross-sectional measurements from 2 to 10 months.**

#### **5.4.2 Participants**

Infants were recruited by advertisement or from known volunteer families in the Montreal metropolitan area. All infants were born within 2 weeks of term, had an uncomplicated birth and had no known health problems. For Experiment 1, a total of 60 healthy infants were tested. Within this group, coherence thresholds were successfully obtained for 55 of them. The other five excluded infants were either not able to complete a testing session because of crying or sleeping, or manifested an asymmetrical pattern of looking (e.g. infants looking 85% of the time or more to one side were excluded). Eleven children were assessed from each of five pre-determined age groups; 2 months of age (6 male, 5 female; 8.45 weeks old  $\pm$  0.522), 4 months of age (7 male, 4 female; 17.27 weeks  $\pm$  0.647), 6 months of age (5 male, 6 female; 26 weeks  $\pm$  1), 8 months of age (7 male, 4 female; 34.91 weeks  $\pm$  0.539) and 10 months of age (4 male, 7 female; 43.27  $\pm$  0.905 weeks of age  $\pm$  SD). Testing of infants was generally completed within a single day. To ensure that each infant had normal and healthy vision acuity was assessed with Teller acuity cards in binocular conditions (McDonald et al., 1985; Teller, McDonald, Preston, Sebris, & Dobson, 1986). If atypical visual performance was observed infants were referred to the University Vision Clinic for a complete eye exam.

To compare the infant results to adult performance, 4 naïve participants (aged 25.5 years  $\pm$  2.38) were tested under the same conditions including practice trials with feedback to let them understand by themselves the procedure as for the infants. All adult participants had normal or corrected-to-normal acuity.

#### **5.4.3 Procedure**

A method of constant stimuli was used to measure the observer's coherence threshold, i.e. the minimum proportion of dots moving in expansion that yields a

coherent percept with a 75% correct response criterion. A bootstrap program (Matlab v.6.5; using a Weibull function), was used to derive the thresholds. Five pre-determined levels on a log scale were used starting at 100% coherence. The initial aim was to measure 20 trials at each level (10 “target” on each side; i.e. 10 expansion on the right side and 10 expansion on the left side) for a total of 100 trials per session per infant. Of the 55 infants where thresholds were obtained, the average number ( $\pm$  SD) of trials completed per infant was 83.95 ( $\pm$  13.24) that is:  $89.0 \pm 7.8$  for 2 months,  $84.36 \pm 12.07$  for 4 months,  $90.9 \pm 8.07$  for 6 months,  $78.27 \pm 16.76$  for 8 months and  $77.18 \pm 15.04$  for 10 months-old groups.

#### 5.4.4 Results

Figure 2A shows the results for the Experiment 1 presenting individual coherence thresholds to expanding (outward) optic flow obtained from each participant as a function of their respective age groups. Note that thresholds for naïve adults were on average lower than those obtained by the infants. Figure 2B illustrates the mean coherence threshold ( $\pm$  standard error) for each age group; 53.6% ( $\pm$  5.78) for 2 months; 46.62% ( $\pm$  6.57) for 4 months; 47.18% ( $\pm$  4.74) for 6 months; 29.98% ( $\pm$  3.45) for 8 months; 37.13% ( $\pm$  3.67) for 10 months of age. The mean adult coherence threshold was 9.69 % ( $\pm$  1.78). Statistical analysis was carried out with the data expressed in logarithmic units. A one-factor between-group ANOVA was performed on the coherence thresholds as a function of infant age group (from 2 through 10 months). A significant age group effect ( $F(4, 50) = 3.41, p = 0.015$ ) was found and a post hoc Tukey analysis showed a significant difference between 2 and 8 months of age groups ( $p = 0.014$ ). Other pairwise comparisons between age groups were not significant. A significant linear regression ( $F(1, 53) = 7.856, p = 0.007$ ) was also present between coherence threshold and age group for infants.

*INSERT FIGURE 2 APPROXIMATELY HERE*

A possible concern would be that our data are biased as the infants have not all completed the same number of trials. To control for this, we have calculated a weighted threshold by lumping together the individual data of all infants for each coherence level

and for each given age group and then calculated the group threshold. The results are almost identical where the weighted group thresholds were 55.41%, 46.21%, 48.09%, 30.4% and 39.2% for 2, 4, 6, 8 and 10 months-old groups respectively (vs. 53.6%, 46.62%, 47.18%, 29.98% and 37.13% for 2, 4, 6, 8 and 10 months-old groups).

Figure 3 shows representative psychometric functions for one individual participant for each age group.

*INSERT FIGURE 3 APPROXIMATELY HERE*

Despite individual variability, results revealed an improvement of optic flow sensitivity throughout the developmental period studied, particularly from ages 2 to 8 months of age. The 10-month group also had on average higher thresholds relative to the 8-month group but this difference was not significant. Due to inherent testing difficulties for the 10-month group (i.e., lack of attention and cooperation of infants to the stimuli and procedure) we decided not to test this group in the subsequent study. In order to reduce inter-participant variability, a second longitudinal follow-up study was completed (Experiment 2, see below) that measured the optic flow sensitivity of each individual participant at different stages of development from ages 2 to 8 months.

## **5.5 Experiment 2:**

### **5.5.1 The development of sensitivity to expanding flow fields: longitudinal follow up from 2 to 8 months of age.**

#### **5.5.2 Methods**

##### **5.5.2.1 Participants**

All experimental procedures were the same as in Experiment 1. A longitudinal follow-up was used with 7 participating infants (4 males and 3 females). Each participant was assessed around their 2<sup>nd</sup> ( $8.29 \pm 0.49$  weeks), 4<sup>th</sup> ( $17.43 \pm 0.98$  weeks), 6<sup>th</sup> ( $26.71 \pm 0.49$  weeks) and 8<sup>th</sup> ( $35.71 \pm 0.76$  weeks of age  $\pm$  SD) month of age. Of the

7 infants followed, the average number ( $\pm$  SD) of trials completed per infant was 89.43 ( $\pm$  12.35) that is:  $85.71 \pm 12.26$  for 2 months,  $78.57 \pm 12.5$  for 4 months,  $98.0 \pm 9.29$  for 6 months and  $95.43 \pm 3.5$  for 8 months-old groups. A complete optometric exam was performed at the University Vision Clinic for each participant to ensure normal vision at time of testing (i.e., presented no significant refractive error, pathology or strabismus).

### 5.5.3 Results

Figure 4 illustrates the results for the 7 participants whose sensitivity was assessed from ages 2 through 8 months of age. Coherence thresholds for expanding flow fields for each individual as a function of their respective age group are shown in Figure 4A. One of the participants (see participant 1) showed no significant preference for the target stimulus and therefore, no threshold was obtained for the 2 month and 4 month measures (plotted at 100% coherence). As a consequence, all the data from this participant were removed for the statistical analysis. However, qualitatively, this infant's threshold decreased as a function of time (i.e., between 6 and 8 months).

Figure 4B shows mean coherence thresholds as a function of age. A one-factor, repeated-measures ANOVA performed on the infant's log-transform data revealed a significant effect of age ( $F(3, 15) = 6.674, p = 0.004$ ). The analysis revealed a significant improvement of performance with time ( $F(1, 5) = 21.474, p = 0.006$ ). Overall, coherence thresholds for each child tended to decrease as a function of age. The figure also shows the discrepancy between thresholds for children and those obtained from naive adults under the same conditions.

*INSERT FIGURE 4 APPROXIMATELY HERE*

Like for Experiment 1, "weighted" coherence thresholds were calculated and were 56.34%, 36.98%, 40.06% and 32.34% for 2, 4, 6 and 8 months-old groups respectively (vs. 61.03%, 37.09%, 40.45% and 34.03% for 2, 4, 6 and 8 months-old groups).

## **5.6 Experiment 3:**

### **5.6.1 Longitudinal follow-up of expanding and contracting optic flow fields sensitivities.**

Results from both Experiments 1 and 2 demonstrated a significant improvement for the sensitivity of expanding optic flow fields during the first months of life using either cross-sectional or longitudinal approaches. Here, we addressed the specificity of the improvement of sensitivities in time, with both expansion (outward) and contraction (inward) motion. The former motion type reproduces the dynamic visual input while an observer moves forward through the environment whereas the latter motion type reproduces the dynamic input perceived as an observer moves backward through the environment. In this longitudinal study, motion sensitivity to both directions was measured for each participant at different ages (from 2 to 8 months of age).

### **5.6.2 Methods**

In this experiment the coherence thresholds were estimated for the 2 directions of motion (expansion and contraction) for each participant. The order of presentation of the two motion conditions was counterbalanced across participants and time sessions. In order to obtain two measurements for each participant within the same testing session, a staircase procedure was used instead of the more time-consuming method of constant stimuli. Therefore, a modified 2-down/1-up adaptive staircase method (Wetherill & Levitt, 1965) was used to estimate optic flow thresholds to both expanding and contracting motion conditions, where two consecutive correct responses reduced the degree of coherence motion (%), whereas one incorrect response increased the coherence level until 10 reversals were made (or stopped after 50 trials). Threshold estimated was the average of the coherence level of the last 6 reversals. Four practice trials were presented at the beginning of each session, without reversals. The staircase started at the highest coherence (100%) and varied in log step sizes of 0.15 until there had been 4 reversals. Subsequently, the step sizes reduced to 0.075 log for the last 6



reversals. The testing lasted for  $33.39 (\pm 6.85)$  and  $32.07 (\pm 6.51)$  trials on average ( $\pm$ SD) for expansion and contraction conditions, respectively.

### 5.6.2.1 Participants

A new cohort of 7 infants (5 males / 2 females) was recruited and followed longitudinally from 2 to 8 months of age (2 months,  $8.57 \pm 0.53$ ; 4 months,  $18.14 \pm 0.9$ ; 6 months,  $27.57 \pm 1.13$ ; 8 months,  $35.71 \pm 0.95$ ; weeks of age  $\pm$  SD) and assessed every two months in our laboratory. Six naïve adults (mean of 25 years of age  $\pm 2.68$ ) with normal or corrected to normal acuity were also assessed. Adult testing was done using the same procedures as that used for infants.

### 5.6.3 Results

Figure 5 shows individual results for both directions of motion (expansion and contraction) for the seven infants followed longitudinally in this experiment.

*INSERT FIGURE 5 APPROXIMATELY HERE*

Qualitatively, the data demonstrate that coherence thresholds for perceiving expanding motion were generally lower than that of contracting motion across all ages and participants. In addition, the sensitivity for contracting motion seemed to be more constant over time for most participants whereas the sensitivity to expanding motion increased with age (i.e. lower thresholds) for the majority of infants tested as was previously shown in Experiments 1 & 2.

Figure 6 illustrates the mean coherence thresholds for each direction of motion as a function of age groups. Two repeated-measure one-way ANOVAs were performed and revealed a significant main effect for the expansion direction ( $F(3,18) = 4.167, p = 0.021$ ) but not for the contraction ( $F(3,18) = 0.616, p = 0.614$ ), where expansion thresholds decreased with age and contraction thresholds remained stable. Pair-wise planned comparisons ( $t$ -tests with Bonferroni correction,  $0.05 / 6 = 0.008$ ) demonstrated significant differences between the two directions of motion for the 8-month group ( $t = -4.674, p = 0.003$ ). Other age groups did not reveal significant differences, considering

the Bonferroni correction, despite a tendency towards significance with increasing age (2 months;  $t = -1.19$ ,  $p = 0.279$ , 4 months;  $t = -3.196$ ,  $p = 0.019$ , 6 months;  $t = -2.549$ ,  $p = 0.044$ ). In adults, mean thresholds for expansion and contraction motion did not show a significant difference (paired  $t$ -test:  $p = 0.357$ ). It needs to be mentioned that the sample size was deemed to be too small for a factorial ANOVA, thereby lacking the power to detect interaction effects in the data. Therefore, planned comparisons were chosen.

*INSERT FIGURE 6 APPROXIMATELY HERE*

In order to compare the relative rates at which the mechanisms underlying expanding vs contracting motion develop as a function of age, sensitivity measures were normalized by expressing them in terms of relative sensitivity (dB) i.e. the mean sensitivity at each age group was calculated relative to the highest sensitivity (or lowest threshold) for each condition using the following equation:

$$\text{dB} = 20 \times \log_{10} (S_i / S_{max})$$

where  $S_i$  refers to the mean sensitivity at each age group and  $S_{max}$  refers to the minimum mean sensitivity measured for each condition. For each function, 0 dB represents the age group with the highest mean sensitivity for each condition, which in the present study was found in the 8-months of age group for both motion conditions. By measuring the relative sensitivity, the relative rate of decline can be measured independently of absolute differences in sensitivity between expansion and contraction motion conditions. As demonstrated in figure 7, the sensitivity to contracting motion is relatively unchanged across age whereas sensitivity to expanding motion increases with age, particularly between the ages of 2 and 4 months.

*INSERT FIGURE 7 APPROXIMATELY HERE*

## **5.7 Discussion**

The present study is the first to measure motion coherence thresholds derived from psychometric functions to directional radial vs. non-directional radial optic flow

patterns throughout the first months of life. Coherence thresholds were measured with preferential looking method in order to address the development of optical flow sensitivity in infants on a large extent of ages with both between (cross-sectional) and within (longitudinal) designs. Moreover, this investigation is the first to dissociate expansion and contraction coherence thresholds (not preferences) across several infant age groups.

As expected, results from Experiment 1 showed a significant and linear improvement in optic flow sensitivity with age group, with the most significant increase occurring at about 8 months. The average decrease in sensitivity observed for the 10 month group might be explained by the uncooperative tendencies during testing such as shortened attention span, strong desire to explore surroundings other than what was presented to them and decreased ability to stay still during testing. In an attempt to reduce inter-subject variability, sensitivity was measured for a subgroup of infants at 2-month intervals for a period of 6 months (within subject design: from 2 through 8 months of age). Developmental studies often have to deal with large inter-individual discrepancies or variations, not only across age groups, but also within a specific age group. As it was found in Experiment 1, mean sensitivity improved significantly with age. However, the most significant increase occurred between the ages of 2 and 8 months for Experiment 1, but tended to increase more rapidly between 2 and 4 months in Experiment 2. The difference between the two experimental designs, i.e. between vs. within design, might explain the variation between Experiments 1 & 2. Indeed, a longitudinal design might better control for the inter-individual variations between age groups and this might be reflected by an earlier improvement of performances. Furthermore, the similar improvement of performance with development may suggest that our longitudinal results are not the result of learning. Banton and colleagues (1999) have shown a similar developmental pattern between cross-sectional and longitudinal measurements regarding infants' optokinetic responses to leftward or rightward global motion. With identical experimental conditions (stimuli, procedure, etc), they have demonstrated results from between design (cross-sectional) consistent with those from the within design (longitudinal), in the development of the ability to integrate global motion direction.

The motion coherence sensitivity measures obtained in the present study seem consistent with those of Wattam-Bell (1994), although these researchers used a different task; preferential looking of horizontally translating motion stimuli. Mean thresholds were near 70%, 40% and 5-7% for infants of 11 weeks, 16 weeks of age and adults, respectively. An improvement in motion coherence sensitivity through time was also reported in Mason and colleagues (2003) using a preferential looking paradigm. This previous study found no significant improvement in optokinetic nystagmus performance, but preferential looking performance improved significantly with age for coherence threshold of translational motion direction in infants between 6 and 27 weeks of age. Furthermore, this method was used to address cortical mechanisms, consistent with Mason et al. study (2003), who suggested that the preferential looking discrimination of coherence motion depends on a cortical directionally selective system. Our results likely reflect the maturation of extrastriate cerebral visual areas subtending optic flow motion integration (e.g. human homologue of area MST) and their underlying connectivity. Banton & Bertenthal (1997) proposed that the projections from V1 to the MT/MST mature functionally around 2 or 3 months of age, reflected by the emergence of sensitivity to relative motion. The integration of local directional components required for the processing of radial motion requires higher level processing than for simple translation motion, as defined by neurophysiological studies (Saito et al., 1986; Tanaka, Fukada, & Saito, 1989) suggesting posterior cortical areas involved in optic flow analysis.

In the context of other areas of early visual development, a relatively slow development of radial optic flow sensitivity is found compared with grating acuity, which undergoes a relatively rapid development during infancy (Skoczenski & Norcia, 1999, , 2002). The rate of development of radial motion sensitivity seems to be more comparable to stereoacuity or to vernier acuity sensitivity, which are reported to show a slow improvement after a rapid emergence (Birch & Petrig, 1996; Birch & Salomao, 1998; Brown, 1997; Leat, Pierre, Hassan-Abadi, & Faubert, 2001). This slow improvement may not be complete for several years, as evidenced for vernier acuity which is reported to be mature only around 14 years of age with VEP's (Skoczenski & Norcia, 2002). Like radial motion, development of vernier acuity is also known to be

further limited by cortical factors (Levi, Klein, & Aitsebaomo, 1985) and to be a more meaningful indicator of higher order visual function (Skoczenski & Norcia, 1999).

Adult performance was clearly superior to children's for optic flow sensitivity. The gradual increase in coherent motion sensitivity between infancy and adulthood continues until it plateaus, or matures, to adult levels as demonstrated in primates (Kiorpes & Movshon, 2004) and human children with a continued improvement up to around 10 to 11 years of age (Gunn et al., 2002). At the other end of the human lifespan, studies investigating motion coherence sensitivity in non-pathological aging demonstrate that sensitivity to radial motion is selectively affected when compared to translational (unidirectional) motion information (H. L. O'Brien et al., 2001; Warren, Blackwell, & Morris, 1989).

In Experiment 3, different tendencies for the same infants that were tested with the two directions of motion were demonstrated. Our longitudinal results demonstrated superior performances for expansion direction (outward representing movement towards the observer), than for contraction direction (inward representing movement away from the observer) of radial motion. Results may suggest that the sensitivity to the direction corresponding with forward locomotion, e.g. expansion, develops at a faster rate than for the opposite direction encountered when moving backwards, or contraction. The dissociation between the directional mechanisms appears to begin as early as 2 months, but this dissociation becomes statistically significant at the age of 8 months under the experimental conditions used in our study. Consequently, coherence thresholds for expansion may be a more sensitive measure for developmental trends between 2 and 8 months. This expansion / contraction sensitivity discrepancy also validates the specificity of the observed developmental trend toward a genuine preference for optic flow motion rather than only for coherent motion over incoherent motion.

A recent preferential looking study has investigated 2- and 3-months of age infants' preferences for radial expansion and contraction stimuli compared with a random directional pattern using a preference score, measured by the ratio of looking time for the target over total looking time (target and noise pattern) (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2006). They showed a non significant preference for either expanding or

contracting radial motion over the random directional pattern (non-directional noise) at 2-months of age. However, a significant “negative preference” was found for the random motion pattern over contracting, but not expanding motion, at 3-months of age. Based on their results, they suggest that anisotropic motion coherence sensitivity to radial expansion / contraction emerges at around 3 months of age, with a contraction bias. However, we argue that the noise stimuli used in their experiment is much more salient than either of the two directional motions, particularly relative to the contraction motion (preference of random noise over radial stimuli). In fact, in our pilot experiments, we chose not to use a similar random directional stimulus because infants demonstrated greater interest to the random pattern than to the target stimulus, possibly reflecting attentional rather than directional preference. To overcome this possible methodological confound, we have used non-direction radial motion where the only difference between the target and neutral stimuli is the directionality of the information. We therefore argue that *directional* motion mechanisms were assessed, and not motion detection, since the form of the motion stimuli were controlled for (Hutchinson & Ledgeway, 2006; Smith & Ledgeway, 1997).

A bias for expanding optic flow patterns has been extensively reported, mostly in the neurophysiology literature. Centrifugal directional bias of visual neurons has been reported in several animal studies; a marked anisotropy in favor of directions oriented away from the center of gaze, which corresponds to the optic flow field encountered during forward locomotion (expansion of motion) (Albright, 1989; Rauschecker, von Grunau, & Poulin, 1987). A larger proportion of expansion selective neurons, compared with other direction selective neurons is reported in specialized motion responsive areas of macaque monkeys (Anderson & Siegel, 1999; Bremmer, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 2000; Duffy & Wurtz, 1991a; Geesaman & Andersen, 1996; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994; Read & Siegel, 1997; Schaafsma & Duysens, 1996; Siegel & Read, 1997; Tanaka & Saito, 1989) and cats (Brosseau-Lachaine, Faubert, & Casanova, 2001). This bias for outward radial motion can be put in relation with the more ecological egomotion, which is mostly experienced in the forward direction, corresponding with the expansion direction.

Brain imaging in human adults have demonstrated larger activation of the visual occipito-parietal areas when stimulated with expanding compared to contracting motion (Ptito, Kupers, Faubert, & Gjedde, 2001). However, psychophysical studies with adults have failed to find a bias for expanding motion stimuli (Beardsley & Vaina, 2005; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). However, Beardsley & Vaina (2005) have noted the compelling similarity between the bias for expansion in MSTd and their measured preference for radial motions. Also, anisotropic responses to motion in depth were reported in favor of an approaching motion toward the eye (Lewis & McBeath, 2004; Perrone, 1986). Finally, studies conducted with very young infants have demonstrated defensive behavioral responses to various expanding stimulus (Ball, Ballot, & Dibble, 1983; Ball & Tronick, 1971; Yonas, Pettersen, & Lockman, 1979) suggesting that these defensive responses to looming stimuli might be mediated by sub-cortical pathway, rather than a motion sensitivity mediated by cortical mechanisms (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004a).

Does the locomotion experience influence the development of optic flow sensitivity? In our sample children were mostly assessed during a "pre-locomotion" stage but experienced substantial passive displacement in the rigid environment, causing optical flow in either direction. Interestingly, the majority of infants in our sample begin to experience active egomotion, such as crawling, near the 8<sup>th</sup> month period. These first active displacements in space for visually guided behavior may be put in relation with our results that have demonstrated significant differences specifically at 8 months for Experiment 1 & 3.

Moreover, a study addressed the role of locomotor experience of 9-months of age infants for their postural responsiveness to global optic flow (front wall, ceiling, side walls and floor) with or without terrestrial information in a moving room (Lejeune et al., 2006); only a weak relation between locomotor status and movement of the floor was found. Previous studies have shown that infants with locomotor experience were significantly more physically responsive to peripheral optic flow from the side walls of a moving room than were pre-locomotor infants (Higgins, Campos, & Kermoian, 1996). However, no differences in their responsiveness were seen between groups (locomotor

and pre-locomotor) to the combined movement of the front wall, side walls and ceiling of the moving room. They suggested that infants have the requisite postural control to respond appropriately to flow fields prior to the onset of locomotion, but locomotor experience appears necessary to functionalize lamellar optic flow in the periphery of the optic array for postural control (Higgins, Campos, & Kermoian, 1996). Furthermore, it has been shown that postural responsiveness to optic flow peaks at around 9-months of age and drops somewhat thereafter (Bertenthal, Rose, & Bai, 1997; Delorme, Frigon, & Lagace, 1989), revealing that more experience does not automatically translate to greater postural responsiveness.

Animal experiments have addressed whether early visual experience guides the development of the bias for a centrifugal organization of the directional preference in cat extrastriate cortex (lateral suprasylvian area) (Brenner & Rauschecker, 1990). Kittens were exposed to either expanding or contracting motions (otherwise in the dark), during their 4<sup>th</sup> to 11<sup>th</sup> weeks of life. Interestingly, their results showed that the centrifugal bias would be independent of specific visual exposure, because neurons from both groups demonstrated this bias. From their results, the authors concluded that the bias for centrifugal motion, as encountered in forward locomotion, is probably innately determined as a phylogenetic adaptation and independent of early flow field exposure.

In conclusion, the present study demonstrated the development of optic flow motion sensitivity during the first year of life. This study is the first to measure coherence sensitivity to radial optic flow, with thresholds derived from psychometric functions in infants on a large age range and with both within and between designs. Our findings demonstrate that infants can perceive this complex motion as early as 2 months of age and that the mechanisms underlying this perception matures with age, particularly for expanding radial information. Directional mechanisms for radial optic flow were demonstrated to be present around 8 months of age. Moreover, longitudinal measurements with infants have revealed different time courses in their improvement. This may be due to different developmental trends and/or visuo-motor experience. Further research will be needed to address this specific question and to assess developmental trends of optical flow perception in later childhood.



## **5.8 Acknowledgements**

We thank all the kind and generous parents and their children for making this study possible. We also thank Armando Bertone for his helpful comments on the manuscript. Part of this research has been presented at the annual meeting of Vision Science Society in Sarasota, Florida, 2004. This work was supported by the Canadian Institutes of Health Research (postgraduate scholarship to OBL and grants awarded to JF and to CC) and the 'Fonds de la Recherche en Santé du Québec – Réseau de recherche en santé de la vision' (postgraduate scholarship to OBL).

## 5.9 References

- Albright, T. D. (1989). Centrifugal directional bias in the middle temporal visual area (MT) of the macaque. *Vis Neurosci*, 2(2), 177-188.
- Anderson, K. C., & Siegel, R. M. (1999). Optic flow selectivity in the anterior superior temporal polysensory area, STPa, of the behaving monkey. *J Neurosci*, 19(7), 2681-2692.
- Ball, W., Ballot, R., & Dibble, A. (1983). Stimulus dimensionality and infants' perceived movement in depth. *J Genet Psychol*, 143(2d Half), 193-200.
- Ball, W., & Tronick, E. (1971). Infant responses to impending collision: optical and real. *Science*, 171(973), 818-820.
- Banton, T., & Bertenthal, B. I. (1997). Multiple developmental pathways for motion processing. *Optom Vis Sci*, 74(9), 751-760.
- Banton, T., Bertenthal, B. I., & Seaks, J. (1999). Infants' sensitivity to statistical distributions of motion direction and speed. *Vision Res*, 39(20), 3417-3430.
- Banton, T., Dobkins, K., & Bertenthal, B. I. (2001). Infant direction discrimination thresholds. *Vision Res*, 41(8), 1049-1056.
- Beardsley, S. A., & Vaina, L. M. (2005). Psychophysical evidence for a radial motion bias in complex motion discrimination. *Vision Res*, 45(12), 1569-1586.
- Bertenthal, B. I., Rose, J. L., & Bai, D. L. (1997). Perception-action coupling in the development of visual control of posture. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(6), 1631-1643.
- Birch, E., & Petrig, B. (1996). FPL and VEP measures of fusion, stereopsis and stereoacuity in normal infants. *Vision Res*, 36(9), 1321-1327.
- Birch, E., & Salomao, S. (1998). Infant random dot stereoacuity cards. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 35(2), 86-90.
- Bremmer, F., Duhamel, J. R., Ben Hamed, S., & Graf, W. (2000). Stages of self-motion processing in primate posterior parietal cortex. *Int Rev Neurobiol*, 44, 173-198.
- Brenner, E., & Rauschecker, J. P. (1990). Centrifugal motion bias in the cat's lateral suprasylvian visual cortex is independent of early flow field exposure. *J Physiol*, 423, 641-660.

- Brosseau-Lachaine, O., Faubert, J., & Casanova, C. (2001). Functional sub-regions for optic flow processing in the posteromedial lateral suprasylvian cortex of the cat. *Cereb Cortex, 11*(10), 989-1001.
- Brown, A. M. (1997). Vernier acuity in human infants: rapid emergence shown in a longitudinal study. *Optom Vis Sci, 74*(9), 732-740.
- Delorme, A., Frigon, J. Y., & Lagace, C. (1989). Infants' reactions to visual movement of the environment. *Perception, 18*(5), 667-673.
- Duffy, C. J. (2000). Optic flow analysis for self-movement perception. *Int Rev Neurobiol, 44*, 199-218.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1991a). Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. I. A continuum of response selectivity to large-field stimuli. *J Neurophysiol, 65*(6), 1329-1345.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1991b). Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. II. Mechanisms of response selectivity revealed by small-field stimuli. *J Neurophysiol, 65*(6), 1346-1359.
- Dukelow, S. P., DeSouza, J. F., Culham, J. C., van den Berg, A. V., Menon, R. S., & Vilis, T. (2001). Distinguishing subregions of the human MT+ complex using visual fields and pursuit eye movements. *J Neurophysiol, 86*(4), 1991-2000.
- Geesaman, B. J., & Andersen, R. A. (1996). The analysis of complex motion patterns by form/cue invariant MSTd neurons. *J Neurosci, 16*(15), 4716-4732.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston,: Houghton Mifflin.
- Gilmore, R. O., Baker, T. J., & Grobman, K. H. (2004). Stability in young infants' discrimination of optic flow. *Dev Psychol, 40*(2), 259-270.
- Graziano, M. S., Andersen, R. A., & Snowden, R. J. (1994). Tuning of MST neurons to spiral motions. *J Neurosci, 14*(1), 54-67.
- Gunn, A., Cory, E., Atkinson, J., Braddick, O., Wattam-Bell, J., Guzzetta, A., et al. (2002). Dorsal and ventral stream sensitivity in normal development and hemiplegia. *Neuroreport, 13*(6), 843-847.
- Higgins, C. I., Campos, J. J., & Kermoian, R. (1996). Effect of self-produced locomotion on infant postural compensation to optic flow. *Developmental Psychology, 32*(5), 836-841.

- Hutchinson, C. V., & Ledgeway, T. (2006). Sensitivity to spatial and temporal modulations of first-order and second-order motion. *Vision Res*, *46*(3), 324-335.
- Jouen, F., & Lepecq, J. C. (1989). La sensibilité au flux optique chez le nouveau-né. *Psychologie Française*, *34*, 13-18.
- Kiorpes, L., & Movshon, J. A. (2004). Development of sensitivity to visual motion in macaque monkeys. *Vis Neurosci*, *21*(6), 851-859.
- Kremenitzer, J. P., Vaughan, H. G., Jr., Kurtzberg, D., & Dowling, K. (1979). Smooth-pursuit eye movements in the newborn infant. *Child Dev*, *50*(2), 442-448.
- Lagae, L., Maes, H., Raignel, S., Xiao, D. K., & Orban, G. A. (1994). Responses of macaque STS neurons to optic flow components: a comparison of areas MT and MST. *J Neurophysiol*, *71*(5), 1597-1626.
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. V. (1999). Perception of self-motion from visual flow. *Trends Cogn Sci*, *3*(9), 329-336.
- Leat, S. J., Pierre, J. S., Hassan-Abadi, S., & Faubert, J. (2001). The moving Dynamic Random Dot Stereotest: development, age norms, and comparison with the Frisby, Randot, and Stereo Smile tests. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, *38*(5), 284-294.
- Lee, D. N. (1980). The optic flow field: the foundation of vision. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *290*(1038), 169-179.
- Lejeune, L., Anderson, D. I., Campos, J. J., Witherington, D. C., Uchiyama, I., & Barbur-Roth, M. (2006). Responsiveness to terrestrial optic flow in infancy: does locomotor experience play a role? *Hum Mov Sci*, *25*(1), 4-17.
- Levi, D. M., Klein, S. A., & Aitsebaomo, A. P. (1985). Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision Res*, *25*(7), 963-977.
- Lewis, C. F., & McBeath, M. K. (2004). Bias to experience approaching motion in a three-dimensional virtual environment. *Perception*, *33*(3), 259-276.
- Mason, A. J., Braddick, O. J., & Wattam-Bell, J. (2003). Motion coherence thresholds in infants--different tasks identify at least two distinct motion systems. *Vision Res*, *43*(10), 1149-1157.
- Maunsell, J. H., & Newsome, W. T. (1987). Visual processing in monkey extrastriate cortex. *Annu Rev Neurosci*, *10*, 363-401.

- McDonald, M. A., Dobson, V., Sebris, S. L., Baitch, L., Varner, D., & Teller, D. Y. (1985). The acuity card procedure: a rapid test of infant acuity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 26(8), 1158-1162.
- Morrone, M. C., Burr, D. C., Di Pietro, S., & Stefanelli, M. A. (1999). Cardinal directions for visual optic flow. *Curr Biol*, 9(14), 763-766.
- Morrone, M. C., Burr, D. C., & Vaina, L. M. (1995). Two stages of visual processing for radial and circular motion. *Nature*, 376(6540), 507-509.
- Morrone, M. C., Tosetti, M., Montanaro, D., Fiorentini, A., Cioni, G., & Burr, D. C. (2000). A cortical area that responds specifically to optic flow, revealed by fMRI. *Nat Neurosci*, 3(12), 1322-1328.
- O'Brien, H. L., Tetewsky, S. J., Avery, L. M., Cushman, L. A., Makous, W., & Duffy, C. J. (2001). Visual mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Cereb Cortex*, 11(11), 1083-1092.
- Perrone, J. A. (1986). Anisotropic responses to motion toward and away from the eye. *Percept Psychophys*, 39(1), 1-8.
- Ptito, M., Kupers, R., Faubert, J., & Gjedde, A. (2001). Cortical representation of inward and outward radial motion in man. *Neuroimage*, 14(6), 1409-1415.
- Rauschecker, J. P., von Grunau, M. W., & Poulin, C. (1987). Centrifugal organization of direction preferences in the cat's lateral suprasylvian visual cortex and its relation to flow field processing. *J Neurosci*, 7(4), 943-958.
- Read, H. L., & Siegel, R. M. (1997). Modulation of responses to optic flow in area 7a by retinotopic and oculomotor cues in monkey. *Cereb Cortex*, 7(7), 647-661.
- Saito, H., Yukie, M., Tanaka, K., Hikosaka, K., Fukada, Y., & Iwai, E. (1986). Integration of direction signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci*, 6(1), 145-157.
- Schaafsma, S. J., & Duysens, J. (1996). Neurons in the ventral intraparietal area of awake macaque monkey closely resemble neurons in the dorsal part of the medial superior temporal area in their responses to optic flow patterns. *J Neurophysiol*, 76(6), 4056-4068.

- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2004a). Asymmetry for the perception of expansion/contraction in infancy. *Infant Behavior & Development*, 27(3), 315-322.
- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2004b). Sensitivity to linear-speed-gradient of radial expansion flow in infancy. *Vision Res*, 44(27), 3111-3118.
- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2006). Anisotropic motion coherence sensitivities to expansion/contraction motion in early infancy. *Infant Behav Dev*, 29(2), 204-209.
- Siegel, R. M., & Read, H. L. (1997). Analysis of optic flow in the monkey parietal area 7a. *Cereb Cortex*, 7(4), 327-346.
- Skoczenski, A. M., & Norcia, A. M. (1999). Development of VEP Vernier acuity and grating acuity in human infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 40(10), 2411-2417.
- Skoczenski, A. M., & Norcia, A. M. (2002). Late maturation of visual hyperacuity. *Psychol Sci*, 13(6), 537-541.
- Smith, A. T., & Ledgeway, T. (1997). Separate detection of moving luminance and contrast modulations: fact or artifact? *Vision Res*, 37(1), 45-62.
- Snowden, R. J., & Milne, A. B. (1997). Phantom motion after effects--evidence of detectors for the analysis of optic flow. *Curr Biol*, 7(10), 717-722.
- Tanaka, K., Fukada, Y., & Saito, H. A. (1989). Underlying mechanisms of the response specificity of expansion/contraction and rotation cells in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *J Neurophysiol*, 62(3), 642-656.
- Tanaka, K., Hikosaka, K., Saito, H., Yukie, M., Fukada, Y., & Iwai, E. (1986). Analysis of local and wide-field movements in the superior temporal visual areas of the macaque monkey. *J Neurosci*, 6(1), 134-144.
- Tanaka, K., & Saito, H. (1989). Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *J Neurophysiol*, 62(3), 626-641.
- Teller, D. Y., McDonald, M. A., Preston, K., Sebris, S. L., & Dobson, V. (1986). Assessment of visual acuity in infants and children: the acuity card procedure. *Dev Med Child Neurol*, 28(6), 779-789.

- Tohyama, K., & Fukushima, K. (2005). Neural network model for extracting optic flow. *Neural Netw*, 18(5-6), 549-556.
- Vaina, L. M., & Rushton, S. K. (2000). What neurological patients tell us about the use of optic flow. *Int Rev Neurobiol*, 44, 293-313.
- Volkman, F. C., & Dobson, M. V. (1976). Infant responses of ocular fixation to moving visual stimuli. *J Exp Child Psychol*, 22(1), 86-99.
- Warren, W. H., Jr., Blackwell, A. W., & Morris, M. W. (1989). Age differences in perceiving the direction of self-motion from optical flow. *J Gerontol*, 44(5), P147-153.
- Wattam-Bell, J. (1994). Coherence thresholds for discrimination of motion direction in infants. *Vision Res*, 34(7), 877-883.
- Wattam-Bell, J. (1996a). Visual motion processing in one-month-old infants: preferential looking experiments. *Vision Res*, 36(11), 1671-1677.
- Wetherill, G. B., & Levitt, H. (1965). Sequential Estimation of Points on a Psychometric Function. *Br J Math Stat Psychol*, 18, 1-10.
- Yonas, A., Pettersen, L., & Lockman, J. J. (1979). Young infant's sensitivity to optical information for collision. *Can J Psychol*, 33(4), 268-276.

## 5.10 Figure Legends

### Fig.1

Schematic illustration of the preferential looking display for radial optic flow motion as seen by the participants. The radial motion of the dots is illustrated by the arrows. In this example, the “target display” is located to the left and demonstrates a 100% coherence outward (expansion) direction of motion. The “neutral display”, incoherent, is located to the right and shows non-directional radial motion.

### Fig.2

Results from Experiment 1: cross-sectional measurements. A) Coherence thresholds obtained from each participant are plotted as a function of age groups for radial outward optic flow display. Open circles represents thresholds for children and triangles for adults. B) Mean coherence threshold are shown for each age group and for adults (+ 1 SEM).

### Fig.3

Individual examples of psychometric functions with Weibull fitted curves, for each age group. Examples that were close to the mean threshold were chosen.

### Fig.4

Results from Experiment 2: longitudinal follow-up. A) Individual coherence thresholds are depicted as a function of age group. The different symbols denote the different infants. Note that for participant 1, thresholds were not reached at 2 and 4



months of age. B) Mean performance of the seven infants studied are shown for each age group (+ 1 SEM). Adult data are also shown in each graph.

**Fig.5**

Results from Experiment 3, for each of the 7 infants. Coherence thresholds are plotted for expanding (empty circles) and contracting (full circles) optic flow displays as a function of age.

**Fig.6**

Bar plot showing mean performance of participants for the two conditions: expansion (empty bars) and contraction (full bars) motion direction. Mean coherence thresholds are plotted as a function of age groups (+ 1 SEM).

**Fig.7**

Relative sensitivity (dB) for expansion (outward) and contraction (inward) conditions as a function of age tested.

## 5.11 Figures

**Figure 5-1:** Schematic illustration of the preferential looking display for optic flow motion.

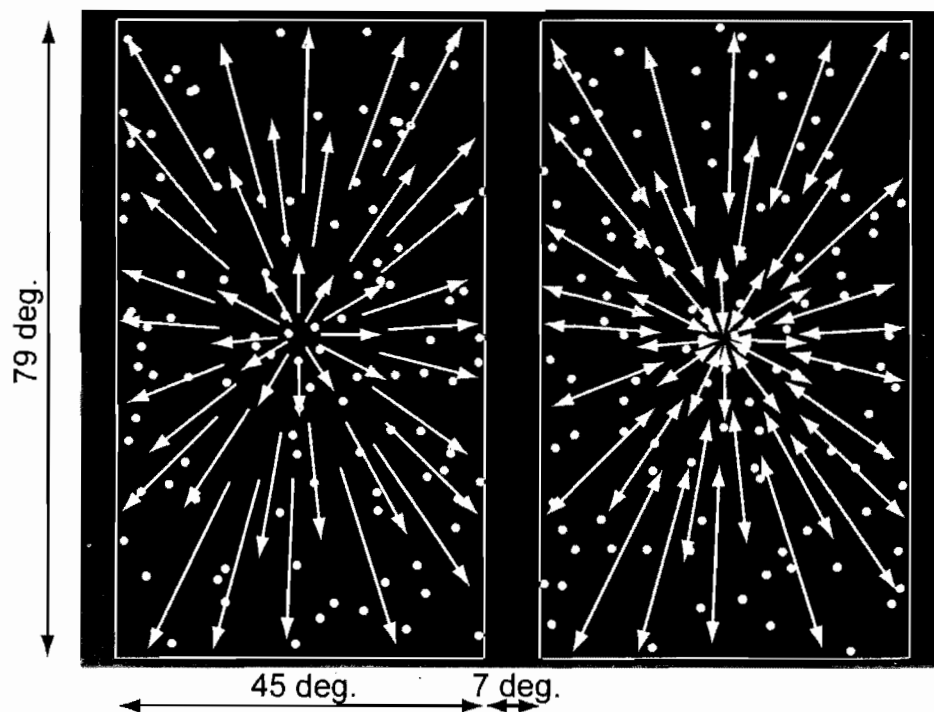
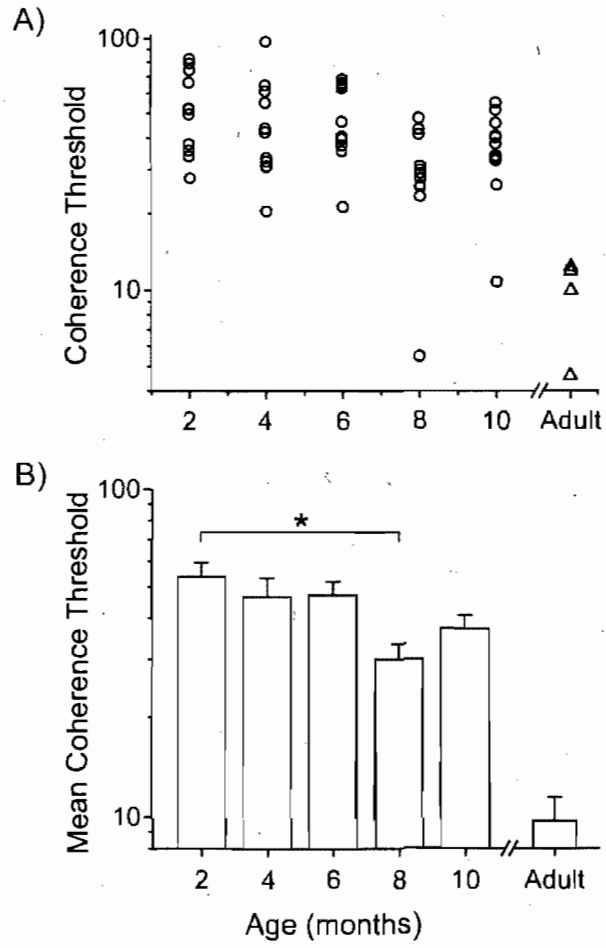


Figure 5-2: Results from Experiment 1: cross-sectional measurements.



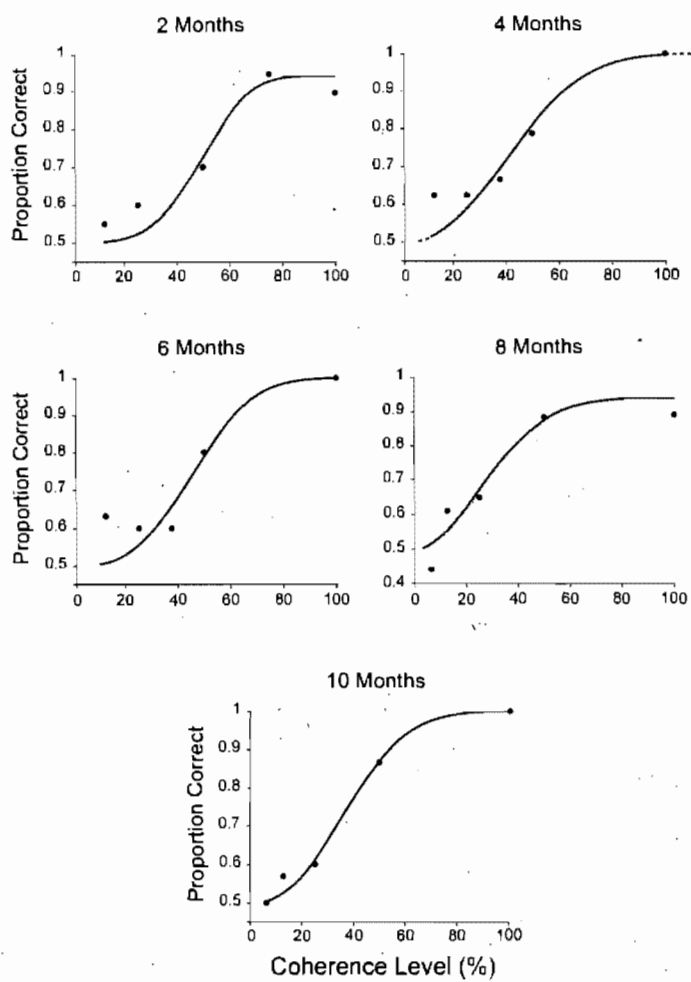
**Figure 5-3: Individual examples of psychometric functions for each age group**

Figure 5-4: Results from Experiment 2: longitudinal follow-up.

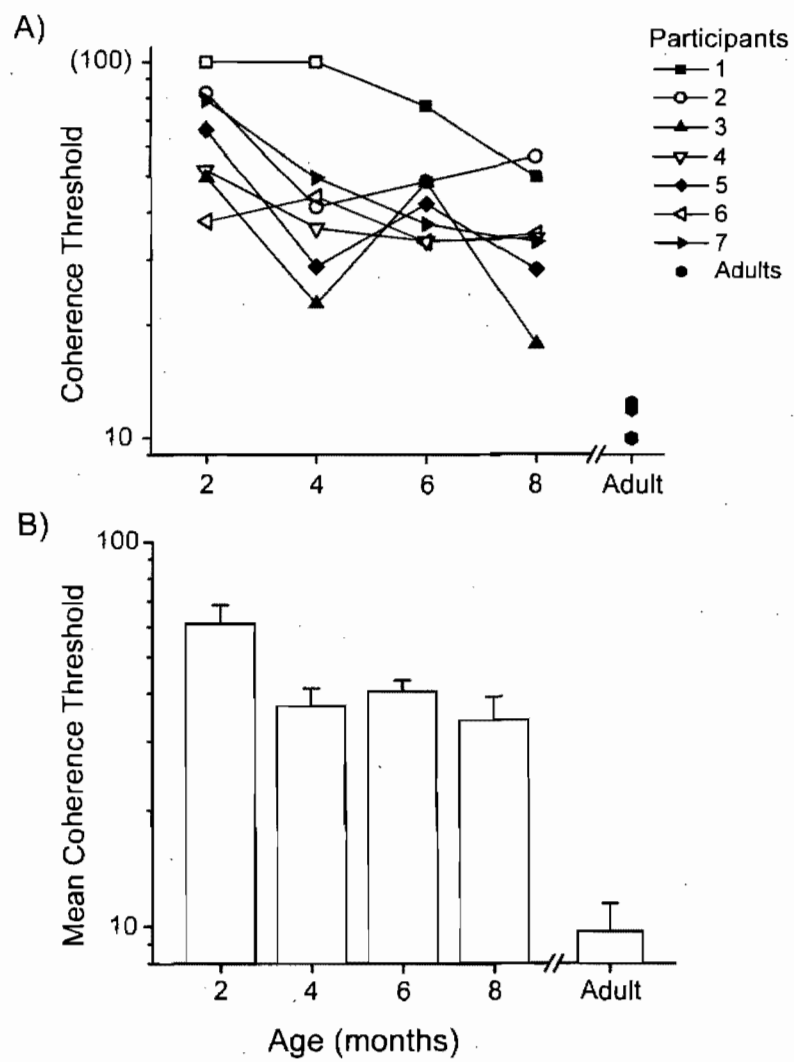
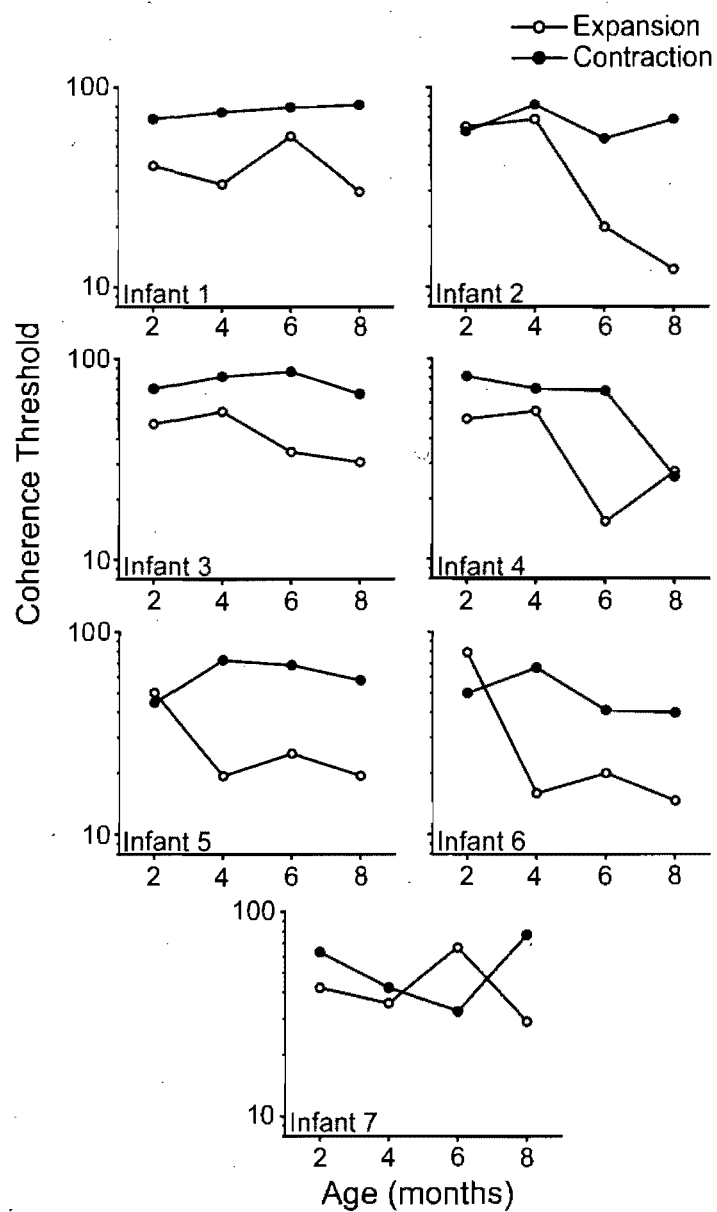


Figure 5-5: Individual results from Experiment 3.



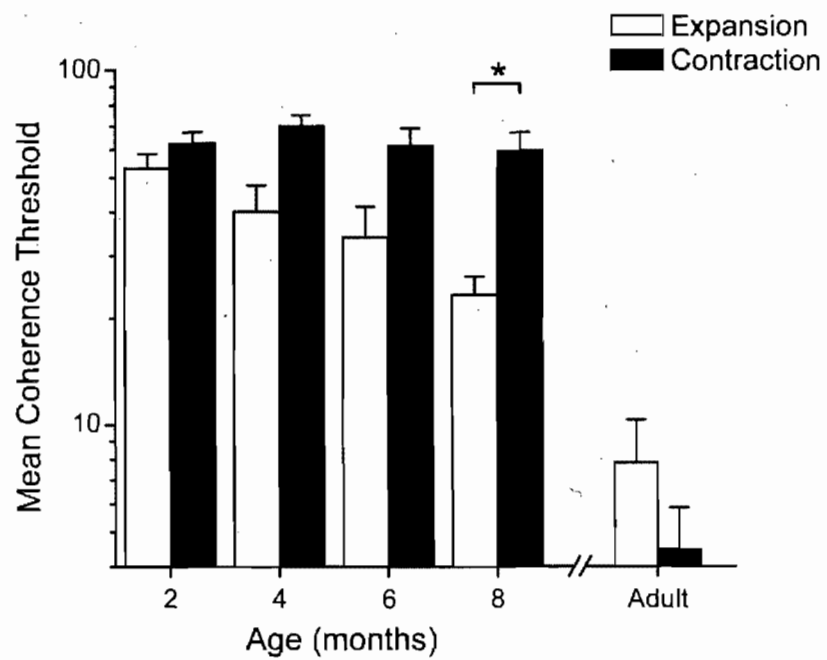
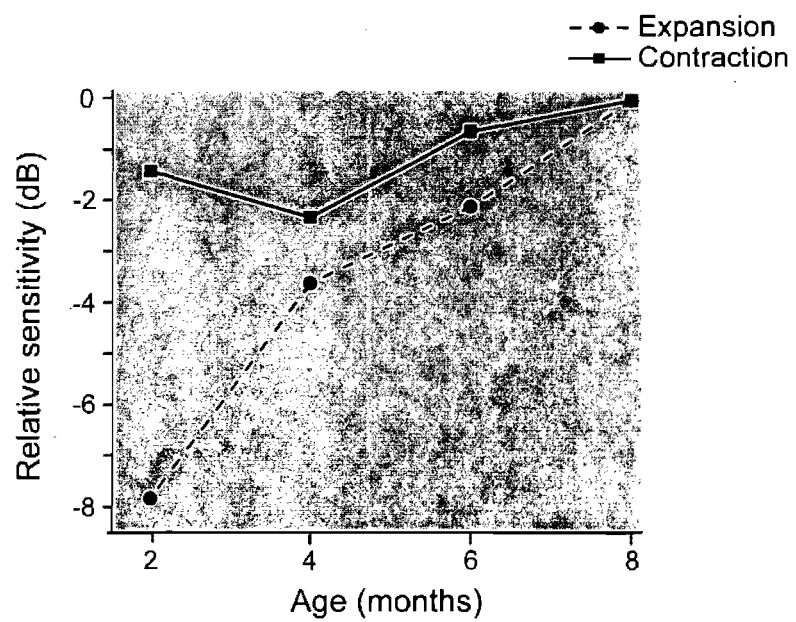
**Figure 5-6:** Bar plot from Experiment 3.

Figure 5-7: Relative sensitivity (dB) for expansion and contraction conditions.





## **CHAPITRE 6**

## Deuxième article

### **Mild Traumatic Brain Injury induces prolonged visual processing deficits in children.**

Odile Brosseau-Lachaine<sup>1</sup>, Isabelle Gagnon<sup>3,5</sup>,  
Robert Forget<sup>2,4</sup> & Jocelyn Faubert<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Visual psychophysics and perception laboratory,

École d'optométrie, Université de Montréal (Québec), Canada.

<sup>2</sup> École de réadaptation, Faculté de Médecine, Université de Montréal (Québec), Canada.

<sup>3</sup> Trauma and Injury Prevention Program, Montreal Children's Hospital,

McGill University Health Center (Québec), Canada.

<sup>4</sup> Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal Métropolitain  
(CRIR), Montréal (Québec), Canada.

<sup>5</sup> Administration de la santé, Faculté de Médecine, Université de Montréal (Québec),  
Canada

Article à soumettre à *Brain Injury*

## **Contributions des auteurs**

**Odile Brosseau-Lachaine :** Élaboration du protocole, démarches pour les approbations éthiques aux comités, recrutement des participants, évaluation des participants (cueillette des données), analyse des données, analyse statistique, interprétation des résultats, rédaction de l'article.

**Isabelle Gagnon :** Recrutement des participants, élaboration du protocole, supervision lors de la rédaction du manuscrit.

**Robert Forget :** Élaboration du protocole, supervision pour la rédaction du manuscrit.

**Jocelyn Faubert :** Élaboration du protocole, supervision pour l'interprétation des résultats et la rédaction du manuscrit.

## 6.1 Abstract

It is important to assess children's visual perception after mild traumatic brain injury (mTBI) to ensure a safer return to their activities and sports. In this study, we compared the sensitivity to simple and complex visual stimuli of children who have sustained mild TBI to that of matched non-injured children. We also assessed the evolution of visuo-perceptual performance over time. A prospective design was used to assess eighteen children with mild TBI and 18 matched healthy controls (8 to 16 years of age). Sensitivity to static and dynamic forms of simple (first-order) and complex (second-order) stimuli were assessed at 1, 4 and 12 weeks post-injury and at equivalent times for controls. Orientation and direction identification thresholds were measured for all participants for static and dynamic conditions respectively. In addition, sensitivity to radial optic flow (inward vs outward) a complex motion stimulus, was assessed. The results showed that thresholds measured from all complex stimuli were significantly affected for the mild TBI children over time whereas no difference in threshold between groups across all testing conditions was found for simple, first-order information. Sensitivity to all complex stimuli was still affected 12 weeks after the injury. These findings suggest that injured children present selective processing deficits for higher-order information and that this deficit persists over relatively long periods. Such measures could be used to assess the cognitive status of children who have sustained TBI and possibly determine the potential risk of returning these children to certain demanding physical activities.

**Keywords:** visual perception; sensory integration; mild traumatic brain injury; pediatrics; second-order; optic flow.

**Running title:** Long-term effects of mTBI on vision.

## 6.2 Introduction

Mild traumatic brain injuries (mTBI) represent over 85% of the 1.5 million traumatic brain injuries occurring annually in the USA and the reported annual incidence of mild TBI in the child population (aged 5-14) in 1998-2000 was 733.3 per 100 000 (Bazarian et al., 2005). Diffuse microscopic damage at neuronal, vascular and axonal levels are usually the result of the acceleration-deceleration and rotational forces in TBI (Gaetz, 2004; Levin, Amparo et al., 1987; Oppenheimer, 1968).

Despite normal structural neuroradiological results in mild TBI, several physical, cognitive or emotional post-concussion symptoms are frequently reported in the first 3 months post-injury (Mittenberg & Strauman, 2000). Most of the research concerning the consequences of mild brain injury have focused on cognitive functioning and generally report impaired information processing speed, working memory, attention, memory and executive functions (Binder, Rohling, & Larrabee, 1997; Frencham, Fox, & Maybery, 2005; Satz et al., 1997). More recently, balance deficits have been documented in mTBI children (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a) and adults (Slobounov, Sebastianelli, & Moss, 2005; Slobounov, Sebastianelli, & Simon, 2002; Slobounov, Tutwiler, Sebastianelli, & Slobounov, 2006).

A previous study has investigated visuo-motor performances of children with mTBI and demonstrated that the injured children manifested motor response time deficits in particular experimental conditions involving complex visual stimuli (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004b). The authors questioned if the nature of the visual stimulus itself (i.e., complex) could have contributed to the difference in visuo-motor performance of the children with and without mTBI. Moreover, a visual evoked potential (VEP) investigation in adults has demonstrated that the texture segregated VEP were sensitive to mild to moderate TBI, and suggested possible resulting visual information processing deficits (Lachapelle, Ouimet, Bach, Ptito, & McKerral, 2004).

To our knowledge, no study has investigated the perception of complex visual stimuli in children who suffered a mTBI. It is important to examine the consequences of

brain injury on visual perception: to behave and navigate through our environment in an efficient and adaptive manner we must first construct a visual representation of our surroundings. In order to do this, our visual brain must integrate local information across time and space into a coherent visual percept.

One way to investigate the capacity of children who suffered from a mild TBI to visually integrate information is to use simple orientation- and direction-identification paradigms for static and moving stimuli respectively. One such paradigm uses first- and second-order visual stimuli that differ in the amount of neural integration needed to perceive its direction or orientation; probing either early- or later-level visual cortical function (Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988; Nishida, Ledgeway, & Edwards, 1997; Wilson, Ferrera, & Yo, 1992). Measurements of the sensitivity to first- and second-order motion have been demonstrated to be very sensitive to subtle neural deficits in different populations such as non-pathological aging (Habak & Faubert, 2000), high-functioning autism (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005) and fragile X syndrome (Kogan, Bertone et al., 2004).

Another type of complex and dynamic visual information is referred to as optic flow motion. Optic flow is also a type of complex motion information that has great ecological validity since it exemplifies the visual pattern perceived as we navigate through our environment (Gibson, 1979; Wurtz, 1998).

The present study assessed the perception of simple and complex visual stimuli after a mTBI in children, in the acute phase. The objectives were to 1) determine whether children who have sustained a mTBI present a decreased sensitivity for complex visual stimuli compared to matched non-injured children and 2) to investigate during 3 months the evolution of the visual perceptual performance of children without mTBI and during the first 3 months following the injury in children with mTBI.

## 6.3 Methods

### 6.3.1 Participants

Eighteen children having sustained a mTBI and an equivalent number of children without any history of brain injury accepted to participate in this study. All participants were aged between 8 and 16 years. Children from mTBI group were recruited from consecutive hospital admissions to the Trauma and Injury Prevention Program from the Montreal Children's Hospital (McGill University Health Center, Montreal, Canada) and to the Emergency Department of Sainte-Justine Hospital (Montreal University Hospital Center, Montreal, Canada). All injured participants were considered normal on a standard neurological examination done prior to discharge from the hospital. The inclusion criterion for the injured group was a diagnosis of mild TBI made by the professionals of the recruiting hospitals, as defined by the American Congress of Rehabilitation Medicine (1993) and the WHO Collaborating Center for Neurotrauma Task Force on mTBI (Carroll, Cassidy, Holm, Kraus, & Coronado, 2004). This includes at least one of the following criteria after an acute brain injury resulting from mechanical energy to the head: confusion or disorientation, loss of consciousness for 30 minutes or less, any loss of memory for events immediately before or after the accident lasting less than 24 hours, and/or other transient neurological abnormalities not requiring surgery. Also, a Glasgow Coma Scale (GCS) score of 13-15 within 30 minutes of the injury (ACRM, 1993; Carroll, Cassidy, Holm, Kraus, & Coronado, 2004). Participants received a complete eye exam by an optometrist and had to have normal or corrected-to-normal vision (acuity of 6/6 or better), a normal ocular health (pupillary reflexes, ocular motilities, biomicroscopia and fundus) and binocular vision (excluding heterophoria and tropia, normal stereoscopic vision). All participants had typical academic backgrounds (i.e. they attended age-appropriate classes, according to standard school schedules in Quebec) and development. They were screened to exclude pre-morbid diagnosis of learning disabilities, attention deficits and hyperactivity disorder as well as regular use of psychostimulant drugs and/or behaviour problems, according to their parents.

Children for the comparison group were recruited from friends of mTBI children when possible, or from the community. The groups were matched as closely as possible in terms of gender and chronological age. They had no history of any form of head injury. The mean chronological age of the children included in the mTBI and control groups were 12.56 SD 2.38 and 12.44 SD 2.37, respectively (for children aged between 8 and 16 y.o.).

*INSERT TABLE 1 NEAR HERE*

Table 1 (*tableau 6-1*) presents the characteristics of the brain injury sustained by our sample (mTBI group). Reported injuries occurred frequently from accidental impacts to the head (hits and/ or falls) during recreational activities, such as bicycling, playing hockey, basketball, soccer, football or skiing. The majority of our sample had a GCS score of 15 at the admission to the hospital (average of 14.72). The severity of the concussion sustained was of grade 2 for 61% and of grade 3 for 39% of our sample, as per the American Academy of Neurology practice parameters (1997).

An informed written consent was obtained from all participants and their legal guardians, prior to data collection, and was obtained according to the Declaration of Helsinki. Participants received monetary compensations to cover the expenses related to their involvement in the study. The ethics and scientific committees from the Institutional Review board of the Montreal Children's Hospital and the Sainte-Justine Hospital approved the study.

### **6.3.2 Apparatus**

The stimuli were presented and the data were collected by a Power Macintosh G3 computer. Presentation was done on a 16-inch Apple monitor for first- and second-order stimuli with a frame refresh rate of 75 Hz and a screen resolution of 1024 x 768 pixels. For optic flow stimuli, stimuli were rear-projected (InFocus LCD projector, LP725) on a large light diffusing tangent screen (Da-lite; 1.06 x 0.8 m) with a frame refresh rate of 60 Hz and a screen resolution of 800 x 600 pixels. Stimulus generation and animation was controlled by the VPixx © graphics program, version 1.88



(www.vpixx.com). Calibration and luminance readings were regularly measured using a Minolta CS-100 Chromameter. To minimize non-linearity in the display, the luminance of the monitor was gamma-corrected, implemented with a colour calibration within the VPixx © program.

### 6.3.3 Psychophysical tasks

Participants underwent psychophysical testing to determine their visuo-perceptual thresholds for static and dynamic first- and second-order stimuli and radial optic flow stimuli using two-alternative forced choice (2-AFC) orientation or direction discrimination.

#### 6.3.3.1 Static conditions

Figure 1 represents a schematic of the first- and second-order stimuli that were used to assess perceptual performances in children after a mTBI.

*INSERT FIGURE 1 NEAR HERE*

The static conditions required participants to identify the orientation of horizontal or vertical gratings, presented as first- or second-order patterns. Each stimulus was within a hard-edged circular region at the centre of the display, subtending 10 degrees in diameter at a viewing distance of 57 cm. The mean luminance of the display was  $30.5 \text{ cd/m}^2$  ( $u' = 0.1918$ ,  $v' = 0.4344$  in CIE [Commission Internationale de l'Éclairage]  $u' v'$  color space) where  $L_{\min}$  was 0.5 and  $L_{\max}$  was  $60.5 \text{ cd/m}^2$ . First-order stimuli were a simple type of stimuli that were luminance-defined (luminance-modulation depth) and were constructed by adding static grayscale noise (1x1 pixel; measuring approximately 1.86 minutes arc) to a static modulating sine wave grating. While second-order stimuli, a complex type of stimulus, were texture-defined (contrast-modulation depth) and produced by multiplying rather than adding the static grayscale noise to the modulating sine wave grating. The noise dots' individual luminances were randomly assigned as a function of  $\sin(x)$ , where  $(x)$  ranged from 0 to  $2\pi$ . The average

contrast of the noise was set at half its maximum value. All stimuli had a spatial frequency of 0.5 cycle per degree (cpd).

The orientation-identification thresholds for the first-order stimuli were found by varying the contrast, i.e. the luminance modulation depth, defined as the amplitude of the modulating sine wave, which ranged between 0.0 and 0.5:

$$\text{Luminance modulation depth} = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$$

where  $L_{\max}$  and  $L_{\min}$  refer to the average highest and lowest local luminances in the stimulus. These first-order patterns were presented at five to six levels of luminance modulation along log steps (0.04, 0.02, 0.01, 0.005, 0.0025 and 0.00125).

Thresholds for second-order stimuli were found by varying the contrast-modulation depth of the static pattern, defined as the amplitude of the modulating sine wave, which ranged between 0.0 and 1.0:

$$\text{Contrast modulation depth} = (C_{\max} - C_{\min}) / (C_{\max} + C_{\min})$$

where  $C_{\max}$  and  $C_{\min}$  are the maximum and minimum local contrasts in the pattern. This type of stimulus was also presented at five to six predetermined levels of contrast modulation (0.5, 0.25, 0.125, 0.0625, 0.0314 and 0.0156).

### 6.3.3.2 Dynamic conditions

The stimuli used for the direction-identification task in the dynamic condition are illustrated in Figure 1B. Except for their dynamic characteristic, the moving stimuli used for the direction-identification task were identical with the static stimuli previously described for the orientation-identification task in terms of physical properties and parameters. The vertically-oriented gratings were moving either to the right or to the left, with a drift frequency of 2 Hz. First- and second-order dynamic patterns were also constructed by adding or multiplying static grayscale noise to the modulating sine wave grating. The dynamic first-order patterns were presented at five to six levels of luminance modulation (0.02, 0.01, 0.005, 0.0025, 0.00125 and 0.000625). For the

dynamic second-order patterns, the same levels of contrast modulation were presented as for static second-order stimuli.

### 6.3.3.3 Optic flow stimuli

Radial optic flow stimuli used in this study simulate an observer moving in translation through a circular tunnel (Habak, Casanova, & Faubert, 2002). A fixation point appeared first for 1 second in the centre of the screen (red dot subtending  $0.5^\circ$ ). Then, a radial outward or inward moving pattern appeared for 1 second. The pattern was constructed with 150 moving white dots ( $10 \text{ cd/m}^2$ ;  $0.52^\circ \times 0.52^\circ$  of visual angle), randomly distributed (with uniform density) on a dark background ( $1.8 \text{ cd/m}^2$ ; for a Michelson contrast of 70%;  $u' = 0.1815$  and  $v' = 0.5053$ ) of large extent, subtending  $104^\circ \times 79^\circ$  of visual angle. In order to simulate the optic flow motion seen in the environment, the elements follow a radial trajectory from the centre of the pattern. In addition, dot speed was projection-specified, meaning dot acceleration increased as dots moved into the periphery. This acceleration was calculated using the square of the distance from the origin of expansion, i.e. by a factor of four as the distance doubled. Specifically, the dot speed was  $7.5 \text{ deg./second}$  at  $10^\circ$  and would travel at a speed of  $30 \text{ deg./second}$  at  $20^\circ$  of eccentricity. The dots were following their trajectory in a continuous manner, with no limited lifetime. Different levels, or proportion, of dot coherence were presented. For example, for a coherence level of 50%, half of the dots were moving in the same direction and the other half were moving with the same speed but in random direction in the same path (jittering). This stimulus was presented at five to six levels along log steps starting at 100% of coherence, to seek a minimum proportion of dots moving in the same direction that yields a coherent percept. This stimulus is also qualified as “complex” because of the larger neural integration required for perceiving the overall direction of the optic flow motion.

### 6.3.4 Other measures

To ensure that participants had normal visual fields, they underwent the Frequency Doubling Technology (FDT; Humphrey Viewfinder<sup>TM</sup> Systems) perimetry assessment at each testing session. The C-20 full threshold mode test was used for both

eyes independently. In the central 20 degrees of the visual field, a central location was tested and four locations were tested in each quadrant. Thresholds in dB were obtained for every location, using a series of black and white bands varying in contrast that flicker at 25Hz.

Moreover, a questionnaire, based on the Rivermead Post-Concussion Symptoms (PCS) was administered to both groups at every testing session (N. S. King, Crawford, Wenden, Moss, & Wade, 1995). Information about the trauma was extracted from the child's medical record in order to describe the characteristics of the brain injury sustained (see Table 1).

### **6.3.5 Testing Procedures**

Participants were tested during three separate sessions at three pre-determined times following recruitment to our study, which was approximately after 1 week (mean  $\pm$  SD of 4.5 days  $\pm$  1.72 after recruitment, and 7.72 days  $\pm$  2.72 post-injury); 4 weeks (mean of 4.19 weeks  $\pm$  0.54 after recruitment) and 12 weeks (mean of 12.47 weeks  $\pm$  0.99 after recruitment) and at corresponding time intervals for controls. These time sessions were chosen because of their importance in the child's recovery. The initial assessment was to seek a measure in the acute phase, the 4<sup>th</sup> week corresponds to the end of an activity restriction period imposed on the child (Swaine & Friedman, 2001) and the 12<sup>th</sup> week was chosen because most post-concussion reported symptoms are generally resolved by that time (Levin, Mattis et al., 1987). One child from the mTBI group could not complete the first evaluation because of the severity of his symptoms (headaches), but did complete the two subsequent assessments. In addition, two other mTBI children did not complete the study after the first and the second evaluation, for personal reasons.

The testing sessions took place at the Visual Psychophysics and Perception Laboratory located in School of Optometry of Université de Montréal. If a recent eye exam on the child was not available, a complete optometric assessment was done and child's vision was corrected to normal when necessary. Each session lasted about 75 minutes (without the optometric examination).

The children were tested in a dimly lit room, sitting in a comfortable chair, at a distance of 57 cm from the screen upon which each visual stimulus was presented. The viewing of the display was binocular and the children fixated a red dot centred on the screen. Each psychophysical session was of 5 testing conditions (i.e. static and dynamic conditions for first and second-order stimuli and optic flow) where the order was counterbalanced across appointments and participants. Instructions were given verbally before each test and practice trials with feedback were completed to familiarize participants with every task.

For both first- and second-order static conditions, the children were required to identify the orientation of horizontally or vertically presented lines after each presentation. In the dynamic conditions, participants had to identify the motion direction of first- and second-order patterns that were moving either rightward or leftward. Each stimulus was presented for one second, after which the child gave the experimenter an appropriate verbal or non-verbal (i.e. a hand gesture) response, depending on the experimental condition (2-AFC). The experimenter initiated each trial only when the participant attended to the screen and entered each response obtained from the observer. The same general procedure was used for the optic flow stimuli. The children were required to discriminate whether the flow field was expanding (moving away from the centre on the screen; giving sensation of motion towards the subject) or contracting (towards the centre on the screen or giving the impression of motion away from the subject), after each presentation.

A method of constant stimuli was used to measure thresholds for all conditions. The predetermined modulation depth (for first- and second-order patterns) or coherence levels (for optic flow) were randomly varied in each experimental condition. Stimuli were presented 10 times for either orientation or direction, for a total of 20 trials for each modulation depth or coherence level for every testing condition. Weibull functions (1951) were fitted to the obtained responses in order to estimate orientation- or direction-identification thresholds at a 75% correct level of performance (bootstrap program; Matlab v. 6.5).

### **6.3.6 Data analysis**

Thresholds were measured for each child in each of the following conditions: orientation-identification thresholds for first- and second-order static information, direction-identification thresholds for first- and second-order dynamic information, direction discrimination for optic flow stimuli. Log-transform data of these thresholds were used in the statistical analysis. Also, threshold of central location from the FDT and scores on post-concussion symptoms questionnaires were computed.

Analyses of variance were performed to investigate the differences within each condition and test performances of the children in the mTBI group compared with the control group. A two-way (group and time) mixed model ANOVAs with repeated measures on the time factor was used. Post-hoc independent t-tests with Bonferroni correction were used to determine differences between groups at each assessment time. One-way ANOVAs with repeated measures were also used to assess the specific time effect for each group, when needed. The ANOVAs were done only on complete data sets. However, bar graphs and t-tests were done using all available data. Relations between mTBI group's post-concussion symptoms and performance on relevant measures, such as contrast modulation depth thresholds, were analyzed with Pearson correlation. Statistical analyses were carried out with the SPSS statistical package (version 13; SPSS Inc.)

## **6.4 Results**

### **6.4.1 Static conditions**

Figure 2 shows the mean orientation-identification thresholds for mTBI and control groups for first-order (Figure 2A) and second-order stimuli (Figure 2B) as a function of experimental sessions in time. Separate analyses were performed for the two types of stimuli, because of their qualitatively different defining attributes making a direct comparison non informative. The two-way ANOVA performed on the log transform orientation-identification thresholds for first-order static stimuli (luminance modulation depth thresholds) revealed no statistically significant group by time

interaction ( $F(2,62) = 2.515, P = 0.089$ ), neither as significant differences between groups across all testing sessions ( $F(1,31) = 0.133, P = 0.717$ ) or on the time factor (repeated measures) ( $F(2,62) = 2.162, P = 0.124$ ).

*INSERT FIGURE 2 ABOUT HERE*

The mixed within-between ANOVA conducted on orientation-identification thresholds for second-order stimuli (contrast modulation depth thresholds) did neither reveal an interaction effect of group membership and time ( $F(2,60) = 0.411, P = 0.665$ ), nor a main effect of time ( $F(2,60) = 1.80, P = 0.174$ ). The analysis did, however, reveal a statistically significant difference between groups, ( $F(1,30) = 4.186, P = 0.05$ ), indicating higher thresholds for the mTBI group as compared to the control group. Specifically, post-hoc analysis revealed that injured children's thresholds were significantly higher than those of the non-injured at 4 weeks only ( $t = 2.56, P = 0.015$ , with Bonferroni correction). The absence of significant effect on the time factor for both type of stimuli (first- and second-order) demonstrates that no learning effect was present between experimental sessions for both groups.

#### **6.4.2 Dynamic conditions**

For dynamic conditions, a similar pattern of results was found for the first- and second-order motion stimuli, as for static conditions. Luminance modulation depth thresholds from dynamic first-order stimuli did not differ significantly between mTBI and controls participants. The ANOVA demonstrated no between-group effect for this direction-identification ( $F(1,30) = 0.007, P = 0.936$ ) and no main effect for the time factor ( $F(2,60) = 0.650, P = 0.526$ ). Figure 3A demonstrates the mean thresholds obtained for both groups with these simple moving stimuli.

*INSERT FIGURE 3 ABOUT HERE*

For the contrast modulation depth thresholds of second-order moving patterns there was a strong between-group effect (mTBI vs controls) ( $F(1,30) = 13.334, P = 0.001$ ) as shown in Figure 3B. There was no main effect for the time factor ( $F(2,60) = 0.832, P = 0.440$ ) and no group by time interaction ( $F(2,60) = 0.137, P = 0.872$ ). More

specifically, higher thresholds were obtained from the mTBI group compared to the control group at week 1 ( $t = 2.786, P = 0.009$ ), week 4 ( $t = 3.012, P = 0.005$ ) and week 12 ( $t = 2.478, P = 0.019$ ) (but not significant at week 12 with Bonferroni correction:  $P < 0.017$ ).

For first-order static and dynamic conditions, the analysis showed no significant group or testing time effects. This implies that perceptual performances for simple visuo-spatial information are equal between groups and across time sessions.

In contrast, the second-order static and dynamic conditions analyses indicate that control children had significantly better performances than children who suffered from a mTBI. Moreover, the lack of significant interaction between groups and testing times shows that difference between groups are maintained across the testing period, up to 3 months post-injury.

### 6.4.3 Optic flow condition

Coherence thresholds were successfully obtained for all participants with the exception of one in each group (mTBI group: week 12, controls: week 1) when tested with the optic flow condition. The coherence thresholds were significantly higher for the mTBI group as compared to the control group, as revealed by the between group effect of the performed ANOVA ( $F(1,28) = 6.486, P = 0.017$ ) (Figure 4).

*INSERT FIGURE 4 ABOUT HERE*

There was a main effect for the time factor (repeated measures) ( $F(2,56) = 16.413, P < 0.001$ ) but there was no group by time interaction ( $F(2,56) = 0.009, P = 0.991$ ). Post-hoc analysis indicated that children with mTBI performed worse, exhibiting higher thresholds as compared to children in the control group, but only at 1 week post-injury ( $t = 2.605, P = 0.014$ , with Bonferroni correction). The time effect was present in each group, when the groups were taken separately (for mTBI:  $F(2,26) = 8.205, P = 0.002$ ; for controls:  $F(2,30) = 8.438, P = 0.001$ ). Children from the mTBI group presented higher coherence thresholds to optic flow in the 1<sup>st</sup> week when compared to those of the 4<sup>th</sup> ( $P < 0.001$ ) and of the 12<sup>th</sup> ( $P = 0.028$ ) week. Similar to the injured



children, non-injured participants improved their performance between weeks 1 and 4 ( $P = 0.007$ ) and between week 1 and 12 ( $P = 0.012$ ). This implies a learning effect between the first and the following assessments for both groups. Furthermore, the lack of a significant interaction revealed that the differences between groups were maintained throughout the assessment period after the injury, and implies that there was no significant recovery across testing sessions.

#### 6.4.4 Other measures

For the post-concussion symptoms, Figure 5 demonstrates the mean scores obtained for mTBI and control children from the questionnaires, as a function of experimental session in time.

*INSERT FIGURE 5 ABOUT HERE*

Statistical analysis demonstrated a group by time interaction ( $F(2,52) = 5.161, P = 0.009$ ). There was no significant group effect for all testing sessions although there was a tendency ( $F(1,26) = 3.77, P = 0.063$ ) for mTBI participants to report more post-concussion symptoms than controls. This implies that there was initially a significant difference in the reported symptoms between the groups with mTBI children reporting more symptoms compared to the control group [week 1 ( $t = 4.464, P < 0.001$ ) and then a recovery in this difference (week 4;  $t = 1.671, P = 0.106$ ; week 12:  $t = 0.677, P = 0.504$ )]. Moreover, there was a time session effect with repeated measures ( $F(2,52) = 8.425, P = 0.001$ ). When the groups were analysed separately, the time effect was present only for mTBI children ( $F(2,20) = 7.469, P = 0.004$ ) and injured children improved significantly between the first and the 12<sup>th</sup> week ( $P = 0.028$ ) only. In contrast, no time effect was present for non-injured children ( $F(2,32) = 0.578, P = 0.567$ ).

For mTBI children, there was no significant correlation between the scores obtained on the post-concussion symptoms questionnaire and thresholds from second order static ( $r = 0.353, P = 0.237$ ), dynamic stimuli ( $r = 0.268, P = 0.376$ ) and optic flow patterns ( $r = 0.039, P = 0.9$ ) at week 1. This indicates that there was no relation between the number and severity of symptoms reported after a mTBI and perceptual

performances to complex stimuli indicating that we are assessing different elements with these measures.

An additional assessment was performed to compare injured with non-injured children in terms of contrast sensitivity (FDT). Statistical analysis demonstrated that there were no significant differences in the central FDT measures, for right and left eyes separately, between the two groups or across testing sessions.

## **6.5 Discussion**

### **6.5.1 Deficits of higher level processing after mTBI**

This investigation used a prospective design to assess visuo-spatial information perception in the acute phase after a mTBI in children. The overall findings showed perceptual deficits for complex visual information despite a normal neurological examination at the time of hospital discharge. Indeed, injured children were selectively impaired on second-order, static or dynamic contrast-defined, and optic flow pattern perception, compared with their non-injured controls. Furthermore, this discrepancy in perceptual performance for complex stimuli was maintained throughout the assessed period, up to 3 months post-injury. In contrast, results obtained in this study showed that sensitivities to simple visual information, more specifically static or dynamic luminance-defined stimuli, were unaffected for children who suffered a mTBI. Also, normal central contrast sensitivity (FDT) for a 25Hz flickering stimulus was found.

These findings revealed specific impairment for mTBI children to integrate local elements in more complex visual patterns, such as second-order and optic flow stimuli. This possibly reflects a deficiency of the integrity of the occipito-parietal and occipito-temporal regions in higher level visual cortical functions, assessed with dynamic and static stimuli, respectively. The normal lower level function demonstrated with average first-order sensitivity, as opposed to the higher level function deficits, highlights a clear effect of complexity and a possible generalized deficit in cortical integrative mechanisms. This also suggests that the observed impairments did not result from a general visual impairment.

The two types of dynamic and static stimuli are physically similar, permitting a comparison of the neural integrity of the two cortical visual streams at both early and later levels. In fact, first- and second-order stimuli tap into different hierarchical levels in the visual cortex (Clifford & Vaina, 1999; Smith, Greenlee, Singh, Kraemer, & Hennig, 1998). First-order patterns are considered simpler because they are efficiently processed by our visual system. Specifically, local luminance variations are analysed by neural detectors in area V1 for the detection of direction or orientation. Whereas second-order information is recognized as complex, as it requires additional nonlinear neural processing to be perceived. Higher visual areas would be implicated in this processing, with recruitment of more extended neural circuitry, such as V3 and VP, and V5 for both types of dynamic stimuli (Smith, Greenlee, Singh, Kraemer, & Hennig, 1998).

### **6.5.2 Low and high levels processing in aging and other pathologies**

As reported above, other studies from our laboratory have shown a complexity effect with comparable first- and second-order visual stimuli, such as in the investigation of visual perception in aging (Habak & Faubert, 2000). A larger sensitivity decrease was found for second-order stimuli in elderly, suggesting that non pathological aging may affect the additional processing steps required for the analysis of higher level stimuli. Moreover, the authors suggested that diffuse and non-specific cell dysfunction in aging could account for their results. Similar to aging, we propose that the elevated thresholds for higher-order stimuli in children who suffered a mTBI reveal a diffuse, generalized later-level integration malfunction rather than a region-specific impairment.

Similar to other populations where neurobiological alterations are suspected such as individuals with autism and fragile X, our group has also demonstrated impairments of the neuro-integrative mechanisms used to detect complex motion and static stimuli (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005; Kogan, Bertone et al., 2004). It appears, therefore, that using the first- versus second-order (simple vs complex) methodology is quite sensitive to neurobiological alterations. Other studies have shown that this approach may not only be sensitive but is also quite selective in distinguishing among populations. For instance, we have shown that in glaucoma the second-order

motion processing was not more affected than the first-order motion processing (Karwatsky, Bertone, Overbury, & Faubert, 2006). Glaucoma is an ocular disorder that affects the retinal ganglion cells of the retina that feed motion sensitive cells (Glovinsky, Quigley, & Dunkelberger, 1991; Quigley, Dunkelberger, & Green, 1988) and these patients have been shown to have motion processing deficits (Bosworth, Sample, & Weinreb, 1997; Giaschi, Trope, Kothe, & Hong, 1996; Glovinsky, Quigley, & Dunkelberger, 1991; Quigley, Dunkelberger, & Green, 1988; Shabana, Cornilleau Peres, Carkeet, & Chew, 2003). As it is primarily a low-level neuropathology, it is not expected that higher-level motion processing would be more affected than the lower-level processing as supported by the results. It is clear, therefore, that when we obtain a selective reduction of second-order processing, that this represents some form of neurobiological alteration (anatomically and/or physiologically) which affects higher-level processing. An argument can be made that these techniques can be useful in the assessment of these populations.

Another interesting finding is that perception of optic flow stimuli was also affected in our group of children with mTBI. Impaired perception of optical flow has also been shown in other populations presenting cortical damage, such as patients with Alzheimer's disease (O'Brien et al., 2001; Tetewsky & Duffy, 1999). This is interesting because optic flow is known to require complex visual processing because signals from a multitude of directions must be integrated to generate a coherent percept. This further supports our proposition that the mTBI group is still not at normal levels 12 weeks post injury. However, if one had to select a specific testing procedure between the first- and second-order grating tests or the optic flow we must favor the former approach because, while the grating task was not affected by learning, there was a clear learning effect for optic flow in both our controls and mTBI groups.

### **6.5.3 Visual deficits and symptoms after TBI**

The investigation of visual perception *per se* after a brain injury in children has been neglected in the literature, but other work had raised the possibility that tasks requiring intact integration of various visual information could be affected following a

mTBI. Indeed, a previous study had shown selectively decreased scores in preschool children who had sustained a mTBI, when tested with interpreting visual puzzles in a cognitive battery 6 months after the accident. This impairment persisted in the long-term, up to the age of 6.5 years (Wrightson, McGinn, & Gronwall, 1995). In adults with mild to severe TBI, Lachapelle and colleagues (2004) have shown abnormal visual evoked potentials (VEP) with textures segregated by gradients of both orientation and motion. In concordance with our conclusions, they have suggested altered higher-order visual processing mechanisms after TBI. Another study showed postural dysfunctions in response to visual field motion in a virtual reality environment of young adult athletes after an mTBI that was present up to 30 days post-injury. The authors suggested that trauma induced sensory integration dysfunction (Slobounov, Tutwiler, Sebastianelli, & Slobounov, 2006).

Children within the mTBI group reported more post-concussion symptoms to the questionnaire than did control children at the first assessment (week 1). Self-reported subjective symptoms have normalized with time, with children becoming asymptomatic, on average, at 1 & 3 months post-injury. However, results showed that even when the children became asymptomatic, their ability to process complex visual information was affected. This demonstrates that our higher-order measures were sensitive enough to detect subtle brain dysfunction even after very mild brain injuries. An interesting finding here was the lack of significant correlations between thresholds for processing complex visual information and self-reported symptoms. This would lead us to believe that our functional tests and the self-reported symptoms scales measure different consequences of brain trauma. It also raises the question as to the validity of returning mTBI children to regular activities based only on the resolution of reported symptoms.

Surprisingly, our findings demonstrated no recovery of visual processing abilities over the assessment period for children with mTBI. Indeed, the impaired sensitivity to complex visual information lasted throughout the acute phase post-injury, i.e. encompassing the first 3 months after TBI (Frenham, Fox, & Maybery, 2005). In a comparable paediatric sample, balance deficits were also reported at 12 weeks after a mild TBI (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a). While there is a debate in adult

mTBI literature whether cognitive performance persists beyond the initial post-injury period, some studies have reported sustained post-concussive impairments (Bohnen, Jolles, & Twijnstra, 1992; Bohnen, Jolles, Twijnstra, Mellink, & Wijnen, 1995; Chan, 2002; Potter, Bassett, Jory, & Barrett, 2001). Furthermore, persistent neurobehavioral deficits in symptomatic subgroups have been reported at least 12 months post-injury (Sterr, Herron, Hayward, & Montaldi, 2006) and neurophysiological anomalies were revealed in symptomatic as well as asymptomatic concussed athletes even several weeks post-injury (Gosselin, Theriault, Leclerc, Montplaisir, & Lassonde, 2006).

It is possible that this higher-order perceptual deficit could have some consequences on activities of daily living. In fact, Gagnon and colleagues (2005) have shown, with similar mTBI children, a lack of confidence in their performance in physical activities 3 months post-injury, assessed with self-efficacy questionnaires. Possibly, the perceptual impairments revealed in this study might be expressed in demanding activities, such as team sports, thus affecting the children's self-confidence. This could also put them at greater risk of re-injury when returning to their physical and recreational activities.

## **6.6 Conclusion**

In conclusion, the present study sheds some light on visual perception skills of children who suffered a mTBI. Injured children showed normal sensitivity to visual perception of simple stimuli. In contrast, a different picture was revealed with stimuli necessitating more complex visual information processing. First, our findings demonstrate that the complex perceptual deficits persisted up to 3 months after mTBI. In further studies a longer follow-up will be useful to assess the resolution or the persistence of this perceptual deficit in time. Secondly, we argue that the psychophysical techniques used presently represent a sensitive tool in the assessment of deficits after a mTBI in children. More specifically, we argue that assessing first- and second-order processing represents an optimal strategy for the evaluation of the post-injury neurocognitive status. Thirdly, we conclude that the perceptual testing measures different functions than the self-reported symptom questionnaires. Finally, such

perceptual measures could significantly contribute to the clinical post-injury evaluation for preventing premature returns to activities and sports and potentially reduce risks of further injury.

## **6.7 Acknowledgements**

This work was supported by the Canadian Institutes of Health Research (operating grant MOP-74504, and studentship to O.B.L.). We thank all parents and children for their participation to the study. Also, we would like to thank Debbie Friedman, Dre Marie Laberge and all the clinicians involved in the recruitment of participants at the Montreal Children's Hospital and at Sainte-Justine's Hospital.



**Tableau 6-I** Participants characteristics for mTBI group

<i>Characteristics</i>	<i>Frequency</i>	<i>Percentage</i>
Gender		
Boys	10	56
Girls	8	44
Cause of injury		
Falls	9	50
Bicycle falls	4	22
MVA - bicycle	1	6
Hits (hockey, ball, etc)	4	22
Admission GCS		
13	0	0
14	5	28
15	13	72
Duration of LOC		
No LOC	11	61
0-10 min	6	33
> 10 min	1	6
Duration of PTA		
0-60 min	15	83
> 60 min	3	17
Concussion grade		
1	0	0
2	11	61
3	7	39
Initial symptoms		
Headache	14	78
Nausea-Vomiting	8	44
Dizziness	8	44
Drowsiness	8	44
Visual Problems	2	11
Altered gait	2	11

GCS: Glasgow Coma Scale; LOC: loss of consciousness;  
MVA: motor vehicle accident; PTA: post-traumatic amnesia.

## 6.8 References

- ACRM. Definition of mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil* 1993; 8: 86-87.
- Bazarian JJ, McClung J, Shah MN, Cheng YT, Flesher W, Kraus J. Mild traumatic brain injury in the United States, 1998--2000. *Brain Inj* 2005; 19: 85-91.
- Bertone A, Mottron L, Jelenic P, Faubert J. Motion perception in autism: a "complex" issue. *J Cogn Neurosci* 2003; 15: 218-25.
- Bertone A, Mottron L, Jelenic P, Faubert J. Enhanced and diminished visuo-spatial information processing in autism depends on stimulus complexity. *Brain* 2005; 128: 2430-41.
- Binder LM, Rohling ML, Larrabee GJ. A review of mild head trauma. Part I: Meta-analytic review of neuropsychological studies. *J Clin Exp Neuropsychol* 1997; 19: 421-31.
- Bohnen NI, Jolles J, Twijnstra A. Neuropsychological deficits in patients with persistent symptoms six months after mild head injury. *Neurosurgery* 1992; 30: 692-5; discussion 695-6.
- Bohnen NI, Jolles J, Twijnstra A, Mellink R, Wijnen G. Late neurobehavioural symptoms after mild head injury. *Brain Inj* 1995; 9: 27-33.
- Bosworth CF, Sample PA, Weinreb RN. Perimetric motion thresholds are elevated in glaucoma suspects and glaucoma patients. *Vision Res* 1997; 37: 1989-97.
- Carroll LJ, Cassidy JD, Holm L, Kraus J, Coronado VG. Methodological issues and research recommendations for mild traumatic brain injury: the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *J Rehabil Med* 2004: 113-25.
- Cavanagh P, Mather G. Motion: the long and short of it. *Spat Vis* 1989; 4: 103-29.
- Chan RC. Attentional deficits in patients with persisting postconcussive complaints: a general deficit or specific component deficit? *J Clin Exp Neuropsychol* 2002; 24: 1081-93.
- Chubb C, Sperling G. Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *J Opt Soc Am A* 1988; 5: 1986-2007.

- Clifford CW, Vaina LM. A computational model of selective deficits in first and second-order motion processing. *Vision Res* 1999; 39: 113-30.
- Frencham KA, Fox AM, Maybery MT. Neuropsychological studies of mild traumatic brain injury: a meta-analytic review of research since 1995. *J Clin Exp Neuropsychol* 2005; 27: 334-51.
- Gaetz M. The neurophysiology of brain injury. *Clin Neurophysiol* 2004; 115: 4-18.
- Gagnon I, Swaine B, Friedman D, Forget R. Children show decreased dynamic balance after mild traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil* 2004a; 85: 444-52.
- Gagnon I, Swaine B, Friedman D, Forget R. Visuomotor response time in children with a mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil* 2004b; 19: 391-404.
- Gagnon I, Swaine B, Friedman D, Forget R. Exploring children's self-efficacy related to physical activity performance after a mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil* 2005; 20: 436-49.
- Giaschi DE, Trope GE, Kothe AC, Hong XH. Loss of sensitivity to motion-defined form in patients with primary open-angle glaucoma and ocular hypertension. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 1996; 13: 707-15.
- Gibson JJ. *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin, 1979.
- Glovinsky Y, Quigley HA, Dunkelberger GR. Retinal ganglion cell loss is size dependent in experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1991; 32: 484-91.
- Gosselin N, Theriault M, Leclerc S, Montplaisir J, Lassonde M. Neurophysiological anomalies in symptomatic and asymptomatic concussed athletes. *Neurosurgery* 2006; 58: 1151-61; discussion 1151-61.
- Habak C, Casanova C, Faubert J. Central and peripheral interactions in the perception of optic flow. *Vision Res* 2002; 42: 2843-52.
- Habak C, Faubert J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res* 2000; 40: 943-50.
- Karwatsky P, Bertone A, Overbury O, Faubert J. Defining the nature of motion perception deficits in glaucoma using simple and complex motion stimuli. *Optom Vis Sci* 2006; 83: 466-72.

- King NS, Crawford S, Wenden FJ, Moss NE, Wade DT. The Rivermead Post Concussion Symptoms Questionnaire: a measure of symptoms commonly experienced after head injury and its reliability. *J Neurol* 1995; 242: 587-92.
- Kogan CS, Bertone A, Cornish K, Boutet I, Der Kaloustian VM, Andermann E, et al. Integrative cortical dysfunction and pervasive motion perception deficit in fragile X syndrome. *Neurology* 2004; 63: 1634-9.
- Lachapelle J, Ouimet C, Bach M, Ptito A, McKerral M. Texture segregation in traumatic brain injury--a VEP study. *Vision Res* 2004; 44: 2835-42.
- Levin HS, Amparo E, Eisenberg HM, Williams DH, High WM, Jr., McArdle CB, et al. Magnetic resonance imaging and computerized tomography in relation to the neurobehavioral sequelae of mild and moderate head injuries. *J Neurosurg* 1987a; 66: 706-13.
- Levin HS, Mattis S, Ruff RM, Eisenberg HM, Marshall LF, Tabaddor K, et al. Neurobehavioral outcome following minor head injury: a three-center study. *J Neurosurg* 1987b; 66: 234-43.
- Medicine. MTBICotHIISIGACoR. Definition of mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil* 1993; 8: 86-87.
- Mittenberg W, Strauman S. Diagnosis of mild head injury and the postconcussion syndrome. *J Head Trauma Rehabil* 2000; 15: 783-91.
- Neurology AAo. Practice Parameter: The management of concussion in sports (summary statement). *Neurology* 1997; 48: 581-585.
- Nishida S, Ledgeway T, Edwards M. Dual multiple-scale processing for motion in the human visual system. *Vision Res* 1997; 37: 2685-98.
- O'Brien HL, Tetewsky SJ, Avery LM, Cushman LA, Makous W, Duffy CJ. Visual mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Cereb Cortex* 2001; 11: 1083-92.
- Oppenheimer DR. Microscopic lesions in the brain following head injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1968; 31: 299-306.
- Potter DD, Bassett MR, Jory SH, Barrett K. Changes in event-related potentials in a three-stimulus auditory oddball task after mild head injury. *Neuropsychologia* 2001; 39: 1464-72.

- Quigley HA, Dunkelberger GR, Green WR. Chronic human glaucoma causing selectively greater loss of large optic nerve fibers. *Ophthalmology* 1988; 95: 357-63.
- Satz P, Zaucha K, McCleary C, Light R, Asarnow R, Becker D. Mild head injury in children and adolescents: a review of studies (1970-1995). *Psychol Bull* 1997; 122: 107-31.
- Shabana N, Cornilleau Peres V, Carkeet A, Chew PT. Motion perception in glaucoma patients: a review. *Surv Ophthalmol* 2003; 48: 92-106.
- Slobounov S, Sebastianelli W, Moss R. Alteration of posture-related cortical potentials in mild traumatic brain injury. *Neurosci Lett* 2005; 383: 251-5.
- Slobounov S, Sebastianelli W, Simon R. Neurophysiological and behavioral concomitants of mild brain injury in collegiate athletes. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 185-93.
- Slobounov S, Tutwiler R, Sebastianelli W, Slobounov E. Alteration of postural responses to visual field motion in mild traumatic brain injury. *Neurosurgery* 2006; 59: 134-9; discussion 134-9.
- Smith AT, Greenlee MW, Singh KD, Kraemer FM, Hennig J. The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *J Neurosci* 1998; 18: 3816-30.
- Sterr A, Herron K, Hayward C, Montaldi D. Are mild head injuries as mild as we think? Neurobehavioral concomitants of chronic post-concussion syndrome. *BMC Neurol* 2006; 6: 7.
- Swaine BR, Friedman DS. Activity restrictions as part of the discharge management for children with a traumatic head injury. *J Head Trauma Rehabil* 2001; 16: 292-301.
- Tetewsky SJ, Duffy CJ. Visual loss and getting lost in Alzheimer's disease. *Neurology* 1999; 52: 958-65.
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech* 1951; 18: 292-297.
- Wilson HR, Ferrera VP, Yo C. A psychophysically motivated model for two-dimensional motion perception. *Vis Neurosci* 1992; 9: 79-97.

Wrightson P, McGinn V, Gronwall D. Mild head injury in preschool children: evidence that it can be associated with a persisting cognitive defect. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1995; 59: 375-380.

Wurtz RH. Optic flow: A brain region devoted to optic flow analysis? *Curr Biol* 1998; 8: R554-6.

## 6.9 Legends

### Fig. 1

**A)** Static conditions: first- and second-order stimuli. First- and second-order static stimuli were presented either horizontally or vertically to the participants at different depths of modulation. The child was required to identify the orientation of the lines (i.e. horizontal or vertical) after each presentation. **B)** Dynamic condition: first- and second-order stimuli. First- and second-order moving stimuli were presented moving either to the right or to the left to the participants at different modulation depths. The children were required to discriminate the direction of the stimulus.

### Fig. 2

Static conditions. Mean orientation-identification thresholds (+ 1 SEM) for mild traumatic brain injury (mTBI) (open bars) and control children (filled bars) for first-order **(A)** and second-order **(B)** stimuli at 1, 4 and 12 weeks. **A)** First-order static stimuli. No difference in thresholds was found between groups across all testing sessions neither on the time factor. **B)** Second-order static stimuli. A significant between-group effect was found but no main effect on the time factor, neither as for group x time interaction. Insets show a schematic of the conditions tested.

### Fig. 3

Dynamic conditions. Mean direction-identification thresholds (+ 1 SEM) for mild traumatic brain injury (mTBI) (open bars) and control children (filled bars) for first-order **(A)** and second-order **(B)** stimuli at 1, 4 and 12 weeks. **A)** First-order moving stimuli. No statistical difference in thresholds was found between groups across all testing sessions and no main effect for the time factor. **B)** Second-order dynamic stimuli. A significant between-group effect was found but no main effect for the time factor, and no group x time interaction. Insets show a schematic of the conditions tested.

**Fig. 4**

Optic flow condition. Mean coherence thresholds (+ 1 SEM) for mild traumatic brain injury (mTBI) (open bars) and control children (filled bars) for radial optic flow stimuli at 1, 4 and 12 weeks. A significant between-group effect and a main effect for the time factor, but no group x time interaction were revealed. Insets show a schematic of the conditions tested.

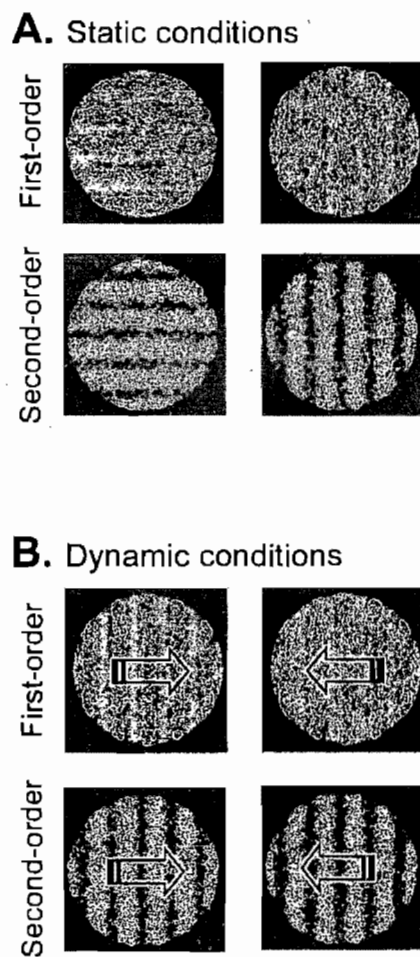
**Fig. 5**

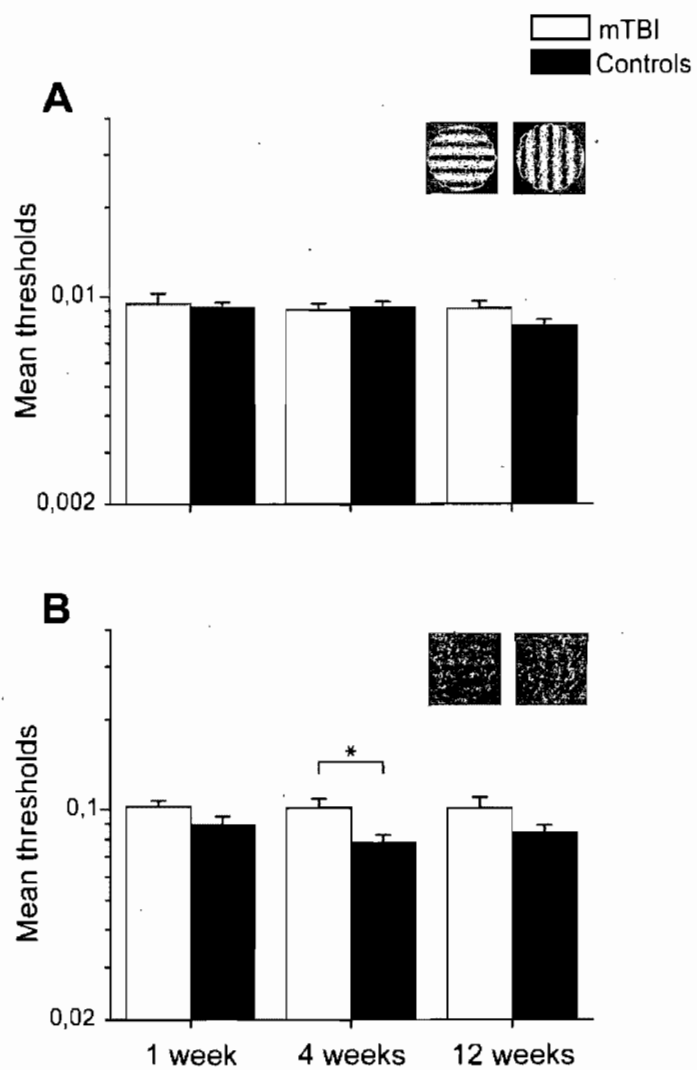
Rivermead post-concussion symptoms questionnaire. Mean scores (+ 1 SEM) of mild traumatic brain injury (mTBI) (open bars) and control children (filled bars) at 1, 4 and 12 weeks. A group x time interaction and a main effect for the time factor were revealed. Mild TBI children reported initially more symptoms compared to controls and then a recovery in this difference was observed.

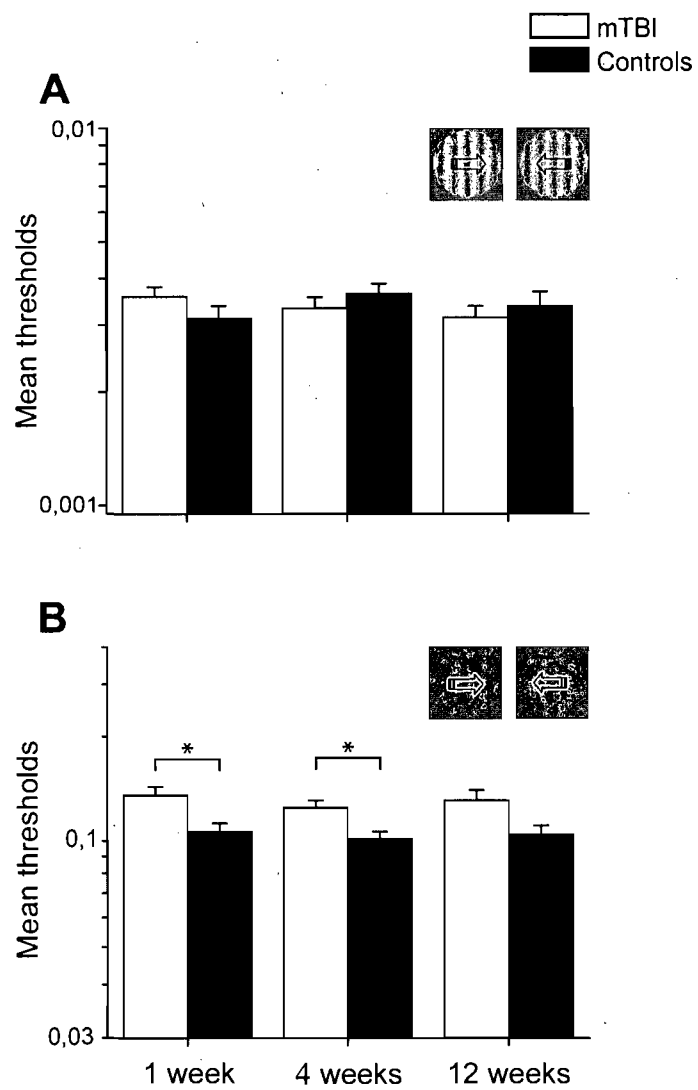


## 6.10 Figures

**Figure 6-1:** Schematic of the first- and second-order stimuli.



**Figure 6-2:** Results from the static conditions.

**Figure 6-3:** Results from the dynamic conditions.

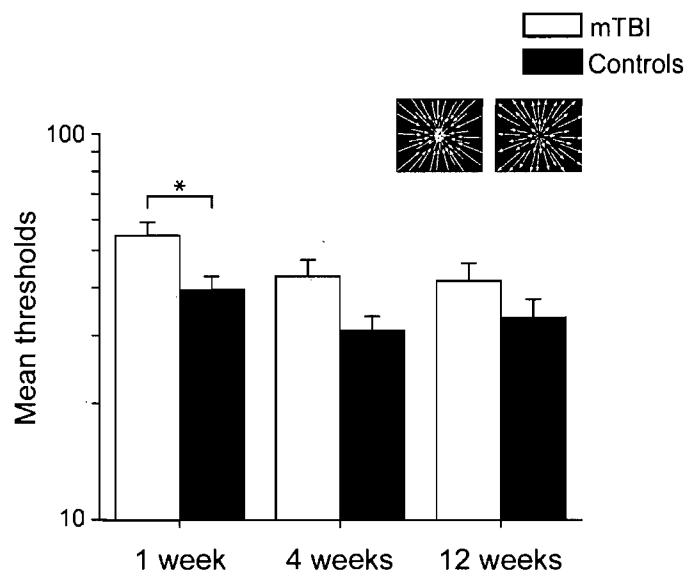
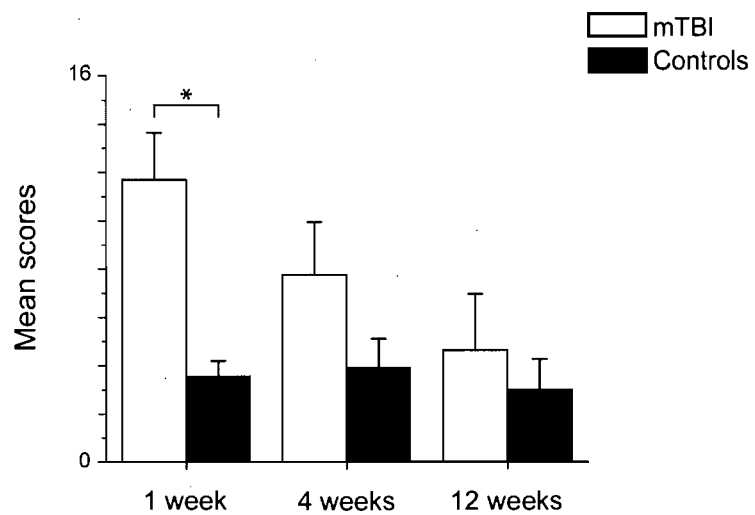
**Figure 6-4:** Results from the optic flow condition

Figure 6-5 : Rivermead post-concussion symptoms questionnaire.



## **CHAPITRE 7**

## Discussion générale

### 7.1 Développement de la perception du flux optique lors de la première année de vie

La première étude de la thèse s'est penchée sur la perception des nourrissons au mouvement complexe de flux optique, au cours de la première année de vie. L'étude effectuée est la première à avoir mesuré des seuils de cohérence, dérivés de fonctions psychométriques, aux stimuli de flux optique sur une large étendue d'âge. Les seuils de perception ont été mesurés à l'aide de la technique du regard préférentiel, afin d'investiguer le développement de la sensibilité au mouvement du flux optique radial chez les nourrissons. Deux devis expérimentaux ont été utilisés dans l'évaluation du développement de la sensibilité au mouvement radial en expansion; un plan à groupes indépendants de nourrissons d'âges différents et un autre plan de suivi longitudinal d'un groupe de bébés. De plus, l'étude du premier article a investigué les sensibilités des mêmes enfants à différentes tranches d'âges, aux deux directions du mouvement de flux optique radial : l'expansion et la contraction.

Conformément à ce qui était attendu, les résultats de la première expérience démontrent une augmentation significative de la sensibilité au flux radial en expansion avec l'âge (i.e. une diminution des seuils), avec l'amélioration la plus significative vers l'âge de 8 mois. La baisse de sensibilité mesurée au flux optique pour le groupe d'âge de 10 mois (i.e. augmentation moyenne des seuils) s'explique probablement par une tendance, chez les enfants de ce groupe à être peu collaborant à la tâche. De façon qualitative, il était très difficile de garder les enfants assis, à regarder des stimuli répétitifs pendant plusieurs minutes d'affilées. À cet âge, où ils marchent généralement à quatre pattes, ils préféraient aller explorer la pièce et ils ne désiraient pas rester en place. D'ailleurs, très peu d'études dans le domaine de la perception visuelle retiennent des participants de cet âge, surtout pour les études utilisant la technique de regard

préférentiel. La majorité des recherches recrutent des participants d'un groupe d'âge particulier ou bien des enfants d'environ 2 à 6 mois (Atkinson & Braddick, 1999).

La deuxième expérience, très semblable à la première a été menée avec un devis de suivi longitudinal, dans une tentative de contrôler la variabilité inter-individuelle. Les études développementales doivent fréquemment composer avec les importantes variations inter-individuelles, non seulement entre les groupes d'âges, mais surtout à l'intérieur d'une même tranche d'âge. Ceci a été même observé lors d'études développementales animales, pourtant bien contrôlées (Kiorpes & Movshon, 2004). Ainsi, la sensibilité des nourrissons, suivis à partir de l'âge de deux mois jusqu'à 8 mois (aux intervalles de 2 mois) démontre ici aussi une amélioration significative avec l'âge. Or, qu'il s'agisse d'évaluations inter- ou intra-participants, les seuils de cohérence au mouvement de flux optique radial en expansion s'améliorent avec l'âge, tel que démontré par nos résultats à l'expérience 1 & 2. Cette amélioration de la performance semblable entre les deux expériences pourrait également suggérer que les résultats de la deuxième expérience longitudinale ne soient pas affectés par un effet d'apprentissage. Étant donné que les mêmes enfants ont été revus et testés à des intervalles d'environ 2 mois, il pourrait y avoir une incidence sur les résultats. Une étude effectuée par Banton et collaborateurs avait également démontré une tendance similaire entre leurs mesures en longitudinal et en inter-groupes concernant les réponses de mouvements oculaires optocinétiques au mouvement global (Banton, Bertenthal, & Seaks, 1999). Avec des conditions expérimentales identiques, ces auteurs ont démontré des résultats similaires entre les deux devis expérimentaux, dans le développement de l'habileté à intégrer la direction du mouvement global.

Cependant, notons que l'amélioration la plus significative est survenue entre l'âge de 2 et 8 mois pour la première expérience (inter-groupes), et entre 2 et 4 mois pour la seconde en longitudinal. Cette variation entre les deux résultats pourrait être expliquée par la différence de devis expérimentaux. Il apparaît ainsi que le suivi longitudinal des nourrissons contrôle davantage les variations individuelles qui peuvent survenir entre les individus et entre les groupes d'âges, démontré par une amélioration plus rapide de la sensibilité au mouvement radial en expansion.



### 7.1.1 Sensibilité à la cohérence du mouvement

Les résultats de sensibilité à la cohérence du mouvement radial indiquent une certaine intégration des composantes du mouvement en un patron cohérent très tôt dans la vie. Ceci concorde avec les études précédentes démontrant une sensibilité au mouvement global (Banton, Bertenthal, & Seaks, 1999) et la discrimination de formes définies par des indices dynamiques (Arterberry & Yonas, 2000; Spitz, Stiles, & Siegel, 1993). Les mesures de sensibilité à la cohérence du mouvement obtenues sont globalement similaires à celles de l'étude menée en regard préférentiel par Wattam-Bell (1994), bien qu'il ait utilisé des stimuli différents: du mouvement horizontal en translation (stimulus «*road in the snow*»). Des seuils de cohérence moyens près de 70%, 40% et 5-7% ont été obtenus pour les enfants de 11 semaines, 16 semaines et les adultes. Également, une recherche très pertinente a rapporté une amélioration de la sensibilité à la cohérence du mouvement en translation chez des nourrissons âgés entre 6 et 27 semaines, évalués à l'aide de la technique du regard préférentiel (Mason, Braddick, & Wattam-Bell, 2003). Cependant, aucune amélioration significative avec l'âge n'a été relevée pour la performance de sensibilité à la cohérence du mouvement mesurée par le nystagmus optocinétique (NOC). Ainsi, Mason et collaborateurs suggèrent que la technique du regard préférentiel soit la méthode de choix, lorsque l'on veut s'adresser aux mécanismes corticaux sélectifs à la direction pour la discrimination de la cohérence du mouvement. Or, nos résultats reflètent probablement la maturation des aires corticales extrastriées qui sous-tendent l'analyse du mouvement de flux optique et leurs réseaux de connections. L'aire analogue à l'aire MSTd du primate, une aire corticale qui reçoit des projections de l'aire MT/V5, serait un bon candidat pour cette analyse du mouvement radial (Duffy & Wurtz, 1991a, 1991b; Tanaka et al., 1986; Tanaka & Saito, 1989). L'intégration des directions locales requises pour l'analyse du mouvement radial demande un traitement de plus haut niveau que pour le simple mouvement de translation, tel que défini par les études neurophysiologiques qui démontrent l'implication des aires corticales postérieures dans l'analyse du flux optique (Saito et al., 1986; Tanaka, Fukada, & Saito, 1989). Par ailleurs, les études d'imagerie chez l'humain démontrent que la section antérieure du complexe MT+ correspondrait à l'analogue de MSTd (Dukelow et al., 2001). Banton & Bertenthal (1997) ont proposé que les

projections de l'aire visuelle primaire (V1) au complexe MT/MST, un réseau impliqué dans l'analyse du mouvement complexe, soient fonctionnelles à partir de l'âge de 2 ou 3 mois. Ceci, en raison de l'émergence de la sensibilité au mouvement relatif (Wattam-Bell, 1996a).

### 7.1.2 Performance jusqu'à l'âge adulte

Les résultats de notre étude démontrent une performance moyenne des adultes qui est nettement supérieure à celle des enfants, quant à la sensibilité au flux optique radial. La sensibilité au mouvement cohérent augmente graduellement entre l'enfance et l'âge adulte et se poursuit jusqu'à un certain plateau. Cette maturation jusqu'au niveau adulte a d'ailleurs été démontrée chez le primate (Kiorpes & Movshon, 2004) et chez les humains, avec une amélioration continue jusqu'à l'âge d'environ 10 -11 ans, qui équivaut à la performance adulte quant à la cohérence du mouvement relatif en translation (stimulus *road in the snow*) (Gunn et al., 2002). Aucune étude connue n'a évalué la sensibilité au mouvement de flux optique dans l'enfance, pour connaître l'âge auquel il atteint la performance adulte. Il serait intéressant d'effectuer une étude de ce type pour avoir des normes des mesures de sensibilité à ce mouvement global chez les jeunes d'âge préscolaire et scolaire. Toutefois, les résultats dépendent grandement des différents paramètres des stimuli utilisés et de la complexité du patron de mouvement présenté. On pourrait s'attendre à un développement plus tardif, plus le mouvement présenté est complexe, c'est à dire qui demande davantage d'intégration temporelle et/ou spatiale pour être perçu (ex : durée de vie des éléments, longueur des sauts des éléments dans l'espace). Cependant, une étude de contrôle postural rapporte des habiletés similaires aux adultes à utiliser les indices visuels dynamiques d'un flux optique très saillant chez des enfants de 7 à 12 ans (Sparto et al., 2006).

À l'autre extrémité du cycle de la vie, les investigations portant sur la sensibilité à la cohérence du mouvement en vieillissement normal démontrent que la sensibilité à un mouvement radial global est sélectivement affecté lorsque comparé au mouvement unidirectionnel de translation (O'Brien et al., 2001; Warren, Blackwell, & Morris, 1989).

### 7.1.3 Dissociation entre les sensibilités aux directions radiales opposées

La troisième expérience a démontré une tendance différente chez les mêmes nourrissons testés aux deux directions du mouvement radial : l'expansion et la contraction. Les résultats du suivi longitudinal illustrent une performance supérieure avec l'âge pour la direction d'expansion (représente le mouvement qui s'approche de l'observateur, vers la périphérie), que pour la contraction (représente le mouvement qui s'éloigne de l'observateur, vers le point de fuite). Ces résultats indiquent que la sensibilité à la direction correspondant à la locomotion vers l'avant - i.e. l'expansion du mouvement perçu - se développe à un rythme plus rapide que pour la direction opposée rencontrée lors d'un mouvement de reculons : la contraction. Pourtant, les deux directions du stimulus radial requièrent théoriquement la même quantité d'intégration pour percevoir la direction globale. La dissociation relevée entre les deux mécanismes directionnels semble débiter dès l'âge de deux mois, mais elle devient statistiquement significative à l'âge de 8 mois, dans les conditions expérimentales utilisées dans notre étude. Notons que les seuils de cohérence pour l'expansion seraient une mesure plus sensible pour adresser le développement de la perception du flux optique entre 2 et 8 mois.

Par ailleurs, cette disparité entre les sensibilités à l'expansion et la contraction valide d'une certaine façon les spécificités obtenues quant au développement observé pour chacune des tendances de maturation. Ainsi, ceci démontre une préférence authentique pour le mouvement de flux optique, plutôt qu'une préférence pour le mouvement cohérent comparé au mouvement incohérent. En effet, les poupons âgés d'un mois préfèrent une plage en mouvement cohérent à une autre en mouvement incohérent, sans toutefois discriminer la direction de l'information (Wattam-Bell, 1996a).

Une étude récente a également investigué, par du regard préférentiel, les préférences de nourrissons japonais de 2 et de 3 mois pour les deux directions des stimuli de flux optique radial, comparé à un patron de bruit, composé de directions aléatoires (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2006). Les auteurs ont utilisé un score de préférence, mesuré par le ratio de temps de regard de la cible (ex : l'expansion ou

contraction) sur le temps de regard total (cible & patron de bruit). Ils ont obtenu une préférence non-significative pour l'une ou l'autre des directions du mouvement radial sur le patron aléatoire (bruit non-directionnel) pour les nourrissons de 2 mois, contrairement à nos résultats qui démontrent des seuils mesurés chez les nourrissons du même âge. Aucune préférence significative n'est relevée pour l'expansion à 3 mois. Toutefois, une «préférence négative» significative est rapportée pour le patron non-directionnel (bruit) sur la direction de contraction chez les nourrissons de 3 mois. Les auteurs suggèrent alors qu'une anisotropie pour la sensibilité au mouvement cohérent d'expansion / contraction émerge vers l'âge de 3 mois, avec un biais pour la direction de contraction. Cependant, la question reste à débattre, car la « préférence » est négative, c'est-à-dire que dans les faits, les nourrissons passent plus de temps à regarder le bruit non-directionnel (incohérent) que le stimulus cible, le mouvement de contraction. Ainsi, nous croyons que dans ce contexte, il est faux d'affirmer un tel biais pour la contraction. Nous croyons plutôt que le stimulus de « bruit » utilisé dans leur expérience est plus attirant que l'une ou l'autre des directions cohérentes, avec ses directions aléatoires. Il est même possible que le « bruit » soit plus saillant pour les nourrissons que la contraction, si cette direction n'est pas encore très bien perçue à cet âge, conformément à nos résultats qui démontre un développement plus tardif de cette direction. Contrairement au biais pour la contraction proposé, le même groupe de chercheurs a précédemment proposé un biais pour l'expansion lors d'une tâche de recherche visuelle (Takeuchi, 1997) qui émergerait vers l'âge de 3 mois (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004a). Pour notre part, notre étude a mesuré une sensibilité authentique à la cohérence du mouvement, à l'aide de courbes psychométriques et non pas une préférence de temps de regard.

De façon tout à fait anecdotique, il est intéressant de mentionner que lors de nos essais préliminaires, nous avons utilisé un bruit de directions aléatoires semblable à celui de l'étude de Shirai et collègues. Suite aux données pilotes, nous avons choisi de ne pas poursuivre avec un tel stimulus «neutre» de comparaison. Les quelques nourrissons évalués semblaient plus attirés par ce bruit aléatoire que par le stimulus cible, reflétant probablement une préférence davantage attentionnelle que directionnelle. Pour résoudre ce qui nous apparaissait un problème méthodologique, nous avons donc utilisé un bruit

de mouvement radial non-directionnel, où la seule différence entre les stimuli cible et neutre est la direction de l'information (voir la Figure 1 du premier article). Ainsi, nous croyons que nous adressons davantage les mécanismes qui traitent la direction du mouvement ainsi, et non pas la seule détection du mouvement, car la «forme» du stimulus en mouvement a été contrôlé (Hutchinson & Ledgeway, 2006; Smith & Ledgeway, 1997). Nous avons même utilisé ce bruit de directions aléatoires comme cible pour attirer l'attention de l'enfant au centre de l'écran avant chacune des présentations. Ce qui a très bien fonctionné pour toutes les expérimentations.

#### **7.1.4 Biais pour l'expansion du flux optique**

Tel qu'illustré par nos données, le biais pour la direction d'expansion du mouvement radial en flux optique semble se développer dès les premiers mois de vie. Ce biais pour l'expansion a été largement rapporté dans la littérature. Le mouvement d'expansion en est un d'importance pour l'animal, car il peut être utilisé pour contrôler des actions significatives, tel que d'éviter des obstacles lors de la locomotion vers l'avant ou détecter un objet s'approchant de nous. Les études neurophysiologiques animales ont d'abord démontré un biais pour les directions centrifuges des neurones dans l'aire visuelle MT chez le primate (Albright, 1989) et dans l'aire analogue chez le chat, le cortex suprasylvien latéral (Rauschecker, von Grunau, & Poulin, 1987). Une anisotropie était remarquée en faveur des directions orientées vers l'extérieur en partant du point de fixation, correspondant au flux optique rencontré lors de la locomotion vers l'avant; l'expansion. De plus, une plus grande proportion de neurones sélectifs à la direction d'expansion est rapportée, comparativement aux autres neurones sélectifs à la direction, dans les aires corticales spécialisées dans l'analyse de ce mouvement du macaque (Anderson & Siegel, 1999; Bremmer, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 2000; Duffy & Wurtz, 1991a; Geesaman & Andersen, 1996; Graziano, Andersen, & Snowden, 1994; Read & Siegel, 1997; Schaafsma & Duysens, 1996; Siegel & Read, 1997; Tanaka & Saito, 1989) et du chat (Brosseau-Lachaine, Faubert, & Casanova, 2001; J. N. Kim, Mulligan, & Sherk, 1997). Ce biais pour l'expansion du mouvement radial pourrait être mis en relation avec l'importance de l'expérience écologique de locomotion qui s'effectue en général vers l'avant dans l'environnement.

L'imagerie cérébrale chez l'adulte a démontré une activation plus importante des aires visuelles occipito-pariétales à la présentation d'un flux optique en expansion, comparativement au mouvement de contraction (Ptito, Kupers, Faubert, & Gjedde, 2001). Cependant, les études psychophysiques récentes effectuées chez l'adulte n'ont pas démontré de biais pour le mouvement d'expansion (Beardsley & Vaina, 2005; Morrone, Burr, Di Pietro, & Stefanelli, 1999). Néanmoins, certains auteurs ont noté l'incontestable ressemblance entre le biais pour l'expansion de l'aire MSTd du macaque et leur préférence mesurée chez l'adulte pour le mouvement radial (Beardsley & Vaina, 2005). Une anisotropie des réponses en faveur d'un mouvement en profondeur s'approchant des yeux est également rapportée (Lewis & McBeath, 2004; Perrone, 1986). De plus, une étude de recherche visuelle a démontré qu'un élément en expansion ressortait rapidement des éléments en contraction, mais celui en contraction ne ressort pas des éléments en expansion (Takeuchi, 1997).

Les études conduites chez de très jeunes nourrissons ont démontré des réponses motrices défensives spécifiquement aux différents stimuli en expansion (Ball, Ballot, & Dibble, 1983; Ball & Tronick, 1971; Nanez, 1988; Nanez & Yonas, 1994; Yonas, Pettersen, & Lockman, 1979). Toutefois, il est possible que ces défenses réactives à l'expansion, présentes presque dès la naissance (Jouen & Lepecq, 1989), proviennent plutôt de mécanismes sous-corticaux rudimentaires, plutôt que d'une sensibilité évoquée par des mécanismes corticaux (Shirai, Kanazawa, & Yamaguchi, 2004a).

### **7.1.5 Émergence de la sensibilité au flux optique**

D'un côté, la littérature fait mention de réactivités posturales appropriées à la direction du flux optique ou de stimuli de *looming* excessivement tôt dans la vie. Dans un même ordre d'idée, un résumé de conférence mentionne un comportement de mouvements de locomotion chez des nouveau-nés de 3 jours tenus dans les airs, au-dessus d'un flux optique terrestre projeté sur une surface plane. En effet, ils rapportent entre autres que davantage de « pas » sont effectués lorsque le nourrisson est tenu au-dessus du flux optique qui s'avance vers lui, que pour les conditions de texture statique. Ils avancent que les nouveau-nés vont effectuer ces mouvements même en l'absence de

stimulation tactile sous les pieds et le comportement était plus facilement provoqué par un flux optique qui s'avance vers lui que pour les autres conditions (Barbu-Roth et al., 2005). Il est possible qu'un mécanisme primaire de détection du flux optique, liée à la survie de l'espèce soit fonctionnel dès les premiers jours de la vie, mais il est peut-être rudimentaire et donc, dépendrait de structures sous-corticales, tel que suggéré par Braddick et coll. (Braddick, Atkinson, & Wattam-Bell, 2003). Certains auteurs ont suggéré que des réponses défensives semblables chez l'adulte lors de la présentation d'un stimulus en *looming* proviennent d'un réseau impliquant le collicule supérieur (S. M. King, Dykeman, Redgrave, & Dean, 1992). Par ailleurs, un parallèle peut être fait avec le nystagmus optocinétique (NOC) qui est présent chez les nouveau-nés, mais avec un contrôle sous-cortical au départ, démontré par une asymétrie du NOC monoculaire. Vers l'âge de 2 à 3 mois, il est rapporté que le cortex visuel prendrait la relève du mécanisme directionnel qui est à l'origine du nystagmus avec une disparition de l'asymétrie (Atkinson, 2000; Atkinson & Braddick, 1981; Braddick, 1993a; Braddick, Atkinson, & Wattam-Bell, 2003). Le NOC et les réactions posturales du nouveau-né au flux optique sont tous deux des ajustements posturaux en réponse d'indicateurs visuels de mouvement lors de la locomotion. Ainsi, il pourrait être possible que ces réponses rudimentaires proviennent d'un système sous-cortical au départ, tel qu'il est supposé pour le NOC.

D'un autre côté, il a été bien démontré dans la littérature que les mécanismes responsables de la sélectivité à la direction, par la sensibilité à la cohérence, ne sont présents qu'à partir de 7 à 8 semaines de vie et dépendraient du cortex visuel (Mason, Braddick, & Wattam-Bell, 2003; Wattam-Bell, 1994, 1996a, 1996b). C'est une des raisons qui a dirigé notre choix de groupe d'âge à partir de 2 mois, puisque les mécanismes de sélectivité à la direction doivent être d'abord fonctionnels pour l'analyse du flux optique. Nous avons toutefois tenté d'évaluer des seuils de cohérence – des mesures s'adressant au cortex extrastrié - chez de plus jeunes nourrissons. En effet, 5 bébés sont venus au laboratoire à l'âge d'un mois, mais un seul est resté assez éveillé et disponible sur la période requise pour parvenir à une mesure (76% de cohérence). Malheureusement la technique du regard préférentiel fonctionne bien dans une tranche d'âge précise et à l'âge d'un mois, il est très difficile d'obtenir des mesures (peu

éveillés, ne se tiennent pas toujours la tête, regards peu francs, etc.). Pourtant, nous avons une certaine indication d'une sensibilité mesurée au flux optique chez un jeune participant, ce qui remettrait en question la hiérarchisation du développement de l'analyse des mécanismes de la direction du mouvement qui surviendrait après 2 mois d'âge. Ce résultat pourrait laisser supposer un hypothétique mécanisme « hard wired » qui serait mis en place très tôt dans le développement, étant donné l'importance de l'analyse de ce mouvement pour la survie. Par ailleurs, il est surprenant de constater que l'aire MT/V5 présente un aspect anatomique presque mature très tôt suite à la naissance, contrairement aux autres régions extrastriées qui se développent de façon plus tardives (Bourne & Rosa, 2006). De plus, elle serait une des seules régions du cortex humain qui serait déjà myélinisée à la naissance (Annese, Gazzaniga, & Toga, 2005). Toutefois, la myélinisation des autres voies intracorticales sont également critiques. Les études qui suivront pourront certainement apporter davantage d'éclaircissements sur cette question.

### **7.1.6 Inné vs acquis : génétiquement prédéterminé ou influence de l'environnement?**

Est-ce que l'expérience active de la locomotion influence le développement de la sensibilité au flux optique? Bien que les nourrissons semblent percevoir le mouvement radial dès l'âge de 2 mois, donc bien avant de s'en servir, c'est à 8 mois qu'ils présentent une véritable sélectivité à la direction du mouvement radial. Par ailleurs, une étude d'habituation a démontré qu'à partir de l'âge de 7 mois, les nourrissons seraient capables d'intégrer l'information visuelle complexe en une structure cohérente, tel que pour discriminer un patron flux optique en rotation d'un patron de mouvement incohérent (Spitz, Stiles, & Siegel, 1993).

Dans notre échantillon de nourrissons, les enfants étaient pour la plupart évalués à un âge où ils ne se déplacent pas d'eux-mêmes. Ils expérimentent des déplacements dans l'environnement statique mais de façon passive, causant probablement la vision de diverses directions du flux optique. Il est intéressant de constater qu'à l'âge de 8 mois, la majorité des nourrissons participants à notre première expérience se déplaçaient activement, tels que pour ramper ou marcher à quatre pattes (7/11 bébés). En effet, les



enfants débutent généralement leurs expériences actives de déplacement dans l'espace vers l'âge de 8-9 mois ("WHO Motor Development Study: windows of achievement for six gross motor development milestones", 2006). Ces premières balades dans l'espace pourraient être mises en relation avec nos résultats qui démontrent des améliorations significatives de la sensibilité à l'expansion spécifiquement vers l'âge de 8 mois pour les expériences 1 & 3. Ainsi, l'expérience semble jouer un rôle dans la consolidation des mécanismes impliqués dans l'analyse du flux radial en plus de la maturation. Il a été suggéré par le passé que les jeunes enfants qui apprennent de nouvelles habiletés de motricité, telle que de se tenir debout seul et l'apprentissage de la marche, attribuent un poids plus important à la vision dans la calibration de leurs réponses posturales (Delorme, Frigon, & Lagace, 1989; Foster, Sveistrup, & Woollacott, 1996). De plus, il est rapporté dans la littérature que les habiletés sociale, émotives et cognitives des nourrissons changent lors de l'apprentissage de la marche à quatre pattes, donc qui explorent davantage leur environnement (Campos et al., 2000).

Une étude s'est justement penchée sur le rôle de l'expérience motrice de locomotion d'enfants de 9 mois, quant à leurs réponses posturales au mouvement de flux optique global comportant un mouvement de tous les murs et du plafond, avec ou sans stimulation terrestre (plancher) (Lejeune et al., 2006). Ils n'ont rapporté qu'une faible relation entre le stade de locomotion de l'enfant et la stimulation terrestre au plancher, sauf pour les nourrissons sans expériences; les filles ont une moins bonne réactivité posturale au flux que les garçons. Une étude précédente avait rapporté que les enfants qui ont de l'expérience en locomotion sont significativement plus réactifs physiquement au flux optique périphérique des murs latéraux d'une chambre mobile que les enfants ne se déplaçant pas encore d'eux-mêmes (Higgins, Campos, & Kermoian, 1996). Cependant, aucune différence n'a été relevée entre les groupes (se déplacent vs ne se déplacent pas) au mouvement combiné des murs, du plafond et du plancher de la salle. Ils ont donc suggéré que les enfants aient un certain contrôle postural pour réagir de façon appropriée au flux optique avant le début de la locomotion, mais l'expérience de la locomotion semble nécessaire pour rendre fonctionnel le contrôle postural au flux optique périphérique (Higgins, Campos, & Kermoian, 1996; Lejeune et al., 2006). Or, il a été démontré que la réactivité posturale au mouvement de toute la chambre mobile est

à son maximum vers l'âge de 9 mois et diminue ensuite (Bertenthal, Rose, & Bai, 1997; Delorme, Frigon, & Lagace, 1989), démontrant que plus d'expérience ne se converti pas nécessairement en plus grande réactivité posturale. Ainsi, l'âge de 8-9 mois semble être un âge critique où certaines fonctions reliées un flux optique se mettent en place, possiblement grâce à l'expérience de locomotion. Par ailleurs, Gilmore et coll. qui ont rapporté peu de changements dans la discrimination du *heading* des nourrissons âgés entre 3 et 6 mois, avancent que l'expérience passive de locomotion pourrait servir à soutenir un certain niveau de sensibilité au flux optique qui sera nécessaire lors de l'apprentissage de la locomotion active. Un développement rapide serait alors attendu, suite à la pratique de la marche ou autres (Gilmore, Baker, & Grobman, 2004).

Une expérimentation animale a voulu évaluer directement l'effet de l'expérience visuelle chez de jeunes chatons afin de déterminer l'impact de celle-ci sur le biais en faveur des directions centrifuges du mouvement des neurones du cortex suprasylvien latéral (PMLS) (Brenner & Rauschecker, 1990). Après avoir exposé leurs cohortes de chatons entre la 4<sup>e</sup> et la 11<sup>e</sup> semaine, soit au flux optique en expansion ou en contraction (sinon dans le noir), ils ont évalué la sélectivité à la direction des cellules du PMLS par enregistrement électrophysiologique. Leurs résultats ont démontré que le biais centrifuge serait indépendant de l'exposition visuelle spécifique, car la préférence neuronale pour les directions centrifuges s'est autant manifestée chez les chatons exposés à la contraction qu'à l'expansion. Ainsi, les auteurs proposent que le biais serait plutôt déterminé de façon innée, par l'évolution phylogénétique de l'espèce que par l'expérience individuelle. Toutefois, cette étude a utilisé une exposition passive, c'est-à-dire que les sujets n'utilisaient pas l'information visuelle pour agir dans l'espace. Enfin il ne faut pas passer sous silence l'importance de l'expérience visuelle dans le bon développement des fonctions, tel que les études en développement de la vision l'ont démontré. Nous avons qu'à penser aux conséquences néfastes de l'amblyopie, lorsqu'un œil d'une acuité plus faible n'est pas corrigé lors de la période critique (He, Ray, Dennis, & Quinlan, 2007)

Ainsi, d'un côté nous avons des indications d'un certain mécanisme présent dès la naissance, qui produit des réactions, tels que des pas ou un recul de la tête, à la

présentation d'un flux optique en expansion. De plus, l'étude animale de Brenner & Rauschecker indique plutôt un phénomène génétiquement déterminé. Il semble que l'importance de l'analyse de ce mouvement à la survie semble avoir laissé une certaine empreinte au plan phylogénétique, qui est certainement modulé ou amélioré par l'expérience passive et encore davantage lors des débuts de la locomotion qui débute vers 8-9 mois. À l'avenir d'autres études sauront guider nos interprétations sur la contribution de l'«inné» et de l'«acquis» dans le développement de ce biais pour l'expansion du mouvement radial en flux optique.

### **7.1.7 Limites de l'étude**

Les études effectuées chez de jeunes enfants, tels que les nourrissons, comportent des limites qui méritent certes d'être abordées. En effet, l'évaluation de la perception du bébé demande la collaboration de celui-ci, donc dépend grandement de son propre état interne. Ayant une compréhension de la tâche limitée et ne pouvant pas donner de réponses verbales, nous devons utiliser des techniques spécialement adaptées pour cette tranche d'âge (Atkinson & Braddick, 1999). C'est ce que nous avons fait, avec la technique du regard préférentiel, une méthode très utilisée dans le domaine qui dépend de la perception globale de l'enfant. Il est vrai qu'idéalement, nous aurions préféré pouvoir profiter de quelques éléments supplémentaires pour augmenter la «motivation» des sujets, tel que des renforçateurs aléatoires (ex : petit dessin animé qui apparaît) suite à une bonne réponse (un bon regard vers la cible). Mais des contraintes de programmation limitée ne nous a pas permis de le faire. De plus, l'idéal aurait été d'être deux examinateurs indépendants pour juger les regards, afin d'avoir un accord inter-juge. Par contre, l'examinatrice était seule et c'est pourquoi on a enregistré la majorité des expériences sur cassette vidéo. De plus, le jugement à choix forcé, dans le cadre du regard préférentiel, est une habileté que peu de gens ont, mais qui s'acquiert certainement avec un entraînement approprié.

L'étude du développement nécessite également de composer avec une variabilité importante entre les sujets, qui est intrinsèque à l'individu. Le taux de maturation varie énormément d'un enfant à l'autre, en plus de varier énormément à l'intérieur d'une

même séance, chez le même participant. Les mesures longitudinales ont d'ailleurs démontré des rythmes de maturation différents selon les enfants. L'utilisation du suivi longitudinal semble permettre toutefois un meilleur contrôle de ces variations. Évidemment, un plus grand nombre d'enfants à suivre dès 2 mois aurait grandement contribué à réduire la variabilité. Nous avons opté pour ces nombres de sujets par groupes ( $n=7$ ), conforme aux autres études longitudinales dans la littérature (Banton, Bertenthal, & Seaks, 1999; Gronqvist, Gredeback, & Hofsten, 2006) et les grandes difficultés de recrutement de parents prêts à revenir sur une période de 6 mois ont également compté.

Une autre limite que l'on peut énoncer, est la limite du système visuel périphérique du nourrisson lorsque que nous voulons mesurer les habiletés plus centrales du système visuel. Pour ne pas être restreint par ces limites, nous avons choisi des paramètres spécifiques devant être bien perçus par les nourrissons de 2 mois. Par exemple, le stimulus, composé d'éléments clairs sur un fond foncé, présentait un contraste élevé (93%), afin qu'il soit bien au-dessus du seuil de sensibilité au contraste pour la fréquence spatiale donnée (environ 3 fois). La fréquence spatiale des éléments était également choisie pour être bien perçus par les nourrissons, étant donné leur faible acuité visuelle (Vital-Durand, 1992; Teller, 1997). La vitesse des points était également réglée en fonction de la fenêtre de sensibilité des bébés à ces âges. De plus, un examen de la vue a été effectué sur tous les bébés suivis en longitudinal, mais pour les nombreux enfants de la première expérience, il était très difficile de le faire. Par contre, nous avons mesuré l'acuité de chacun à l'aide des cartes de Teller (McDonald et al., 1985; Teller, McDonald, Preston, Sebris, & Dobson, 1986). La grande majorité des enfants démontrait une acuité visuelle tout à fait dans la moyenne pour leur âge et en cas contraire, il était référé à la Clinique universitaire de la vision.

### **7.1.8 Directions futures**

Tel que mentionné précédemment, il serait intéressant de connaître la suite du développement de la sensibilité au mouvement radial avec l'âge. La technique du regard préférentiel n'est pas le meilleur candidat pour les enfants plus vieux. À moins

d'utiliser la méthode en escalier, tel qu'à la 3<sup>e</sup> expérience, qui est beaucoup plus rapide et a l'avantage de garder l'attention du participant. D'ailleurs, étant donné que les seuils adultes sont aussi bas pour les deux directions du mouvement, il serait d'autant plus pertinent de suivre la maturation de la sensibilité à la contraction, qui semble retardée par rapport à celle de l'expansion.

Il serait également intéressant de vérifier la sensibilité au flux optique, telle que nous l'avons fait dans l'étude, sur un plus grand échantillon d'enfants de 8 ou 9 mois, en évaluant également leur expérience de locomotion de façon plus objective. En effet, l'exploration de la relation entre la perception visuelle et le développement moteur semblent être des avenues prometteuses.

Une suite intéressante à l'étude serait la combinaison des mesures comportementales, donc psychophysiques, avec des mesures électrophysiologiques, tel qu'à l'aide d'enregistrements de potentiels évoqués aux stimuli visuels (PEV) de flux optique, sur le scalp des nourrissons. Peu d'études connues ont effectué des PEVs au flux optique, sauf pour une étude récente chez les patients atteints d'Alzheimer (Kavcic, Fernandez, Logan, & Duffy, 2006). Ainsi, de tels enregistrements chez les nourrissons seraient un défi à relever. Toutefois, ils apporteraient possiblement davantage d'informations quant aux réponses corticales au mouvement de flux optique et leur maturation. Nous pourrions également tenter l'expérience neurophysiologique chez des poupons aussi jeunes que quelques jours après la naissance, afin de vérifier l'émergence de cette sensibilité au mouvement radial. De plus, éventuellement, les techniques d'imageries qui se raffinent pourront certainement aider à clarifier le questionnement entourant les zones impliquées dans le traitement du flux optique en bas âge et l'évolution avec la maturation.

### **7.1.9 Conclusion de la première étude**

En conclusion, la première étude de la thèse démontre un développement de la sensibilité au mouvement de flux optique au cours de la première année de la vie. Cette étude est la première à avoir mesuré des seuils de cohérence au flux optique radial, chez des nourrissons d'une large étendue d'âge, en inter-groupe et en suivi longitudinal. Les

résultats démontrent que les nourrissons peuvent percevoir ce mouvement complexe dès l'âge de 2 mois et que les mécanismes qui sous-tendent cette perception se développent avec l'âge, en particulier pour l'information radiale en expansion. Il a été démontré que les mécanismes directionnels pour le mouvement radial du flux optique semblent être présents vers l'âge de 8 mois, l'âge où certains débutent les déplacements actifs dans l'environnement. Enfin, les résultats obtenus chez les nourrissons évalués avec les deux directions du mouvement radial appuient l'hypothèse d'un biais pour l'expansion du stimulus de flux optique rapporté dans la littérature. D'autres études pourront démontrer la suite du développement de cette sensibilité jusqu'à l'âge adulte.

## **7.2 Déficit de la perception de stimuli complexes, chez les enfants ayant subi un TCC léger**

La seconde étude de la thèse, qui a évalué la perception de stimuli visuels simples et complexes des enfants ayant subi un TCC léger, a révélé un déficit prolongé de la perception d'informations visuelles dites «complexes». Dans les sections suivantes, les points importants à discuter seront repris en fonction des résultats obtenus. Enfin, les limites de l'étude ainsi que les avenues futures de recherche seront également abordées.

### **7.2.1 Déficit du traitement visuel de haut-niveau suite au TCCL**

Le premier objectif de la seconde étude était d'examiner la perception d'informations visuo-spatiale chez des jeunes ayant subi un TCCL, comparativement à un groupe témoin équivalent en terme d'âge et de genre. Dans l'ensemble, les résultats indiquent une sensibilité affectée chez les jeunes ayant subi un TCCL spécifiquement pour l'information visuelle dite «complexe», de haut-niveau. En effet, les enfants et adolescents du groupe de TCCL ont présenté des seuils en moyenne plus élevés pour la perception de stimuli définis par le contraste dit de deuxième-ordre statique et dynamique ainsi que pour le flux optique. Ces derniers stimuli requièrent une intégration d'éléments locaux afin de percevoir la direction ou l'orientation du patron visuel complexe. En contraste avec ces derniers résultats, aucune différence n'a été trouvée entre les deux groupes quant à la perception de stimuli «simples» définis par la luminance, les stimuli de premier-ordre statique ou dynamique. De plus, une sensibilité au contraste équivalente est également rapportée aux stimuli de papillotement du FDT, en vision centrale, chez les deux groupes. La disparité observée entre une fonction de bas niveau normale et un déficit pour la perception de haut niveau chez les jeunes ayant subi un TCCL, met en évidence un «effet de complexité».

L'étude des enfants ayant subi un TCCL démontre en effet une altération de la sensibilité spécifique aux stimuli complexes, de haut niveau. Nous suggérons que l'effet de complexité observé chez ces jeunes reflète fort probablement une atteinte des

mécanismes intégratifs corticaux responsables de la perception visuelle des stimuli complexes, car un traitement neuronal additionnel est requis pour la perception de ceux-ci. Ces résultats suggèrent en effet un dysfonctionnement touchant les aires occipito-temporales et occipito-pariétales du cerveau (Dumoulin, Baker, Hess, & Evans, 2003), normalement impliqués dans l'analyse des stimuli visuels complexes statiques et dynamiques, respectivement. Les deux types de stimuli employés, statiques et dynamiques, sont physiquement très similaires. Ceci permet une comparaison de l'intégrité neuronale des deux voies visuelles: ventrale et dorsale (Goodale & Milner, 1992). De plus, les stimuli permettent de comparer deux niveaux d'analyse: de bas et de plus haut niveau, pour les stimuli simples (premier-ordre) et complexes (deuxième-ordre), respectivement (Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988). En effet, il est reconnu que ces stimuli sont traités à différents niveaux hiérarchiques au sein du système visuel (Chubb & Sperling, 1988; Clifford & Vaina, 1999; Dumoulin, Baker, Hess, & Evans, 2003; Smith, Greenlee, Singh, Kraemer, & Hennig, 1998; Wilson, Ferrera, & Yo, 1992). L'information de premier-ordre est considérée "simple" car elle est traitée de façon efficace par le cortex visuel. Plus spécifiquement, les variations locales de luminances sont analysées par les neurones de l'aire visuelle primaire (V1) pour la détection de l'orientation ou la direction. Tandis que l'information plus complexe de deuxième-ordre, requiert un traitement neuronal additionnel non-linéaire (rectification) avant qu'une analyse standard soit effectuée pour résulter en une perception de forme ou de mouvement. Des aires extrastriées seraient impliquées dans ce traitement, en plus de recruter un réseau de neurones plus étendu. Par exemple, pour les stimuli de deuxième-ordre en mouvement, des aires supplémentaires seraient impliquées, tel que l'aire V3, en plus de l'aire MT/V5 qui est déjà sollicitée pour les stimuli simple et complexe (Dupont, Sary, Pcuszens, & Orban, 2003; Seiffert, Somers, Dale, & Tootell, 2003; Smith, Greenlee, Singh, Kraemer, & Hennig, 1998).

La perception au mouvement de flux optique a été également affectée chez notre groupe de jeunes ayant subi un TCCL, comparativement aux contrôles, jusqu'à 3 mois post-accident. Ce résultat appuie d'autant plus la proposition que la perception visuelle de stimuli complexes est affectée chez les enfants ayant subi un TCCL et ce, lors de toute la période étudiée. Il est connu que le flux optique exige un traitement visuel plus



complexe, qui requiert un traitement de plus haut niveau, puisqu'une intégration d'une multitude de directions est nécessaire pour la génération d'un percept cohérent. De plus, l'analyse du flux optique est fondamentale à l'orientation et à la navigation dans l'espace tridimensionnelle, pour la perception d'objets en mouvement et pour le contrôle de la posture lors de la locomotion (Burr, Morrone, & Vaina, 1998), toutes des fonctions nécessaires au comportement habituel des enfants. La performance des enfants atteints suggère les possibles difficultés à intégrer et percevoir efficacement les éléments de l'environnement dans lequel ils se déplacent. Il est donc important d'évaluer de type d'habileté perceptive puisqu'elle est présente dans diverses activités récréatives courantes telles que courir, circuler à vélo, en planche à roulettes, en planche à neige ou à ski, etc.

Bien que l'on obtienne sensiblement les mêmes conclusions avec les deux approches, la procédure d'évaluation par les stimuli de premier- et de deuxième-ordre a l'avantage de ne pas être affectée par la répétition des évaluations. Tandis que la procédure d'évaluation avec le stimulus de flux optique, elle, est grandement influencée par l'apprentissage, tel qu'observé chez les deux groupes d'enfants qui s'amélioraient avec les répétitions. Ainsi, la méthodologie des stimuli de premier- et de deuxième-ordre serait privilégiée lors d'une étude subséquente, étant donné une bonne résistance à un effet d'apprentissage.

Également, cette dissociation entre une sensibilité préservée pour les stimuli simples, et affectée pour les stimuli complexes, suggère également que les déficits obtenus ne découlent pas d'une altération de la fonction visuelle générale suite au traumatisme, ni d'une atteinte spécifique d'une voie de traitement de l'information visuelle. Nos participants ont été évalués en optométrie pour s'assurer que chacun d'eux avait une bonne acuité et une bonne vision des stimuli présentés. Qui plus est, la sensibilité au contraste équivalente entre les deux groupes en portion centrale (FDT) suggère également que l'effet obtenu n'est probablement pas dû à des troubles visuels suite au TCCL. On a également relevé une sensibilité au contraste normale chez les individus atteints d'un TCC dans la littérature (Sarno et al., 2000).

## **7.2.2 Traitement visuel de bas et de haut niveau chez d'autres populations cliniques**

En ce qui a trait à l'effet de complexité obtenu chez les jeunes ayant subi un TCCL, d'autres études ont également démontré un tel effet avec des stimuli de premier- et de second-ordre comparables à ceux utilisés lors de notre investigation. D'abord, l'étude menée au laboratoire par Habak & Faubert (2000) a démontré une plus grande diminution de la sensibilité pour l'information de deuxième-ordre chez un groupe de personnes âgées, comparé à de jeunes adultes. Les auteurs suggèrent que le vieillissement normal affecte les étapes de traitements additionnels requises pour l'analyse de stimuli de plus haut niveau. De plus, un dysfonctionnement neuronal diffus et non-spécifique pourrait expliquer, selon les auteurs, leurs résultats chez les personnes âgées. La diminution de la sensibilité aux stimuli complexes chez les enfants ayant subi un traumatisme au cerveau pourrait, de façon similaire au vieillissement non-pathologique, révéler une dysfonction diffuse et généralisée de l'intégration neuronale de haut-niveau, plutôt qu'une dysfonction d'une aire corticale ou d'une voie spécifique. En effet, le TCCL entraîne un dommage neuronal diffus et des anomalies de la microstructure cérébrale (Blumbergs et al., 1994; Gaetz, 2004). Les dommages microstructurels obtenus en réponse aux forces physiques infligées au cerveau lors du TCC, sont possiblement à l'origine des difficultés mesurées au niveau du traitement de l'information visuelle complexe.

Des déficits des mécanismes d'intégration neuronal ont été démontrés au laboratoire par une série d'étude menée par Bertone et collaborateurs chez des personnes ayant un diagnostic d'autisme de haut niveau et du syndrome X-Fragile (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003, , 2005; Kogan, Bertone et al., 2004). Ils ont utilisé une approche comparable à la notre, de mesure de sensibilité aux stimuli de premier- et de deuxième-ordre, en statique et dynamique et s'est donc avérée très sensible auprès de certaines populations qui présentent des anomalies neurobiologiques. Cette méthodologie est non seulement sensible mais elle semble également sélective à certaines populations, donc utile pour distinguer un trouble des mécanismes intégratifs de haut niveau, d'un trouble de la fonction visuelle plus généralisé. Par exemple, chez

les patients atteints de glaucome, on a rapporté que l'analyse du mouvement de deuxième-ordre n'était pas plus affectée que celle du mouvement de premier-ordre, affectée aussi (Karwatsky, Bertone, Overbury, & Faubert, 2006). Or, le traitement du mouvement de bas et de haut-niveau sont tous deux déficitaires. Le glaucome est un désordre oculaire, une neuropathologie de bas niveau qui affecte l'analyse du mouvement (Bosworth, Sample, & Weinreb, 1997; Giaschi, Trope, Kothe, & Hong, 1996; Glovinsky, Quigley, & Dunkelberger, 1991; Quigley, Dunkelberger, & Green, 1988; Shabana, Cornilleau Peres, Carkeet, & Chew, 2003). De plus, une étude effectuée auprès d'enfants prématurés de petits poids a démontré des déficits sur la sensibilité au mouvement au premier-ordre, second-ordre et au mouvement global (MacKay et al., 2005). Ainsi, lorsque nous obtenons une diminution sélective de la sensibilité aux stimuli de deuxième-ordre, ceci pourrait représenter une atteinte neurobiologique et affirme la pertinence d'une telle méthodologie ou technique pour l'évaluation de diverses populations cliniques, telle que les personnes ayant subi un TCCL. De plus, il est intéressant d'observer les différents portraits obtenus, particuliers à chacune des conditions cliniques étudiées, tels une signature perceptive (voir Tableau 7-I).

**Tableau 7-I** Sensibilité de quelques populations cliniques aux stimuli simple/complexe

	<i>Vieillessement normal</i>		<i>Syndrome X Fragile</i>		<i>Autisme de Haut Niveau</i>		<i>Glaucome</i>		<i>TCCL*</i>	
	Simple	Complexe	Simple	Complexe	Simple	Complexe	Simple	Complexe	Simple	Complexe
<b>Ventral</b>	=	↓↓	=	↓↓	↑↑	↓↓	Non testé	Non testé	=	↓↓
<b>Dorsal</b>	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	=	↓↓	↓↓	↓↓	=	↓↓

Représentation sous forme de tableau de la sensibilité de ces populations cliniques pour le vieillissement normal (Habak & Faubert, 2000), le syndrome X-Fragile (Kogan, Bertone et al., 2004), l'autisme de haut-niveau (Bertone & Faubert, 2005; Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2003), le glaucome (Karwatsky, Bertone, Overbury, & Faubert, 2006) et nos présents résultats\*, en utilisant une méthodologie semblable à l'aide de stimuli de premier- (simple) et de deuxième-ordre (complexe), statique (voie ventrale) et en mouvement (voie dorsale). Les symboles égal (=) et les flèches (↓↓, ↑↑)

démontrent respectivement une équivalence ou une différence significative pour la sensibilité mesurée entre le groupe clinique comparé au groupe témoin adéquat. Tableau adapté de (Bertone, Mottron, Jelenic, & Faubert, 2005).

Quant au mouvement de flux optique, également affecté chez notre échantillon, d'autres populations présentant des dommages cérébraux ont aussi démontré une altération de la perception de ce mouvement. L'équipe du chercheur Duffy a démontré une augmentation sélective des seuils de cohérence du mouvement de flux optique (davantage que ceux du mouvement de translation) chez certains patients présentant la maladie d'Alzheimer (Kavcic, Fernandez, Logan, & Duffy, 2006; H. L. O'Brien et al., 2001; Tetewsky & Duffy, 1999).

De façon similaire aux études précédentes, nous proposons que la diminution du traitement de l'information visuelle de haut niveau chez les enfants ayant subi un TCCL puisse refléter une altération généralisée de la connectivité neuronale, donc un dérangement des connexions cortico-corticales. D'ailleurs, des dommages aux fibres fines, non-myélinisées, sont rapportés dans la littérature suite au TCC, ce qui interfère avec les connexions intra-corticales qui sont accomplies par les fibres non-myélinisées (Povlishock & Katz, 2005).

Cependant, la diminution de la sensibilité à l'information visuelle de haut niveau n'est pas spécifique aux jeunes ayant subi un TCCL, car de nombreuses études ont rapporté une diminution de la sensibilité au mouvement complexe (i.e. mouvement global), chez diverses populations cliniques présentant un désordre neurologique (Atkinson et al., 1997; Chen, Nakayama, Levy, Matthyse, & Holzman, 2003; G. C. Gilmore, Wenk, Naylor, & Koss, 1994; Gunn et al., 2002; Mapstone, Steffenella, & Duffy, 2003; McKendrick & Badcock, 2004; Regan, Kothe, & Sharpe, 1991; Trick, Kaskie, & Steinman, 1994). Contrairement à ces études, nous avons évalué l'intégrité des deux voies visuelles, à deux niveaux hiérarchiques dans le système visuel, nous donnant ainsi un portrait plus complet de la situation.

### 7.2.3 Déficits visuels suite au TCCL

La littérature ne comporte que très peu d'études qui se sont attardé spécifiquement à la perception visuelle suite à un traumatisme et encore moins chez la population pédiatrique. L'étude menée par Gagnon et collaborateurs (2004b), auprès d'une population pédiatrique semblable à la nôtre rapporte que le groupe d'enfant ayant subi un TCCL démontre une altération de la performance comparativement au groupe témoin seulement au sous-test de temps de réponse du *Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency* (BOTMP), jusqu'à 12 semaines après le TCCL. La tâche demandée paraît simple, mais les multiples modalités requises pour effectuer cette tâche et la nature complexe du stimulus visuel à détecter pourraient avoir joué un rôle dans le ralentissement de la performance visuo-motrice. En effet, le stimulus visuel à traiter dans cette tâche, une règle en mouvement, présentait un niveau de complexité accru, demandant un niveau supérieur de traitement de l'information. Ainsi, les auteurs suggèrent que les difficultés des enfants pourraient avoir été reliées à la perception visuelle du stimulus complexe. Notre étude a fait suite à cette hypothèse et elle a effectivement indiqué un déficit dans le traitement de l'information visuelle complexe chez les jeunes ayant subi un traumatisme.

D'autres chercheurs ont relevé le fait que les tâches qui requièrent une intégration intacte de l'information visuelle peuvent être affectées suivant un TCCL. D'ailleurs, une recherche a démontré une atteinte des performances seulement pour la tâche d'interprétation de casse-tête visuels dans une batterie de tests cognitifs, chez des enfants d'âge préscolaire (entre 2.5 et 4.5 ans) 6 mois et un an après l'accident (Wrightson, McGinn, & Gronwall, 1995). Ce sous-test demandait à l'enfant d'identifier un ou des objets dans une image comprenant les objets camouflés, dans une limite de temps donné. Ce déficit de visuo-perception s'est manifesté jusqu'à l'âge de 6.5 ans chez les enfants ayant subi un TCCL comparativement au groupe d'enfants contrôles ayant subi une blessure ailleurs qu'à la tête, de même niveau socio-économique et développemental. Par ailleurs, on relève une association entre la difficulté à cette tâche de visuo-perception et de plus faibles habiletés en lecture à l'âge de 6 ans et demi, chez les enfants atteints à la tête seulement et par le fait même, demandaient davantage d'aide

pour l'apprentissage de la lecture. Il est possible que le déficit à ce test seulement soit simplement dû à la limite de temps imposée, étant donné un possible ralentissement des fonctions cognitives suite au TCCL. Par contre, d'autres tests de leur batterie comportaient des limites de temps et aucune différence n'a été relevée. De plus, il est étonnant de constater qu'aucun déficit n'a été rapporté à l'intérieur d'un mois suivant le traumatisme sur le même sous-test, alors qu'un ralentissement serait davantage attendu en phase aiguë. Or, si l'on revient à nos propres résultats, les enfants avaient tout le temps qui leur était nécessaire pour répondre.

Chez des adultes ayant subi divers types de TCC (de légers à sévères), des potentiels évoqués visuels (PEV) anormaux persistants sont rapportés pour les PEV de ségrégation de texture orientés ou en mouvement (Lachapelle, Ouimet, Bach, Ptito, & McKerral, 2004). Ces PEV mesurés en réponse aux stimuli de texture reflètent probablement un niveau plus complexe du traitement de l'information visuelle, tel qu'une intégration de l'information plus globale. Le déficit visuel a été mis en évidence chez des patients plusieurs mois ou années suite au traumatisme. En accord avec nos conclusions, ces derniers auteurs ont suggéré que les mécanismes de traitement visuel de haut-niveau sont altérés suite au TCC.

Une étude récente, menée par Slobounov et collaborateurs rapporte une altération de la posture en réponse à un champ visuel en mouvement (flux optique), en immersion virtuelle chez de jeunes athlètes suite à une commotion cérébrale de grade 1 et 2. Cet effet sur la posture des athlètes blessés a été mesuré jusqu'à 30 jours post-accident. Les chercheurs de ce groupe suggèrent que le traumatisme induit une altération de l'intégration sensorielle (Slobounov, Tutwiler, Sebastianelli, & Slobounov, 2006).

#### **7.2.4 Déficit prolongé de la perception de stimuli complexes**

Le second objectif de cette étude était de suivre la performance visuo-perceptive des enfants sur les trois premiers mois suite au traumatisme. Nous nous attendions à une amélioration de la sensibilité à l'intérieur de la période étudiée, car la majorité des études rapporte une récupération des symptômes et déficits cognitifs au cours des 3 premiers mois. Cette récupération serait d'autant plus rapide chez les enfants (Carroll et

al., 2004). Or, on constate que l'effet de complexité rapporté plus haut est maintenu jusqu'à 12 semaines post-accident. Ainsi, les déficits perceptifs observés chez les jeunes ayant subi un TCCL en regards à l'information visuelle complexe sont toujours présents après 3 mois et ne démontrent pas de récupération significative à l'intérieur de cette période dite «aiguë» (Frencham, Fox, & Maybery, 2005).

Les résultats et leurs persistances dans le temps sont d'autant plus étonnants étant donné que les participants sont normaux à l'examen neurologique à la sortie de l'hôpital et sont parfois asymptomatiques. Étant donné le contexte expérimental, où les participants devaient se déplacer au laboratoire dès la première semaine post-accident et donc devaient être assez bien disposés pour le faire, il est possible que nous ayons eu des participants assez peu affectés par le TCCL. Ainsi, le contexte expérimental a peut-être créé un certain biais dans le recrutement des sujets. Par ailleurs, l'utilisation d'un échantillon tel que nous l'avons utilisé dans notre étude prospective où les participants sont recrutés sur la seule base de leur TCCL conséquemment à leur admission a l'avantage de représenter la population de TCCL de façon moins biaisée que pour une étude effectuée suite au recrutement dans un contexte clinique, qui consultent en raison de problèmes suite au traumatisme. Ainsi, dans ce contexte, nous pouvons être confiants de la validité des résultats en n'ayant pas surestimé les difficultés présentées par ces jeunes.

L'étude de Wrightson et collaborateurs (1995) mentionnée à la section précédente démontre également une persistance du déficit visuo-perceptif allant jusqu'à quatre ans suite au traumatisme. Les enfants suivis l'ont été de l'accident au préscolaire, jusqu'à l'âge de 6 ans et demi, soit sur une durée de deux à quatre ans, selon les enfants. Une étude réalisée avec une population semblable à la notre, qui a été recrutée à partir du même bassin de patients, avec un diagnostic posé par la même équipe médicale et qui a subi le même type de blessure, a également rapporté des déficits prolongés, 12 semaines après le TCCL, au niveau de l'équilibre et des temps de réponse visuo-moteurs (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a, , 2004b). Les auteurs précisent que les tâches utilisées, qui ont relevé les déficits posturaux ou de temps de réponses, semblent

impliquer des épreuves plus complexes, demandant une intégration de l'information sensorielle ou une combinaison de composantes à évaluer.

Chez l'adulte, il semble exister une controverse au sein de la littérature sur le TCCL, concernant la persistance des difficultés cognitives suite au TCCL. D'un côté, on rapporte que la plupart des individus qui expérimentent des difficultés cognitives suite au TCCL reviennent rapidement à la normale, généralement à l'intérieur des 3 premiers mois (Carroll et al., 2004; Dikmen, McLean, & Temkin, 1986; Frencham, Fox, & Maybery, 2005; Levin, Mattis et al., 1987). D'un autre côté, un certain nombre d'études bien contrôlées rapportent des altérations des fonctions cognitives à long terme (Bohnen, Jolles, & Twijnstra, 1992; Bohnen, Jolles, Twijnstra, Mellink, & Wijnen, 1995; Chan, 2002; Potter, Bassett, Jory, & Barrett, 2001). Avec des troubles qui peuvent persister jusqu'à un an ou plus suivant le traumatisme, tel que pour l'attention (Binder, Rohling, & Larrabee, 1997). De plus, des déficits neurocomportementaux persistants aux tests neuropsychologiques sont rapportés au moins 12 mois après le trauma chez un sous-groupe de patients toujours symptomatiques (Sterr, Herron, Hayward, & Montaldi, 2006). Qui plus est, une étude menée par Vanderploeg et collaborateurs (2005) démontre que le TCCL peut avoir des conséquences neuropsychologiques néfastes à long-terme sur des aspects subtils de l'attention complexe et de la mémoire de travail. En effet, ils ont relevé ces déficits résiduels chez des vétérans de l'armée, en moyenne 8 ans après leur accident ayant causé le TCCL, avec des groupes témoins bien contrôlés (groupe témoin normal et groupe accidenté sans blessure à la tête; tous appariés en termes d'habiletés cognitives pré-morbide).

Ainsi, certaines études récentes semblent abonder dans le sens d'une persistance des déficits subtils, chez les individus ayant subi un TCCL tel que démontré par nos résultats. Des outils de mesures plus complexes semblent indiquer des difficultés résiduelles, auparavant passées sous silence. En effet, des difficultés à long terme semblent ressortir lorsque les méthodes d'investigations sont sensibles et s'adressent à l'intégration des fonctions perceptives, sensorielles ou autres. Lorsque évalués séparément, les différentes habiletés peuvent sembler normales, grâce à la plasticité cérébrale qui permet de compenser, de rediriger les ressources vers des voies ou des



connections non endommagées. Par contre cette «réserve fonctionnelle» peut donner l'apparence trompeuse d'être revenu à la normale, même si les déficits sont encore présents (Randolph, 2001).

#### **7.2.4.1 Symptômes post-commotionnels**

En ce qui a trait aux symptômes post-commotionnels, le groupe d'enfants ayant subi un TCCL a rapporté davantage de symptômes à la première semaine (1<sup>ère</sup> session) que le groupe d'enfants témoins. Avec le temps, il semble que les symptômes rapportés à l'aide du questionnaire se soient normalisés. En effet, on constate qu'en moyenne, les enfants du groupe TCCL sont devenus asymptomatiques aux sessions 2 et 3, soit 1 et 3 mois suite au traumatisme. Ceci est conforme à ce qui est rapporté dans la littérature, avec une résolution des symptômes à l'intérieur d'un mois (Carroll et al., 2004). Bien qu'en moyenne asymptomatiques, les enfants du groupe «atteint» ont démontré un déficit prolongé de leurs habiletés à traiter l'information visuelle complexe. Ceci suggère que les outils de mesures psychophysiques soient assez sensibles pour détecter des altérations neuronales subtiles, telles que celles subies suite à un TCCL. De plus, contrairement aux symptômes rapportés, les mesures de sensibilité sont probablement moins influencées par des facteurs psychologiques et/ou sociaux. En effet, l'occurrence de symptômes post-commotionnels suite au TCCL peut refléter divers facteurs dont la vulnérabilité pré-morbide, les capacités d'ajustement suite à l'accident et les changements neuro-biologiques au cerveau (Yeates et al., 1999). D'autres auteurs ont même démontré que les symptômes post-commotionnels rapportés sont fortement reliés à la détresse psychologique et au stress (Landre, Poppe, Davis, Schmaus, & Hobbs, 2006). Ainsi, la validité des symptômes post-commotionnels rapportés comme indicateur d'un TCC est parfois considérée comme suspecte (Yeates et al., 1999).

Les jeunes ayant rapporté beaucoup de symptômes n'étaient pas nécessairement plus atteints au plan perceptif et vice versa, car peu de corrélation n'a été relevée entre les seuils de perception pour l'information visuelle complexe et la l'ampleur des symptômes rapportée. Ceci indique que les symptômes rapportés et les tests perceptifs utilisés semblent mesurer différentes conséquences du traumatisme craniocérébral. De

plus, les résultats obtenus soulèvent un questionnement quant à la pertinence de retourner les enfants ayant subi un TCCL à leurs activités sportives, basé seulement sur la résolution des symptômes. Un retour prématuré aux activités sportives exigeantes pourrait les mettre à risque de subir un traumatisme craniocérébral encore plus grave.

Nos résultats suggèrent qu'il reste un déficit même en l'absence de symptômes rapportés, chez les patients asymptomatiques. Par ailleurs, une étude électrophysiologique récente a démontré des anomalies neurophysiologiques chez les athlètes commotionnés symptomatiques et asymptomatiques, et ce, plusieurs semaines après la commotion (Gosselin, Theriault, Leclerc, Montplaisir, & Lasseonde, 2006). De plus, l'étude de Slobounov et coll. (2006) démontre également des résultats en ce sens, où tous leurs jeunes athlètes commotionnés sont cliniquement asymptomatiques dix jours après la commotion. Par ailleurs, ils sont autorisés à effectuer un retour au jeu, sur la base d'évaluations neuropsychologiques et neurologiques standards. Pourtant, l'effet déstabilisateur par le mouvement du flux optique sur la posture est toujours présent à dix jours, comme à trente jours post-TCCL.

### **7.2.5 Impacts fonctionnels du déficit**

Nos résultats ont été obtenus en laboratoire, dans certaines conditions très précises et contrôlées. Qu'en est-il de l'effet du déficit perceptif relevé, dans les activités de la vie quotidienne? Il est très rare que nous ayons à résoudre une situation de perception qui implique seulement un traitement de deuxième-ordre dans les activités de la vie de tous les jours. Par contre, ce déficit signale vraisemblablement une altération de la capacité d'intégration de l'information visuelle à traiter et doit se répercuter dans diverses situations complexes. Il est possible que ce déficit de haut-niveau ait des conséquences sur l'analyse perceptive à effectuer lors d'activités sportives et de récréation des enfants, une tranche très active de la population (Kino-Québec. Comité scientifique & Thibault, 2000). Or, un manque de confiance dans leurs capacités ou performances sportives est rapporté, douze semaines après leurs TCCL, comparativement à avant la blessure. Bien que les enfants considèrent qu'ils sont revenus au niveau pré-traumatique pour leur participation et qu'ils aient maintenu leur

compétence athlétique, ils ne se sentiraient pas comme avant dans la pratique de leurs activités sportives (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2005). La diminution du sentiment d'efficacité personnelle relevé dans cette étude pourrait être due en partie aux lacunes perceptives révélées par notre étude. En outre, les symptômes résiduels, les difficultés d'équilibre (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a) pourraient également jouer sur l'état émotionnel et physique de l'enfant lors d'activités exigeantes, tel que lors des sports d'équipe, et conséquemment affecter leur sentiment d'efficacité personnelle.

De plus, les déficits subtils, tels que démontré en perception visuelle, en plus de ceux démontrés pour l'équilibre (Gagnon, Swaine, Friedman, & Forget, 2004a, , 2004b) pourraient réduire l'habileté de l'enfant à rencontrer les exigences lors de tâches qui requièrent une intégration sensorielle et motrice et par le fait même, d'augmenter ses chances de se blesser à nouveau. Or, Swaine et collaborateurs (2007) ont clairement démontré que les enfants ayant subi une commotion, une fracture du crâne ou une lésion intracrânienne ont plus de deux fois plus de risques de subir un TCC subséquent dans l'année suivante, que les enfants qui consultent pour une blessure ailleurs qu'à la tête. Ainsi, un suivi sur une plus longue échéance pourrait permettre d'éclaircir cette question, en évaluant le lien entre les déficits observés et une seconde blessure. De plus, la question des impacts fonctionnels pourrait être adressée ultérieurement en rajoutant des mesures neuropsychologiques assez sensibles pour évaluer les capacités visuo-perceptives et visuo-spatiales.

Si l'on interprète les présents résultats comme un trouble de l'intégrité de l'analyse globale de l'information, un tel déficit du traitement de l'information de plus haut niveau pourrait se refléter également au plan cognitif, comme pour certains déficits neuropsychologiques fréquemment rencontrés suite au TCCL chez les enfants. En effet, des difficultés cognitives transitoires sont relevées dans la littérature, suite au traumatisme subi par les jeunes, tel que pour l'attention sélective, la mémoire de travail, les capacités de planification et d'inhibition (Yeates et al., 1999). Également, il est possible que ces difficultés subtiles surviennent dans le contexte exigeant de l'apprentissage scolaire. Tel que suggéré par l'étude de Wrightson et collaborateurs

(1995), le TCCL chez l'enfant de tout âge pourrait avoir des conséquences sur le progrès académique, tel que pour l'apprentissage de la lecture suite à un TCCL en bas âge. Les professeurs et intervenants pourraient être davantage conscients de l'effet possible d'un TCCL sur les apprentissages et être en mesure de les diriger vers des ressources appropriées et de leur d'apporter un soutien supplémentaire.

### **7.2.6 Influence de l'attention sur les résultats**

Des déficits attentionnels et cognitifs ont été largement rapportés chez les adultes ayant récemment subi un TCCL (Binder, Rohling, & Larrabee, 1997; Carroll et al., 2004; Frencham, Fox, & Maybery, 2005). Bien que des troubles d'attention soient généralement observés suite à un TCC, nous ne croyons pas que l'attention ait joué un rôle dans l'effet de complexité obtenu. Les tâches de premier- et de deuxième-ordre utilisées dans l'étude sollicitent probablement les ressources attentionnelles de façon semblables, en plus d'être peu exigeantes. En effet, les niveaux de visibilité du stimulus présentés à chacun des tests perceptifs sont choisis autour du seuil attendu et rendent les deux tâches, simple et complexe, très similaires en termes d'exigence cognitive. De plus, une étude récente a évalué différents types d'attention visuo-spatiale suite à une commotion et a démontré que les composantes d'orientation et d'exécution sont affectées, mais pas la composante d'alerte (Haltermann et al., 2006). Cette dernière composante serait impliquée dans le maintien de la vigilance tout au long d'une tâche continue. Selon leurs résultats, elle demeure intacte suite au TCCL et elle semble être la seule composante impliquée dans notre tâche, car les participants n'ont qu'à regarder chacun des stimuli présentés et donner la réponse correspondante parmi deux choix. Par ailleurs, une étude s'est penchée sur la question de l'influence de l'attention sur la sensibilité des stimuli de premier- et de deuxième-ordre et a démontré que l'attention peut influencer non seulement le deuxième ordre, mais aussi le premier-ordre (Allen & Ledgeway, 2003). De plus, les effets de l'attention pour la discrimination à la direction du deuxième-ordre dépendent précisément de la durée de présentation du stimulus. Dans notre cas, nous avons utilisé des présentations longues (1 seconde) pour chacun des stimuli, donc il est peu probable que l'attention a influencé les sensibilités mesurées.

### 7.3 Limites de la seconde étude

L'étude comporte certes des limites qui seront discutés dans cette section. Une des premières limitations à aborder, est l'absence de mesure de base des participants. Étant donné le contexte de recrutement des sujets suite au traumatisme, en milieu hospitalier, il était malheureusement impossible d'avoir ces données individuelles pré-accident. Nous avons donc opté, comme comparatif, pour un groupe contrôle composé d'enfants appariés en termes d'âge et de genre. Toutefois, des mesures pré-accident auraient permis de démontrer l'impact direct du TCCL sur les performances perceptives des jeunes, tandis qu'actuellement on ne peut que rapporter ce phénomène chez les jeunes atteints, sans pouvoir affirmer que le TCCL cause l'atteinte visuo-perceptive. Qui plus est, des facteurs confondants, tels que la personnalité prémorbide des jeunes pourrait influencer les résultats. En effet, certains enfants pourraient être prédisposés, avant même d'avoir subi l'accident, à être plus à risque d'en subir un en raison de leurs comportements ou encore à cause de faibles habiletés visuo-perceptives ou autres. En effet, il est possible que les enfants ayant subi un TCCL aient déjà des troubles perceptifs, qui les ont prédisposés à subir un accident. Cependant, les critères de recrutement visant à exclure les enfants ayant un diagnostic de troubles d'apprentissage, de comportement et/ou de trouble d'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) étaient destinées à éliminer de l'échantillon de possibles personnalités pré-morbides plus enclines à subir un accident (*accident-prone*). Il est généralement reconnu que les enfants victimes de blessures à la tête (TCC) ou ailleurs, tels que des blessures orthopédiques présentent plus fréquemment des troubles de comportements et/ou d'hyperactivité (Bijur, Haslum, & Golding, 1990; Ponsford et al., 1999). D'ailleurs, de façon tout à fait anecdotique, un clinicien impliqué dans le recrutement des patients nous rapportait un recrutement ardu selon nos critères, car de nombreux enfants ayant subi un TCCL étaient déjà sous médication tel que du Méthylphénidate (Ritalin), donc souffraient probablement de troubles d'attention avec ou sans hyperactivité.

Une autre limite possible de l'étude concerne la taille de l'échantillon. Au départ, nous avons comme objectif de recruter une trentaine d'enfants, selon le calcul de puissance effectué. Toutefois, le recrutement s'est avéré être plus ardu que prévu,

donc nous avons arrêté à 18 participants, après deux ans et demi de recrutement auprès des deux centres pédiatriques de la métropole. Plusieurs facteurs peuvent expliquer la difficulté de recrutement des participants, dont le déplacement des sujets à l'École d'optométrie, le temps requis pour l'étude (en dehors des heures d'école et de travail des parents), une disponibilité obligatoire dès la première semaine suite au TCCL, etc. Les résultats obtenus avec un échantillon plus grand auraient permis une subdivision en tranches d'âges, afin de tenir compte de l'effet développemental possible de la sensibilité aux stimuli complexes. Par contre, avec un nombre plus important de participants, nous aurions eu probablement des résultats similaires, quoique plus puissants, mais des conclusions semblables.

Un autre aspect méthodologique à considérer est le groupe témoin. Un groupe témoin ayant subi des blessures autres qu'à la tête, telles que des blessures orthopédiques aurait été intéressant à avoir. L'ajout de ce groupe aurait peut-être permis de mieux contrôler pour les différences pré-morbides qui ont peut-être eu une influence sur les résultats. En effet, un tel groupe comporte fort probablement le même type d'enfants qui subissent un TCCL et donc, est plus souvent composé d'enfants ayant des troubles de comportements et d'hyperactivité (Bijur, Haslum, & Golding, 1990; Ponsford et al., 1999). Toutefois, aucun enfant de notre échantillon présentait des troubles de comportements reconnus, tel que mentionné précédemment.

## **7.4 Directions et avenues futures de recherche**

Lors d'une prochaine étude, il serait intéressant de suivre la cohorte d'enfants plus longtemps dans le temps pour pouvoir observer une récupération ou une persistance du déficit observé lors des 3 premiers mois. Un suivi plus espacé dans le temps pourrait permettre d'évaluer les participants sur une plus longue échéance, tel qu'après 1 an ou plus post-accident. D'autres études pourront évaluer à plus long terme, l'impact du TCC léger sur la perception visuelle de stimuli complexes. Advenant la possibilité d'une persistance du déficit perceptif, il sera difficile de départager les effets du TCCL, de facteurs confondants, tel que la prédisposition. Ceci pourrait être éclairci par des évaluations massives sur de grandes cohortes d'enfants à risque de subir un TCCL, telle

que dans les équipes de hockey, pour avoir le niveau de base de l'enfant qui subi un TCCL. De plus, l'implication d'une telle étude dans les équipes sportives permettrait du même coup une sensibilisation des enfants et des parents aux problèmes qu'entraînent les commotions cérébrales et par le fait même, la prévention de celles-ci par la promotion du port de casque protecteur et du jeu juste et sécuritaire.

Les techniques d'imagerie cérébrales fonctionnelles, telles que l'IRMf serait bien utiles pour vérifier l'effet du TCCL sur le fonctionnement du cerveau des enfants atteints, plus particulièrement dans les aires qui nous intéressent ici, les régions occipito-temporales et occipito-pariétales du système visuel. Toutefois, ces techniques sont coûteuses et pas toujours facilement accessibles. Les potentiels évoqués visuels (PEV) demeurent une avenue intéressante pour l'évaluation objective du traitement de l'information visuelle de haut niveau. Il serait intéressant de comparer les performances psychophysiques des participants aux résultats électrophysiologiques aux stimuli complexes, chez un échantillon semblable.

Il serait intéressant d'évaluer le traitement de l'information visuelle complexe, mais chez de jeunes adultes afin de pouvoir comparer la récupération des enfants avec celle des adultes suite au TCCL. La résolution des symptômes post-commotionnels semble plus rapide chez les enfants que chez les adultes (Carroll et al., 2004). Ainsi, on peut supposer que les adultes présenteraient des déficits perceptifs de haut-niveaux à plus long-terme que les enfants. Par contre, il est possible que le cerveau en développement des enfants soit beaucoup plus vulnérable aux impacts et présente davantage de séquelles suite au TCCL, tel que suggéré précédemment (Field, Collins, Lovell, & Maroon, 2003).

L'évaluation de la sensibilité aux stimuli simple et complexe pourrait s'avérer être éventuellement un bon outil clinique, avec quelques modifications, pour apporter davantage d'informations quant à la capacité d'intégration corticale de la personne accidentée. Il y a présentement peu de mesures objectives qui quantifient la sévérité de la neuropathologie plus précisément que les mesures cliniques usuelles (Alexander, 1995). Un tel outil pourrait être éventuellement développé pour aider à quantifier le dommage, qui n'est pas toujours clairement démontré par les outils cliniques plus

standards. Ainsi, un outil clinique serait utile pour la détection d'un dysfonctionnement cérébral chez les personnes victimes de TCCL et permettrait même de suivre l'évolution dans le temps du déficit du traitement visuel de haut-niveau. Cet outil aurait l'avantage d'être objectif, non-invasif et facile d'utilisation. Enfin, le développement d'un tel outil pourrait aider à déterminer le pronostic et à guider les besoins éventuels d'interventions en réadaptation.

## **7.5 Conclusions de l'étude**

En conclusion de la seconde étude de la thèse, les résultats dévoilent un déficit prolongé des habiletés de perception qui requièrent une intégration du traitement de l'information visuelle complexe, chez les enfants ayant subi un TCCL. Des résultats normaux sont démontrés pour la sensibilité aux stimuli simples, en contraste aux stimuli complexes, qui démontre une sensibilité affectée à l'orientation et à la direction de deuxième ordre et au flux optique, chez les jeunes neuro-traumatisés. Le déficit du traitement de l'information complexe relevé persiste jusqu'à 3 mois suite au TCCL. Les résultats démontrent que la technique psychophysique utilisée représente un « outil » sensible et valide pour l'évaluation des déficits résiduels chez les enfants ayant subi un TCCL. L'évaluation de la sensibilité aux stimuli simples et complexes représente une stratégie optimale pour l'évaluation du statut neuro-cognitif suite au traumatisme. Enfin, de telles mesures perceptives pourraient éventuellement contribuer à l'évaluation clinique standard, pour aider à prévenir un retour prématuré aux activités et potentiellement réduire les risques de se blesser à nouveau.



## Conclusions générales

En conclusion, la présente thèse a voulu offrir des réponses à des questions encore méconnues dans le domaine du développement de la perception visuelle de stimuli complexes chez les nourrissons et chez les enfants ayant subi une blessure à la tête. Les méthodes psychophysiques s'avèrent être de bons outils pour l'appréciation du fonctionnement cérébral auprès de populations cliniques ou particulières.

L'étude portant sur le développement de la perception au flux optique s'est avérée être la première à démontrer une tendance de maturation de la sensibilité au flux optique, sur une large étendue d'âge. De plus, des seuils de cohérence ont été mesurés, une mesure authentique de la sensibilité. L'âge de 8 mois s'est révélée être un jalon important quant à la sensibilité à la direction du mouvement radial. Or, un questionnement à propos de l'expérience active de locomotion qui débute fréquemment vers cet âge a été émis en lien avec la sensibilité perceptive. Enfin, les résultats révèlent un biais pour l'expansion, conformément à la littérature, qui débute très tôt dans la vie. À l'avenir, davantage d'études devront être réalisées pour pouvoir préciser la suite du développement de la sensibilité au cours de l'enfance et pour démystifier l'émergence de cette sensibilité et des mécanismes neuronaux sous-jacents.

Très peu d'études n'avaient évalué la perception visuelle suite à un traumatisme craniocérébral léger et encore moins chez l'enfant. Pourtant, les habiletés visuo-perceptives sont très sollicitées lors des activités courantes et lors de l'apprentissage, tel que la lecture. La seconde étude présentée a donc permis de démontrer une sensibilité affectée aux stimuli complexe sur une période d'au moins 3 mois suite au trauma. Il est suggéré que la perturbation neuronale engendrée par le traumatisme au cerveau trouble le traitement de l'information visuelle de haut-niveau et mène à des déficits perceptifs.

La seconde étude démontre également l'importance d'utiliser des techniques ou méthodes très sensibles pour pouvoir relever les déficits subtils qui surviennent suite au TCCL, et ce pour divers domaines. Bien que subtiles et complexes, ces difficultés résiduelles ont probablement un impact fonctionnel dans les activités de la vie

quotidienne des jeunes, qui sont très actifs et donc à risque de subir une seconde chute. Les recherches futures permettront d'éclaircir cette piste d'un déficit perceptif et pourront également mieux informer les cliniciens sur cet impact possible, afin de mieux guider le retour sécuritaire aux activités sportives.

## Bibliographic

- AAN. (1997). Practice Parameter: The management of concussion in sports (summary statement). *Neurology*, 48(3), 581-585.
- ACRM. (1993). Definition of mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 8(3), 86-87.
- Albright, T. D. (1984). Direction and orientation selectivity of neurons in visual area MT of the macaque. *J Neurophysiol*, 52(6), 1106-1130.
- Albright, T. D. (1989). Centrifugal directional bias in the middle temporal visual area (MT) of the macaque. *Vis Neurosci*, 2(2), 177-188.
- Albright, T. D. (1992). Form-cue invariant motion processing in primate visual cortex. *Science*, 255(5048), 1141-1143.
- Alexander, M. P. (1995). Mild traumatic brain injury: pathophysiology, natural history, and clinical management. *Neurology*, 45(7), 1253-1260.
- Allen, H. A., & Ledgeway, T. (2003). Attentional modulation of threshold sensitivity to first-order motion and second-order motion patterns. *Vision Res*, 43(27), 2927-2936.
- Anderson, K. C., & Siegel, R. M. (1999). Optic flow selectivity in the anterior superior temporal polysensory area, STPa, of the behaving monkey. *J Neurosci*, 19(7), 2681-2692.
- Anderson, S. J., & Burr, D. C. (1987). Receptive field size of human motion detection units. *Vision Res*, 27(4), 621-635.
- Anderson, V., Catroppa, C., Rosenfeld, J., Haritou, F., & Morse, S. A. (2000). Recovery of memory function following traumatic brain injury in pre-school children. *Brain Inj*, 14(8), 679-692.
- Annese, J., Gazzaniga, M. S., & Toga, A. W. (2005). Localization of the human cortical visual area MT based on computer aided histological analysis. *Cereb Cortex*, 15(7), 1044-1053.
- Arterberry, M. E., & Yonas, A. (2000). Perception of three-dimensional shape specified by optic flow by 8-week-old infants. *Percept Psychophys*, 62(3), 550-556.
- Ashida, H., & Osaka, N. (1995). Motion aftereffect with flickering test stimuli depends on adapting velocity. *Vision Res*, 35(13), 1825-1833.
- Ashwal, S., Holshouser, B. A., Shu, S. K., Simmons, P. L., Perkin, R. M., Tomasi, L. G., et al. (2000). Predictive value of proton magnetic resonance spectroscopy in pediatric closed head injury. *Pediatr Neurol*, 23(2), 114-125.
- Aslin, R. N. (2007). What's in a look? *Dev Sci*, 10(1), 48-53.
- Atchley, P., & Andersen, G. J. (1998). The effect of age, retinal eccentricity, and speed on the detection of optic flow components. *Psychol Aging*, 13(2), 297-308.
- Atkinson, J. (2000). *The developing visual brain*. Oxford ; New York: Oxford University Press.
- Atkinson, J., & Braddick, O. (1999). Research methods in infant vision. In R. H. S. Carpenter & J. G. Robson (Eds.), *Vision research : a practical guide to laboratory methods* (pp. 161-185). New York: Oxford University Press.

- Atkinson, J., Braddick, O., Rose, F. E., Searcy, Y. M., Wattam-Bell, J., & Bellugi, U. (2006). Dorsal-stream motion processing deficits persist into adulthood in Williams syndrome. *Neuropsychologia*, *44*(5), 828-833.
- Atkinson, J., Braddick, O., & Wattam-Bell, J. (1993). *Infant cortical mechanisms controlling OKN, saccadic shifts, and motion processing*. Paper presented at the ARVO.
- Atkinson, J., & Braddick, O. J. (1981). Development of optokinetic nystagmus in infants : An indicator of cortical binocularity? In D. F. Fischer, Monty, R. A., Senders, J. W. (Ed.), *Eye movements : Cognition and visual perception*. NJ: Hillsdale: Erlbaum.
- Atkinson, J., Hood, B., Wattam-Bell, J., Anker, S., & Tricklebank, J. (1988). Development of orientation discrimination in infancy. *Perception*, *17*(5), 587-595.
- Atkinson, J., King, J., Braddick, O., Nokes, L., Anker, S., & Braddick, F. (1997). A specific deficit of dorsal stream function in Williams' syndrome. *Neuroreport*, *8*(8), 1919-1922.
- Aubin, D., Bernier, D., Feyz, M., Fréchette, P., Gadoury, M., Lapointe, J., et al. (2005). *Orientations ministérielles pour le traumatisme craniocérébral léger, 2005-2010*. Retrieved from.
- Aubry, M., Cantu, R., Dvorak, J., Graf-Baumann, T., Johnston, K. M., Kelly, J., et al. (2002). Summary and agreement statement of the 1st International Symposium on Concussion in Sport, Vienna 2001. *Clin J Sport Med*, *12*(1), 6-11.
- Bain, A. C., Raghupathi, R., & Meaney, D. F. (2001). Dynamic stretch correlates to both morphological abnormalities and electrophysiological impairment in a model of traumatic axonal injury. *J Neurotrauma*, *18*(5), 499-511.
- Baker, C. L., Jr. (1999). Central neural mechanisms for detecting second-order motion. *Curr Opin Neurobiol*, *9*(4), 461-466.
- Baker, C. L., Jr., Boulton, J. C., & Mullen, K. T. (1998). A nonlinear chromatic motion mechanism. *Vision Res*, *38*(2), 291-302.
- Baker, C. L., Jr., Hess, R. F., & Zihl, J. (1991). Residual motion perception in a "motion-blind" patient, assessed with limited-lifetime random dot stimuli. *J Neurosci*, *11*(2), 454-461.
- Ball, K., & Sekuler, R. (1980). Human vision favors centrifugal motion. *Perception*, *9*(3), 317-325.
- Ball, W., Ballot, R., & Dibble, A. (1983). Stimulus dimensionality and infants' perceived movement in depth. *J Genet Psychol*, *143*(2d Half), 193-200.
- Ball, W., & Tronick, E. (1971). Infant responses to impending collision: optical and real. *Science*, *171*(973), 818-820.
- Banks, M. S., & Salapatek, P. (1981). Infant pattern vision: a new approach based on the contrast sensitivity function. *J Exp Child Psychol*, *31*(1), 1-45.
- Banton, T., & Bertenthal, B. I. (1996). Infants' sensitivity to uniform motion. *Vision Res*, *36*(11), 1633-1640.
- Banton, T., & Bertenthal, B. I. (1997). Multiple developmental pathways for motion processing. *Optom Vis Sci*, *74*(9), 751-760.
- Banton, T., Bertenthal, B. I., & Seaks, J. (1999). Infants' sensitivity to statistical distributions of motion direction and speed. *Vision Res*, *39*(20), 3417-3430.

- Banton, T., Dobkins, K., & Bertenthal, B. I. (2001). Infant direction discrimination thresholds. *Vision Res*, *41*(8), 1049-1056.
- Barbu-Roth, M., Trujillo, M., Desprès, A., Anderson, D. I., Provasi, J., Vaivre-Douret, L., et al. (2005, June). *The coupling between optical flow and neonatal stepping*. Paper presented at the International society for gait and posture research.
- Bazarian, J. J., McClung, J., Shah, M. N., Cheng, Y. T., Flesher, W., & Kraus, J. (2005). Mild traumatic brain injury in the United States, 1998--2000. *Brain Inj*, *19*(2), 85-91.
- Beardsley, S. A., & Vaina, L. M. (2005). Psychophysical evidence for a radial motion bias in complex motion discrimination. *Vision Res*, *45*(12), 1569-1586.
- Belanger, H. G., & Vanderploeg, R. D. (2005). The neuropsychological impact of sports-related concussion: a meta-analysis. *J Int Neuropsychol Soc*, *11*(4), 345-357.
- Bergsneider, M., Hovda, D. A., Lee, S. M., Kelly, D. F., McArthur, D. L., Vespa, P. M., et al. (2000). Dissociation of cerebral glucose metabolism and level of consciousness during the period of metabolic depression following human traumatic brain injury. *J Neurotrauma*, *17*(5), 389-401.
- Bertenthal, B. I., & Bai, D. L. (1989). Infants Sensitivity to Optical-Flow for Controlling Posture. *Developmental Psychology*, *25*(6), 936-945.
- Bertenthal, B. I., & Bradbury, A. (1992). Infant's detection of shearing motion in random-dot displays. *Dev Psychol*, *28*, 1056-1066.
- Bertenthal, B. I., Rose, J. L., & Bai, D. L. (1997). Perception-action coupling in the development of visual control of posture. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *23*(6), 1631-1643.
- Berthoz, A., Pavard, B., & Young, L. R. (1975). Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Exp Brain Res*, *23*(5), 471-489.
- Bertone, A., & Faubert, J. (2005). Demonstrations of Decreased Sensitivity to Complex Motion Information Not Enough to Propose an Autism-Specific Neural Etiology. *J Autism Dev Disord*, 1-10.
- Bertone, A., Mottron, L., Jelenic, P., & Faubert, J. (2003). Motion perception in autism: a "complex" issue. *J Cogn Neurosci*, *15*(2), 218-225.
- Bertone, A., Mottron, L., Jelenic, P., & Faubert, J. (2005). Enhanced and diminished visuo-spatial information processing in autism depends on stimulus complexity. *Brain*, *128*(Pt 10), 2430-2441.
- Beverly, K. I., & Regan, D. (1979). Separable aftereffects of changing-size and motion-in-depth: different neural mechanisms? *Vision Res*, *19*(6), 727-732.
- Bex, P. J., & Baker, C. L., Jr. (1997). The effects of distractor elements on direction discrimination in random Gabor kinematograms. *Vision Res*, *37*(13), 1761-1767.
- Bex, P. J., & Makous, W. (1997). Radial motion looks faster. *Vision Res*, *37*(23), 3399-3405.
- Bijur, P. E., Haslum, M., & Golding, J. (1990). Cognitive and behavioral sequelae of mild head injury in children. *Pediatrics*, *86*(3), 337-344.
- Binder, L. M., Rohling, M. L., & Larrabee, G. J. (1997). A review of mild head trauma. Part I: Meta-analytic review of neuropsychological studies. *J Clin Exp Neuropsychol*, *19*(3), 421-431.

- Birch, E., & Petrig, B. (1996). FPL and VEP measures of fusion, stereopsis and stereoacuity in normal infants. *Vision Res*, 36(9), 1321-1327.
- Birch, E., & Salomao, S. (1998). Infant random dot stereoacuity cards. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 35(2), 86-90.
- Blakemore, C., & Vital-Durand, F. (1979). Development of the neural basis of visual acuity in monkeys: speculation on the origin of deprivation amblyopia. *Trans Ophthalmol Soc UK*, 99(3), 363-368.
- Blumbergs, P. C., Scott, G., Manavis, J., Wainwright, H., Simpson, D. A., & McLean, A. J. (1994). Staining of amyloid precursor protein to study axonal damage in mild head injury. *Lancet*, 344(8929), 1055-1056.
- Bohnen, N. I., Jölles, J., & Twijnstra, A. (1992). Neuropsychological deficits in patients with persistent symptoms six months after mild head injury. *Neurosurgery*, 30(5), 692-695; discussion 695-696.
- Bohnen, N. I., Jolles, J., Twijnstra, A., Mellink, R., & Wijnen, G. (1995). Late neurobehavioural symptoms after mild head injury. *Brain Inj*, 9(1), 27-33.
- Bosworth, C. F., Sample, P. A., & Weinreb, R. N. (1997). Perimetric motion thresholds are elevated in glaucoma suspects and glaucoma patients. *Vision Res*, 37(14), 1989-1997.
- Bourne, J. A., & Rosa, M. G. P. (2006). Hierarchical Development of the Primate Visual Cortex, as Revealed by Neurofilament Immunoreactivity: Early Maturation of the Middle Temporal Area (MT). *Cereb. Cortex*, 16(3), 405-414.
- Boussaoud, D., Ungerleider, L. G., & Desimone, R. (1990). Pathways for motion analysis: cortical connections of the medial superior temporal and fundus of the superior temporal visual areas in the macaque. *J Comp Neurol*, 296(3), 462-495.
- Braddick, O. (1980). Low-level and high-level processes in apparent motion. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 290(1038), 137-151.
- Braddick, O. (1993a). Orientation- and motion- selective mechanisms in infants. In K. Simons (Ed.), *Early visual development, normal and abnormal*. New-York: Oxford University Press.
- Braddick, O. (1993b). Orientation- and motion-selective mechanisms in infants. . In K. Simons (Ed.), *Early visual development: normal and abnormal*. (pp. 163-177). New York: Oxford University Press.
- Braddick, O. (1996). Where is the naso-temporal asymmetry? Motion processing. *Curr Biol*, 6(3), 250-253.
- Braddick, O., Atkinson, J., & Wattam-Bell, J. (2003). Normal and anomalous development of visual motion processing: motion coherence and 'dorsal-stream vulnerability'. *Neuropsychologia*, 41(13), 1769-1784.
- Braddick, O., O'Brien, J. M., Wattam-Bell, J., Atkinson, J., Hartley, T., & Turner, R. (2001). Brain areas sensitive to coherent visual motion. *Perception*, 30(1), 61-72.
- Bremmer, F., Duhamel, J. R., Ben Hamed, S., & Graf, W. (2000). Stages of self-motion processing in primate posterior parietal cortex. *Int Rev Neurobiol*, 44, 173-198.
- Bremmer, F., Kubischik, M., Pekel, M., Lappe, M., & Hoffmann, K. P. (1999). Linear vestibular self-motion signals in monkey medial superior temporal area. *Ann NY Acad Sci*, 871, 272-281.
- Brenner, E., & Rauschecker, J. P. (1990). Centrifugal motion bias in the cat's lateral suprasylvian visual cortex is independent of early flow field exposure. *J Physiol*, 423, 641-660.

- Britten, K. H., Shadlen, M. N., Newsome, W. T., & Movshon, J. A. (1992). The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance. *J Neurosci*, *12*(12), 4745-4765.
- Britten, K. H., & van Wezel, R. J. (1998). Electrical microstimulation of cortical area MST biases heading perception in monkeys. *Nat Neurosci*, *1*(1), 59-63.
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Exp Brain Res*, *63*(3), 655-658.
- Brosseau-Lachaine, O., Faubert, J., & Casanova, C. (2001). Functional sub-regions for optic flow processing in the posteromedial lateral suprasylvian cortex of the cat. *Cereb Cortex*, *11*(10), 989-1001.
- Brown, A. M. (1997). Vernier acuity in human infants: rapid emergence shown in a longitudinal study. *Optom Vis Sci*, *74*(9), 732-740.
- Burr, D. C., Badcock, D. R., & Ross, J. (2001). Cardinal axes for radial and circular motion, revealed by summation and by masking. *Vision Res*, *41*(4), 473-481.
- Burr, D. C., Morrone, M. C., & Vaina, L. M. (1998). Large receptive fields for optic flow detection in humans. *Vision Res*, *38*(12), 1731-1743.
- Campos, J. J., Anderson, D. I., Barbu-Roth, M., Hubbard, W. M., Hertenstein, M. J., & Witherington, D. C. (2000). Travel broadens the mind. *Infancy*, *1*, 149-219.
- Carroll, L. J., Cassidy, J. D., Holm, L., Kraus, J., & Coronado, V. G. (2004). Methodological issues and research recommendations for mild traumatic brain injury: the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *J Rehabil Med*(43 Suppl), 113-125.
- Carroll, L. J., Cassidy, J. D., Peloso, P. M., Borg, J., von Holst, H., Holm, L., et al. (2004). Prognosis for mild traumatic brain injury: results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *J Rehabil Med*(43 Suppl), 84-105.
- Cassidy, J. D., Carroll, L. J., Peloso, P. M., Borg, J., von Holst, H., Holm, L., et al. (2004). Incidence, risk factors and prevention of mild traumatic brain injury: results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *J Rehabil Med*(43 Suppl), 28-60.
- Cavanagh, P., & Mather, G. (1989). Motion: the long and short of it. *Spat Vis*, *4*(2-3), 103-129.
- Chan, R. C. (2002). Attentional deficits in patients with persisting postconcussive complaints: a general deficit or specific component deficit? *J Clin Exp Neuropsychol*, *24*(8), 1081-1093.
- Chen, Y., Nakayama, K., Levy, D., Matthyse, S., & Holzman, P. (2003). Processing of global, but not local, motion direction is deficient in schizophrenia. *Schizophr Res*, *61*(2-3), 215-227.
- Chubb, C., & Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *J Opt Soc Am A*, *5*(11), 1986-2007.
- Clifford, C. W., Beardsley, S. A., & Vaina, L. M. (1999). The perception and discrimination of speed in complex motion. *Vision Res*, *39*(13), 2213-2227.
- Clifford, C. W., & Vaina, L. M. (1999). A computational model of selective deficits in first and second-order motion processing. *Vision Res*, *39*(1), 113-130.
- Collins, M. W., Iverson, G. L., Lovell, M. R., McKeag, D. B., Norwig, J., & Maroon, J. (2003). On-field predictors of neuropsychological and symptom deficit following sports-related concussion. *Clin J Sport Med*, *13*(4), 222-229.

- Conel, J. L. R. (1947). *The postnatal development of the human cerebral cortex*. Cambridge: Harvard University Press.
- Cornelissen, P., Richardson, A., Mason, A., Fowler, S., & Stein, J. (1995). Contrast sensitivity and coherent motion detection measured at photopic luminance levels in dyslexics and controls. *Vision Res*, 35(10), 1483-1494.
- Cornish, K. M., Munir, F., & Cross, G. (1999). Spatial cognition in males with Fragile-X syndrome: evidence for a neuropsychological phenotype. *Cortex*, 35(2), 263-271.
- Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1993). Perceiving heading with different retinal regions and types of optic flow. *Percept Psychophys*, 53(3), 325-337.
- Curran, W., Braddick, O. J., Atkinson, J., Wattam-Bell, J., & Andrew, R. (1999). Development of illusory-contour perception in infants. *Perception*, 28(4), 527-538.
- Cynader, M., Berman, N., & Hein, A. (1973). Cats reared in stroboscopic illumination: effects on receptive fields in visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 70(5), 1353-1354.
- Cynader, M., Berman, N., & Hein, A. (1975). Cats raised in a one-directional world: effects on receptive fields in visual cortex and superior colliculus. *Exp Brain Res*, 22(3), 267-280.
- Cynader, M., & Chernenko, G. (1976). Abolition of direction selectivity in the visual cortex of the cat. *Science*, 193(4252), 504-505.
- Dannemiller, J. L., & Freedland, R. L. (1991). Detection of relative motion by human infants. *Dev Psychol*, 27, 67-78.
- Delorme, A., Frigon, J. Y., & Lagace, C. (1989). Infants' reactions to visual movement of the environment. *Perception*, 18(5), 667-673.
- Derrington, A. M., & Badcock, D. R. (1985). Separate detectors for simple and complex grating patterns? *Vision Res*, 25(12), 1869-1878.
- Derrington, A. M., Badcock, D. R., & Henning, G. B. (1993). Discriminating the direction of second-order motion at short stimulus durations. *Vision Res*, 33(13), 1785-1794.
- Derrington, A. M., & Cox, M. (1998). Temporal resolution of dichoptic and second-order motion mechanisms. *Vision Res*, 38(22), 3531-3539.
- Derrington, A. M., & Henning, G. B. (1993). Detecting and discriminating the direction of motion of luminance and colour gratings. *Vision Res*, 33(5-6), 799-811.
- Derrington, A. M., & Ukkonen, O. I. (1999). Second-order motion discrimination by feature-tracking. *Vision Res*, 39(8), 1465-1475.
- Dichgans, J., Mauritz, K. H., Allum, J. H., & Brandt, T. (1976). Postural sway in normals and atactic patients: analysis of the stabilising and destabilizing effects of vision. *Agressologie*, 17(C Spec No), 15-24.
- Dijkstra, T. M., Schonker, G., & Gielen, C. C. (1994). Temporal stability of the action-perception cycle for postural control in a moving visual environment. *Exp Brain Res*, 97(3), 477-486.
- Dikmen, S., McLean, A., & Temkin, N. (1986). Neuropsychological and psychosocial consequences of minor head injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 49(11), 1227-1232.
- Dobkins, K. R., Fine, I., Hsueh, A. C., & Vitten, C. (2004). Pattern motion integration in infants. *J Vis*, 4(3), 144-155.



- Dobkins, K. R., & Teller, D. Y. (1996). Infant contrast detectors are selective for direction of motion. *Vision Res*, 36(2), 281-294.
- Dow, B. M. (1974). Functional classes of cells and their laminar distribution in monkey visual cortex. *J Neurophysiol*, 37(5), 927-946.
- Duffy, C. J. (1998). MST neurons respond to optic flow and translational movement. *J Neurophysiol*, 80(4), 1816-1827.
- Duffy, C. J. (2000). Optic flow analysis for self-movement perception. *Int Rev Neurobiol*, 44, 199-218.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1991a). Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. I. A continuum of response selectivity to large-field stimuli. *J Neurophysiol*, 65(6), 1329-1345.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1991b). Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. II. Mechanisms of response selectivity revealed by small-field stimuli. *J Neurophysiol*, 65(6), 1346-1359.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1995). Response of monkey MST neurons to optic flow stimuli with shifted centers of motion. *J Neurosci*, 15(7 Pt 2), 5192-5208.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1997). Medial superior temporal area neurons respond to speed patterns in optic flow. *J Neurosci*, 17(8), 2839-2851.
- Dukelow, S. P., DeSouza, J. F., Culham, J. C., van den Berg, A. V., Menon, R. S., & Vilis, T. (2001). Distinguishing subregions of the human MT+ complex using visual fields and pursuit eye movements. *J Neurophysiol*, 86(4), 1991-2000.
- Dumoulin, S. O., Baker, C. L., Jr., & Hess, R. F. (2001). Centrifugal bias for second-order but not first-order motion. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 18(9), 2179-2189.
- Dumoulin, S. O., Baker, C. L., Jr., Hess, R. F., & Evans, A. C. (2003). Cortical specialization for processing first- and second-order motion. *Cereb Cortex*, 13(12), 1375-1385.
- Dupont, P., Sary, G., Peuskens, H., & Orban, G. A. (2003). Cerebral regions processing first- and higher-order motion in an opposed-direction discrimination task. *Eur J Neurosci*, 17(7), 1509-1517.
- Edwards, M., & Badcock, D. R. (1993). Asymmetries in the sensitivity to motion in depth: a centripetal bias. *Perception*, 22(9), 1013-1023.
- Elleberg, D., Lewis, T. L., Meghji, K. S., Maurer, D., Guillemot, J. P., & Lepore, F. (2003). Comparison of sensitivity to first- and second-order local motion in 5-year-olds and adults. *Spat Vis*, 16(5), 419-428.
- Farmer, M. Y., Singer, H. S., Mellits, E. D., Hall, D., & Charney, E. (1987). Neurobehavioral sequelae of minor head injuries in children. *Pediatr Neurosci*, 13(6), 304-308.
- Felleman, D. J., & Van Essen, D. C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cereb Cortex*, 1(1), 1-47.
- Field, M., Collins, M. W., Lovell, M. R., & Maroon, J. (2003). Does age play a role in recovery from sports-related concussion? A comparison of high school and collegiate athletes. *J Pediatr*, 142(5), 546-553.
- Foster, E. C., Sveistrup, H., & Woollacott, M. H. (1996). Transitions in Visual Proprioception: A Cross-Sectional Developmental Study of the Effect of Visual Flow on Postural Control. *J Mot Behav*, 28(2), 101-112.

- Freeman, T. C., & Harris, M. G. (1992). Human sensitivity to expanding and rotating motion: effects of complementary masking and directional structure. *Vision Res*, 32(1), 81-87.
- Frencham, K. A., Fox, A. M., & Maybery, M. T. (2005). Neuropsychological studies of mild traumatic brain injury: a meta-analytic review of research since 1995. *J Clin Exp Neuropsychol*, 27(3), 334-351.
- Gaetz, M. (2004). The neurophysiology of brain injury. *Clin Neurophysiol*, 115(1), 4-18.
- Gagnon, I., Swaine, B., Friedman, D., & Forget, R. (2004a). Children show decreased dynamic balance after mild traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 85(3), 444-452.
- Gagnon, I., Swaine, B., Friedman, D., & Forget, R. (2004b). Visuomotor response time in children with a mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 19(5), 391-404.
- Gagnon, I., Swaine, B., Friedman, D., & Forget, R. (2005). Exploring children's self-efficacy related to physical activity performance after a mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 20(5), 436-449.
- Garnett, M. R., Blamire, A. M., Rajagopalan, B., Styles, P., & Cadoux-Hudson, T. A. (2000). Evidence for cellular damage in normal-appearing white matter correlates with injury severity in patients following traumatic brain injury: A magnetic resonance spectroscopy study. *Brain*, 123 (Pt 7), 1403-1409.
- Geesaman, B. J., & Andersen, R. A. (1996). The analysis of complex motion patterns by form/cue invariant MSTd neurons. *J Neurosci*, 16(15), 4716-4732.
- Geesaman, B. J., & Qian, N. (1996). A novel speed illusion involving expansion and rotation patterns. *Vision Res*, 36(20), 3281-3292.
- Geesaman, B. J., & Qian, N. (1998). The effect of complex motion pattern on speed perception. *Vision Res*, 38(9), 1223-1231.
- Gegenfurtner, K. R., Kiper, D. C., & Levitt, J. B. (1997). Functional properties of neurons in macaque area V3. *J Neurophysiol*, 77(4), 1906-1923.
- Gentry, L. R., Godersky, J. C., Thompson, B., & Dunn, V. D. (1988). Prospective comparative study of intermediate-field MR and CT in the evaluation of closed head trauma. *AJR Am J Roentgenol*, 150(3), 673-682.
- Gepner, B., Mestre, D., Masson, G., & de Schonen, S. (1995). Postural effects of motion vision in young autistic children. *Neuroreport*, 6(8), 1211-1214.
- Giaschi, D. E., Trope, G. E., Kothe, A. C., & Hong, X. H. (1996). Loss of sensitivity to motion-defined form in patients with primary open-angle glaucoma and ocular hypertension. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 13(4), 707-715.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. London Erlbaum.
- Gibson, J. J., Olum, P., & Rosenblatt, F. (1955). Parallax and perspective during aircraft landings. *Am J Psychol*, 68(3), 372-385.
- Gilmore, G. C., Wenk, H. E., Naylor, L. A., & Koss, E. (1994). Motion perception and Alzheimer's disease. *J Gerontol*, 49(2), P52-57.

- Gilmore, R. O., Baker, T. J., & Grobman, K. H. (2004). Stability in young infants' discrimination of optic flow. *Dev Psychol*, 40(2), 259-270.
- Giza, C. C., & Hovda, D. A. (2001). The Neurometabolic Cascade of Concussion. *J Athl Train*, 36(3), 228-235.
- Glovinsky, Y., Quigley, H. A., & Dunkelberger, G. R. (1991). Retinal ganglion cell loss is size dependent in experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 32(3), 484-491.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci*, 15(1), 20-25.
- Gordon, K. E. (2006). Pediatric minor traumatic brain injury. *Semin Pediatr Neurol*, 13(4), 243-255.
- Gordon, K. E., Dooley, J. M., & Wood, E. P. (2006). Descriptive Epidemiology of Concussion. *Pediatric Neurology*, 34(5), 376-378.
- Gosselin, N., Theriault, M., Leclerc, S., Montplaisir, J., & Lassonde, M. (2006). Neurophysiological anomalies in symptomatic and asymptomatic concussed athletes. *Neurosurgery*, 58(6), 1151-1161; discussion 1151-1161.
- Graziano, M. S., Andersen, R. A., & Snowden, R. J. (1994). Tuning of MST neurons to spiral motions. *J Neurosci*, 14(1), 54-67.
- Greenlee, M. W., & Smith, A. T. (1997). Detection and discrimination of first- and second-order motion in patients with unilateral brain damage. *J Neurosci*, 17(2), 804-818.
- Gronqvist, H., Gredeback, G., & Hofsten, C. (2006). Developmental asymmetries between horizontal and vertical tracking. *Vision Res*, 46(11), 1754-1761.
- Grosop, D. H., Shapley, R. M., & Hawken, M. J. (1993). Macaque V1 neurons can signal 'illusory' contours. *Nature*, 365(6446), 550-552.
- Grun, G. (1982). The development of the vertebrate retina: a comparative survey. *Adv Anat Embryol Cell Biol*, 78, 1-85.
- Gunn, A., Cory, E., Atkinson, J., Braddick, O., Wattam-Bell, J., Guzzetta, A., et al. (2002). Dorsal and ventral stream sensitivity in normal development and hemiplegia. *Neuroreport*, 13(6), 843-847.
- Gurnsey, R., Fleet, D., & Potchin, C. (1998). Second-order motions contribute to vection. *Vision Res*, 38(18), 2801-2816.
- Guskiewicz, K. M., McCrea, M., Marshall, S. W., Cantu, R. C., Randolph, C., Barr, W., et al. (2003). Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players: the NCAA Concussion Study. *Jama*, 290(19), 2549-2555.
- Guskiewicz, K. M., Weaver, N. L., Padua, D. A., & Garrett, W. E., Jr. (2000). Epidemiology of concussion in collegiate and high school football players. *Am J Sports Med*, 28(5), 643-650.
- Habak, C., Casanova, C., & Faubert, J. (2002). Central and peripheral interactions in the perception of optic flow. *Vision Res*, 42(26), 2843-2852.
- Habak, C., & Faubert, J. (2000). Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res*, 40(8), 943-950.
- Halterman, C. I., Langan, J., Drew, A., Rodriguez, E., Osternig, L. R., Chou, L. S., et al. (2006). Tracking the recovery of visuospatial attention deficits in mild traumatic brain injury. *Brain*, 129(Pt 3), 747-753.

- Harris, L. R., & Smith, A. T. (1992). Motion defined exclusively by second-order characteristics does not evoke optokinetic nystagmus. *Vis Neurosci*, *9*(6), 565-570.
- He, H. Y., Ray, B., Dennis, K., & Quinlan, E. M. (2007). Experience-dependent recovery of vision following chronic deprivation amblyopia. *Nat Neurosci*.
- Held, R., Birch, E., & Gwiazda, J. (1980). Stereoacuity of human infants. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *77*(9), 5572-5574.
- Hendrickson, A., & Drucker, D. (1992). The development of parafoveal and mid-peripheral human retina. *Behav Brain Res*, *49*(1), 21-31.
- Higgins, C. I., Campos, J. J., & Kermoian, R. (1996). Effect of self-produced locomotion on infant postural compensation to optic flow. *Developmental Psychology*, *32*(5), 836-841.
- Hoffmann, K. P. (1987). The influence of visual experience on the ontogeny of the optokinetic reflex in mammals. In E. L. Keller, Zee, D. J. (Ed.), *Adaptive processes in visual and oculomotor systems*. Oxford: Pergamon.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *J Physiol*, *160*, 106-154.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *J Physiol*, *195*(1), 215-243.
- Hutchinson, C. V., & Ledgeway, T. (2006). Sensitivity to spatial and temporal modulations of first-order and second-order motion. *Vision Res*, *46*(3), 324-335.
- Huttenlocher, P. R., de Courten, C., Garey, L. J., & Van der Loos, H. (1982). Synaptogenesis in human visual cortex--evidence for synapse elimination during normal development. *Neurosci Lett*, *33*(3), 247-252.
- Iverson, G. L., Gaetz, M., Lovell, M. R., & Collins, M. W. (2004). Cumulative effects of concussion in amateur athletes. *Brain Inj*, *18*(5), 433-443.
- Jaffe, K. M., Polissar, N. L., Fay, G. C., & Liao, S. (1995). Recovery trends over three years following pediatric traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil*, *76*(1), 17-26.
- Jantzen, K. J., Anderson, B., Steinberg, F. L., & Kelso, J. A. (2004). A prospective functional MR imaging study of mild traumatic brain injury in college football players. *AJNR Am J Neuroradiol*, *25*(5), 738-745.
- Johnson, M. H. (1990). Cortical maturation and the development of visual attention in early infancy. *J Cognitive Neurosci*, *2*, 81-95.
- Johnson, S. P., & Aslin, R. N. (1998). Young infants' perception of illusory contours in dynamic displays. *Perception*, *27*(3), 341-353.
- Jouen, F., & Lepecq, J. C. (1989). La sensibilité au flux optique chez le nouveau-né. *Psychologie Française*, *34*, 13-18.
- Kant, R., Smith-Seemiller, L., Isaac, G., & Duffy, J. (1997). Tc-HMPAO SPECT in persistent post-concussion syndrome after mild head injury: comparison with MRI/CT. *Brain Inj*, *11*(2), 115-124.
- Karwatsky, P., Bertone, A., Overbury, O., & Faubert, J. (2006). Defining the nature of motion perception deficits in glaucoma using simple and complex motion stimuli. *Optom Vis Sci*, *83*(7), 466-472.
- Kavcic, V., Fernandez, R., Logan, D., & Duffy, C. J. (2006). Neurophysiological and perceptual correlates of navigational impairment in Alzheimer's disease. *Brain*, *129*(Pt 3), 736-746.

- Kim, J., & Turano, K. A. (1999). Optimal spatial frequencies for discrimination of motion direction in optic flow patterns. *Vision Res*, 39(19), 3175-3185.
- Kim, J. N., Mulligan, K., & Sherk, H. (1997). Simulated optic flow and extrastriate cortex. I. Optic flow versus texture. *J Neurophysiol*, 77(2), 554-561.
- King, N. S., Crawford, S., Wenden, F. J., Moss, N. E., & Wade, D. T. (1995). The Rivermead Post Concussion Symptoms Questionnaire: a measure of symptoms commonly experienced after head injury and its reliability. *J Neurol*, 242(9), 587-592.
- King, S. M., Dykeman, C., Redgrave, P., & Dean, P. (1992). Use of a distracting task to obtain defensive head movements to looming visual stimuli by human adults in a laboratory setting. *Perception*, 21(2), 245-259.
- Kino-Québec. Comité scientifique, & Thibault, G. (2000). *L'activité physique, déterminant de la santé des jeunes : avis*. Québec: Kino-Québec.
- Kiorpes, L., & Movshon, J. A. (2004). Development of sensitivity to visual motion in macaque monkeys. *Vis Neurosci*, 21(6), 851-859.
- Koenderink, J. J. (1986). Optic flow. *Vision Res*, 26(1), 161-179.
- Kogan, C. S., Bertone, A., Cornish, K., Boutet, I., Der Kaloustian, V. M., Andermann, E., et al. (2004). Integrative cortical dysfunction and pervasive motion perception deficit in fragile X syndrome. *Neurology*, 63(9), 1634-1639.
- Kogan, C. S., Boutet, I., Cornish, K., Zangenehpour, S., Mullen, K. T., Holden, J. J., et al. (2004). Differential impact of the FMR1 gene on visual processing in fragile X syndrome. *Brain*, 127(Pt 3), 591-601.
- Kraus, J. F. (1995). Epidemiological features of brain injury in children: Occurrence, children at risk, causes and manner of injury, severity and outcomes. In S. H. Broman & M. E. Mischel (Eds.), *Traumatic Head Injury in Children*. New York: Oxford University Press.
- Kremenitzer, J. P., Vaughan, H. G., Jr., Kurtzberg, D., & Dowling, K. (1979). Smooth-pursuit eye movements in the newborn infant. *Child Dev*, 50(2), 442-448.
- Lachapelle, J., Ouimet, C., Bach, M., Ptito, A., & McKerral, M. (2004). Texture segregation in traumatic brain injury--a VEP study. *Vision Res*, 44(24), 2835-2842.
- Lagae, L., Maes, H., Raiguel, S., Xiao, D. K., & Orban, G. A. (1994). Responses of macaque STS neurons to optic flow components: a comparison of areas MT and MST. *J Neurophysiol*, 71(5), 1597-1626.
- Landis, C. (1954). Determinants of the critical flicker-fusion threshold. *Physiol Rev*, 34(2), 259-286.
- Landre, N., Poppe, C. J., Davis, N., Schmaus, B., & Hobbs, S. E. (2006). Cognitive functioning and postconcussive symptoms in trauma patients with and without mild TBI. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(4), 255-273.
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. V. (1999). Perception of self-motion from visual flow. *Trends Cogn Sci*, 3(9), 329-336.
- Leat, S. J., Pierre, J. S., Hassan-Abadi, S., & Faubert, J. (2001). The moving Dynamic Random Dot Stereotest: development, age norms, and comparison with the Frisby, Randot, and Stereo Smile tests. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 38(5), 284-294.
- Ledgeway, T. (1994). Adaptation to second-order motion results in a motion aftereffect for directionally-ambiguous test stimuli. *Vision Res*, 34(21), 2879-2889.

- Ledgeway, T. (1999). Discrimination of the speed and direction of global second-order motion in stochastic displays. *Vision Res*, 39(22), 3710-3720.
- Ledgeway, T., & Smith, A. T. (1994a). Evidence for separate motion-detecting mechanisms for first- and second-order motion in human vision. *Vision Res*, 34(20), 2727-2740.
- Ledgeway, T., & Smith, A. T. (1994b). The duration of the motion aftereffect following adaptation to first-order and second-order motion. *Perception*, 23(10), 1211-1219.
- Lee, D. N. (1980). The optic flow field: the foundation of vision. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 290(1038), 169-179.
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Percept Psychophys*, 15, 529-532.
- Lejeune, L., Anderson, D. I., Campos, J. J., Witherington, D. C., Uchiyama, I., & Barbu-Roth, M. (2006). Responsiveness to terrestrial optic flow in infancy: does locomotor experience play a role? *Hum Mov Sci*, 25(1), 4-17.
- Levi, D. M., Klein, S. A., & Aitsebaomo, A. P. (1985). Vernier acuity, crowding and cortical magnification. *Vision Res*, 25(7), 963-977.
- Levin, H. S., Amparo, E., Eisenberg, H. M., Williams, D. H., High, W. M., Jr., McArdle, C. B., et al. (1987). Magnetic resonance imaging and computerized tomography in relation to the neurobehavioral sequelae of mild and moderate head injuries. *J Neurosurg*, 66(5), 706-713.
- Levin, H. S., Mattis, S., Ruff, R. M., Eisenberg, H. M., Marshall, L. F., Tabaddor, K., et al. (1987). Neurobehavioral outcome following minor head injury: a three-center study. *J Neurosurg*, 66(2), 234-243.
- Levin, H. S., Williams, D. H., Eisenberg, H. M., High, W. M., Jr., & Guinto, F. C., Jr. (1992). Serial MRI and neurobehavioural findings after mild to moderate closed head injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 55(4), 255-262.
- Lewis, C. F., & McBeath, M. K. (2004). Bias to experience approaching motion in a three-dimensional virtual environment. *Perception*, 33(3), 259-276.
- Lu, Z. L., & Sperling, G. (1996). Contrast gain control in first- and second-order motion perception. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 13(12), 2305-2318.
- Lu, Z. L., & Sperling, G. (2001). Three-systems theory of human visual motion perception: review and update. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 18(9), 2331-2370.
- MacKay, T. L., Jakobson, L. S., Ellemberg, D., Lewis, T. L., Maurer, D., & Casiro, O. (2005). Deficits in the processing of local and global motion in very low birthweight children. *Neuropsychologia*, 43(12), 1738-1748.
- Mapstone, M., Steffenella, T. M., & Duffy, C. J. (2003). A visuospatial variant of mild cognitive impairment: getting lost between aging and AD. *Neurology*, 60(5), 802-808.
- Mareschal, I., & Baker, C. L., Jr. (1998a). Temporal and spatial response to second-order stimuli in cat area 18. *J Neurophysiol*, 80(6), 2811-2823.
- Mareschal, I., & Baker, C. L., Jr. (1998b). A cortical locus for the processing of contrast-defined contours. *Nat Neurosci*, 1(2), 150-154.
- Mareschal, I., & Baker, C. L., Jr. (1999). Cortical processing of second-order motion. *Vis Neurosci*, 16(3), 527-540.

- Mason, A. J., Braddick, O. J., & Wattam-Bell, J. (2003). Motion coherence thresholds in infants--different tasks identify at least two distinct motion systems. *Vision Res*, 43(10), 1149-1157.
- Mather, G. (1991). First-order and second-order visual processes in the perception of motion and tilt. *Vision Res*, 31(1), 161-167.
- Mather, G., & West, S. (1993). Evidence for second-order motion detectors. *Vision Res*, 33(8), 1109-1112.
- Maunsell, J. H., & Newsome, W. T. (1987). Visual processing in monkey extrastriate cortex. *Annu Rev Neurosci*, 10, 363-401.
- Maunsell, J. H., & Van Essen, D. C. (1983a). Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. I. Selectivity for stimulus direction, speed, and orientation. *J Neurophysiol*, 49(5), 1127-1147.
- McDonald, M. A., Dobson, V., Sebris, S. L., Baitch, L., Varner, D., & Teller, D. Y. (1985). The acuity card procedure: a rapid test of infant acuity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 26(8), 1158-1162.
- McGraw, P. V., Levi, D. M., & Whitaker, D. (1999). Spatial characteristics of the second-order visual pathway revealed by positional adaptation. *Nat Neurosci*, 2(5), 479-484.
- McKendrick, A. M., & Badcock, D. R. (2004). Motion processing deficits in migraine. *Cephalalgia*, 24(5), 363-372.
- Medecine., M. T. B. I. C. o. t. H. I. I. S. I. G. A. C. o. R. (1993). Definition of mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 8, 86-87.
- Meese, T. S., & Anderson, S. J. (2002). Spiral mechanisms are required to account for summation of complex motion components. *Vision Res*, 42(9), 1073-1080.
- Milne, E., Swettenham, J., Hansen, P., Campbell, R., Jeffries, H., & Plaisted, K. (2002). High motion coherence thresholds in children with autism. *J Child Psychol Psychiatry*, 43(2), 255-263.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford: Oxford University Press.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: Two critical pathways. *Trends in Neuroscience*, 6, 414-417.
- Mittenberg, W., & Strauman, S. (2000). Diagnosis of mild head injury and the postconcussion syndrome. *J Head Trauma Rehabil*, 15(2), 783-791.
- Mittl, R. L., Grossman, R. I., Hiehle, J. F., Hurst, R. W., Kauder, D. R., Gennarelli, T. A., et al. (1994). Prevalence of MR evidence of diffuse axonal injury in patients with mild head injury and normal head CT findings. *AJNR Am J Neuroradiol*, 15(8), 1583-1589.
- Morrone, M. C., Atkinson, J., Cioni, G., Braddick, O. J., & Fiorentini, A. (1999). Developmental changes in optokinetic mechanisms in the absence of unilateral cortical control. *Neuroreport*, 10(13), 2723-2729.
- Morrone, M. C., Burr, D. C., Di Pietro, S., & Stefanelli, M. A. (1999). Cardinal directions for visual optic flow. *Curr Biol*, 9(14), 763-766.
- Morrone, M. C., Burr, D. C., & Vaina, L. M. (1995). Two stages of visual processing for radial and circular motion. *Nature*, 376(6540), 507-509.
- Morrone, M. C., Tosetti, M., Montanaro, D., Fiorentini, A., Cioni, G., & Burr, D. C. (2000). A cortical area that responds specifically to optic flow, revealed by fMRI. *Nat Neurosci*, 3(12), 1322-1328.

- Movshon, J. A., Thompson, I. D., & Tolhurst, D. J. (1978). Spatial summation in the receptive fields of simple cells in the cat's striate cortex. *J Physiol*, 283, 53-77.
- Murray, C. J., & Lopez, A. D. (1997). Alternative projections of mortality and disability by cause 1990-2020: Global Burden of Disease Study. *Lancet*, 349(9064), 1498-1504.
- Nakayama, K. (1985). Biological image motion processing: a review. *Vision Res*, 25(5), 625-660.
- Nanez, J. E. (1988). Perception of impending collision in 3- to 6-week-old human infants. *Infant Behav & Dev*, 11, 447-463.
- Nanez, J. E., & Yonas, A. (1994). Effects of luminance and texture motion on infant defensive reactions to optical collision. *Infant Behav & Dev*, 17, 165-174.
- Neurology, A. A. o. (1997). Practice Parameter: The management of concussion in sports (summary statement). *Neurology*, 48(3), 581-585.
- Newsome, W. T., Mikami, A., & Wurtz, R. H. (1986). Motion selectivity in macaque visual cortex. III. Psychophysics and physiology of apparent motion. *J Neurophysiol*, 55(6), 1340-1351.
- Newsome, W. T., & Pare, E. B. (1988). A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT). *J Neurosci*, 8(6), 2201-2211.
- Niemann, T., Lappe, M., Buscher, A., & Hoffmann, K. P. (1999). Ocular responses to radial optic flow and single accelerated targets in humans. *Vision Res*, 39(7), 1359-1371.
- Nishida, S., & Ashida, H. (2000). A hierarchical structure of motion system revealed by interocular transfer of flicker motion aftereffects. *Vision Res*, 40(3), 265-278.
- Nishida, S., Ashida, H., & Sato, T. (1994). Complete interocular transfer of motion aftereffect with flickering test. *Vision Res*, 34(20), 2707-2716.
- Nishida, S., Ledgeway, T., & Edwards, M. (1997). Dual multiple-scale processing for motion in the human visual system. *Vision Res*, 37(19), 2685-2698.
- Nishida, S., & Sato, T. (1995). Motion aftereffect with flickering test patterns reveals higher stages of motion processing. *Vision Res*, 35(4), 477-490.
- O'Brien, H. L., Tetewsky, S. J., Avery, L. M., Cushman, L. A., Makous, W., & Duffy, C. J. (2001). Visual mechanisms of spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Cereb Cortex*, 11(11), 1083-1092.
- O'Brien, J., Spencer, J., Atkinson, J., Braddick, O., & Wattam-Bell, J. (2002). Form and motion coherence processing in dyspraxia: evidence of a global spatial processing deficit. *Neuroreport*, 13(11), 1399-1402.
- O'Keefe, L. P., & Movshon, J. A. (1998). Processing of first- and second-order motion signals by neurons in area MT of the macaque monkey. *Vis Neurosci*, 15(2), 305-317.
- Olavarria, J. F., DeYoe, E. A., Knierim, J. J., Fox, J. M., & van Essen, D. C. (1992). Neural responses to visual texture patterns in middle temporal area of the macaque monkey. *J Neurophysiol*, 68(1), 164-181.
- Oppenheimer, D. R. (1968). Microscopic lesions in the brain following head injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 31(4), 299-306.
- Orban, G. A. (1997). Visual processing in macaque area MT/V5 and its satellites (MSTd and MSTv). In R. e. al. (Ed.), *Cerebral Cortex* (Vol. 12). New-York: Plenum Press.



- Orban, G. A., Lagae, L., Verri, A., Raiguel, S., Xiao, D., Maes, H., et al. (1992). First-order analysis of optical flow in monkey brain. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 89(7), 2595-2599.
- Pasternak, T., & Merigan, W. H. (1979). Abnormal visual resolution of cats reared in stroboscopic illumination. *Nature*, 280(5720), 313-314.
- Paulus, W., Straube, A., Krafczyk, S., & Brandt, T. (1989). Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res*, 78(2), 243-252.
- Perrone, J. A. (1986). Anisotropic responses to motion toward and away from the eye. *Percept Psychophys*, 39(1), 1-8.
- Perrone, J. A., & Stone, L. S. (1994). A model of self-motion estimation within primate extrastriate visual cortex. *Vision Res*, 34(21), 2917-2938.
- Perrone, J. A., & Stone, L. S. (1998). Emulating the visual receptive-field properties of MST neurons with a template model of heading estimation. *J Neurosci*, 18(15), 5958-5975.
- Peterhans, E., & von der Heydt, R. (1991). Subjective contours--bridging the gap between psychophysics and physiology. *Trends Neurosci*, 14(3), 112-119.
- Pettus, E. H., Christman, C. W., Giebel, M. L., & Povlishock, J. T. (1994). Traumatically induced altered membrane permeability: its relationship to traumatically induced reactive axonal change. *J Neurotrauma*, 11(5), 507-522.
- Piland, S. G., Motl, R. W., Guskiewicz, K. M., McCrea, M., & Ferrara, M. S. (2006). Structural validity of a self-report concussion-related symptom scale. *Med Sci Sports Exerc*, 38(1), 27-32.
- Plant, G. T., & Nakayama, K. (1993). The characteristics of residual motion perception in the hemifield contralateral to lateral occipital lesions in humans. *Brain*, 116 (Pt 6), 1337-1353.
- Ponsford, J., Willmott, C., Rothwell, A., Cameron, P., Ayton, G., Nelms, R., et al. (1999). Cognitive and behavioral outcome following mild traumatic head injury in children. *J Head Trauma Rehabil*, 14(4), 360-372.
- Ponsford, J., Willmott, C., Rothwell, A., Cameron, P., Kelly, A. M., Nelms, R., et al. (2000). Factors influencing outcome following mild traumatic brain injury in adults. *J Int Neuropsychol Soc*, 6(5), 568-579.
- Potter, D. D., Bassett, M. R., Jory, S. H., & Barrett, K. (2001). Changes in event-related potentials in a three-stimulus auditory oddball task after mild head injury. *Neuropsychologia*, 39(13), 1464-1472.
- Povlishock, J. T. (1993). Pathobiology of traumatically induced axonal injury in animals and man. *Ann Emerg Med*, 22(6), 980-986.
- Povlishock, J. T., & Katz, D. I. (2005). Update of neuropathology and neurological recovery after traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 20(1), 76-94.
- Ptito, M., Kupers, R., Faubert, J., & Gjedde, A. (2001). Cortical representation of inward and outward radial motion in man. *Neuroimage*, 14(6), 1409-1415.
- Quigley, H. A., Dunkelberger, G. R., & Green, W. R. (1988). Chronic human glaucoma causing selectively greater loss of large optic nerve fibers. *Ophthalmology*, 95(3), 357-363.
- Randolph, C. (2001). Implementation of Neuropsychological Testing Models for the High School, Collegiate, and Professional Sport Settings. *J Athl Train*, 36(3), 288-296.

- Rauschecker, J. P., & Schrader, W. (1987). Effects of monocular strobe rearing on kitten striate cortex. *Exp Brain Res*, 68(3), 525-532.
- Rauschecker, J. P., von Grunau, M. W., & Poulin, C. (1987). Centrifugal organization of direction preferences in the cat's lateral suprasylvian visual cortex and its relation to flow field processing. *J Neurosci*, 7(4), 943-958.
- Read, H. L., & Siegel, R. M. (1997). Modulation of responses to optic flow in area 7a by retinotopic and oculomotor cues in monkey. *Cereb Cortex*, 7(7), 647-661.
- Regal, D. M. (1981). Development of Critical flicker frequency in human infants. *Vision Res*, 21(4), 549-555.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1978b). Looming detectors in the human visual pathway. *Vision Res*, 18(4), 415-421.
- Regan, D., Kothe, A. C., & Sharpe, J. A. (1991). Recognition of motion-defined shapes in patients with multiple sclerosis and optic neuritis. *Brain*, 114 ( Pt 3), 1129-1155.
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1999). The two faces of mild head injury. *Arch Clin Neuropsychol*, 14(2), 191-202.
- Rieth, C., & Sireteanu, R. (1994). Texture segmentation and 'pop-out' in infants and children: the effect of test field size. *Spat Vis*, 8(2), 173-191.
- Ring, C., Nayak, U. S., & Isaacs, B. (1988). Balance function in elderly people who have and who have not fallen. *Arch Phys Med Rehabil*, 69(4), 261-264.
- Royden, C. S., Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1994). Estimating heading during eye movements. *Vision Res*, 34(23), 3197-3214.
- Ruff, R. (2005). Two decades of advances in understanding of mild traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 20(1), 5-18.
- Rusoff, A. C., & Dubin, M. W. (1977). Development of receptive-field properties of retinal ganglion cells in kittens. *J Neurophysiol*, 40(5), 1188-1198.
- Saito, H., Yukie, M., Tanaka, K., Hikosaka, K., Fukada, Y., & Iwai, E. (1986). Integration of direction signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey. *J Neurosci*, 6(1), 145-157.
- Sarno, S., Erasmus, L. P., Lippert, G., Frey, M., Lipp, B., & Schlaegel, W. (2000). Electrophysiological correlates of visual impairments after traumatic brain injury. *Vision Res*, 40(21), 3029-3038.
- Satz, P., Zaucha, K., McCleary, C., Light, R., Asarnow, R., & Becker, D. (1997). Mild head injury in children and adolescents: a review of studies (1970-1995). *Psychol Bull*, 122(2), 107-131.
- Schaafsma, S. J., & Duysens, J. (1996). Neurons in the ventral intraparietal area of awake macaque monkey closely resemble neurons in the dorsal part of the medial superior temporal area in their responses to optic flow patterns. *J Neurophysiol*, 76(6), 4056-4068.
- Schmuckler, M. A., Gibson, E. J. (1989). The effect of imposed optical flow on guided locomotion in young walkers. *Br J Dev Psychol*, 7, 193-206.
- Schofield, A. J., & Georgeson, M. A. (1999). Sensitivity to modulations of luminance and contrast in visual white noise: separate mechanisms with similar behaviour. *Vision Res*, 39(16), 2697-2716.
- Schofield, A. J., & Georgeson, M. A. (2000). The temporal properties of first- and second-order vision. *Vision Res*, 40(18), 2475-2487.

- Seiffert, A. E., Somers, D. C., Dale, A. M., & Tootell, R. B. (2003). Functional MRI studies of human visual motion perception: texture, luminance, attention and after-effects. *Cereb Cortex*, *13*(4), 340-349.
- Sekuler, A. B. (1992). Simple-pooling of unidirectional motion predicts speed discrimination for looming stimuli. *Vision Res*, *32*(12), 2277-2288.
- Shabana, N., Cornilleau Peres, V., Carkeet, A., & Chew, P. T. (2003). Motion perception in glaucoma patients: a review. *Surv Ophthalmol*, *48*(1), 92-106.
- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2004a). Asymmetry for the perception of expansion/contraction in infancy. *Infant Behavior & Development*, *27*(3), 315-322.
- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2004b). Sensitivity to linear-speed-gradient of radial expansion flow in infancy. *Vision Res*, *44*(27), 3111-3118.
- Shirai, N., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. (2006). Anisotropic motion coherence sensitivities to expansion/contraction motion in early infancy. *Infant Behav Dev*, *29*(2), 204-209.
- Siegel, R. M., & Read, H. L. (1997). Analysis of optic flow in the monkey parietal area 7a. *Cereb Cortex*, *7*(4), 327-346.
- Sireteanu, R. (1999). Switching on the infant brain. *Science*, *286*(5437), 59, 61.
- Sireteanu, R. (2000). Texture segmentation, pop-out, and feature binding in infants and children. In C. Rovee-Collier, Lipsitt, L. P., et al. (Ed.), *Progress in infancy research* (Vol. 1, pp. 183-249 (314pp)). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- Skoczenski, A. M., & Norcia, A. M. (1999). Development of VEP Vernier acuity and grating acuity in human infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, *40*(10), 2411-2417.
- Skoczenski, A. M., & Norcia, A. M. (2002). Late maturation of visual hyperacuity. *Psychol Sci*, *13*(6), 537-541.
- Slobounov, S., Sebastianelli, W., & Moss, R. (2005). Alteration of posture-related cortical potentials in mild traumatic brain injury. *Neurosci Lett*, *383*(3), 251-255.
- Slobounov, S., Sebastianelli, W., & Simon, R. (2002). Neurophysiological and behavioral concomitants of mild brain injury in collegiate athletes. *Clin Neurophysiol*, *113*(2), 185-193.
- Slobounov, S., Tutwiler, R., Sebastianelli, W., & Slobounov, E. (2006). Alteration of postural responses to visual field motion in mild traumatic brain injury. *Neurosurgery*, *59*(1), 134-139; discussion 134-139.
- Smith, A. T., Greenlee, M. W., Singh, K. D., Kraemer, F. M., & Hennig, J. (1998). The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *J Neurosci*, *18*(10), 3816-3830.
- Smith, A. T., Hess, R. F., & Baker, C. L., Jr. (1994). Direction identification thresholds for second-order motion in central and peripheral vision. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, *11*(2), 506-514.
- Smith, A. T., & Ledgeway, T. (1997). Separate detection of moving luminance and contrast modulations: fact or artifact? *Vision Res*, *37*(1), 45-62.
- Smith, A. T., & Ledgeway, T. (1998). Sensitivity to second-order motion as a function of temporal frequency and eccentricity. *Vision Res*, *38*(3), 403-410.
- Snowden, R. J., & Milne, A. B. (1997). Phantom motion after effects--evidence of detectors for the analysis of optic flow. *Curr Biol*, *7*(10), 717-722.

- Sparto, P. J., Redfern, M. S., Jasko, J. G., Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., & Furman, J. M. (2006). The influence of dynamic visual cues for postural control in children aged 7-12 years. *Exp Brain Res*, 168(4), 505-516.
- Spencer, J., O'Brien, J., Riggs, K., Braddick, O., Atkinson, J., & Wattam-Bell, J. (2000). Motion processing in autism: evidence for a dorsal stream deficiency. *Neuroreport*, 11(12), 2765-2767.
- Spitz, R. V., Stiles, J., & Siegel, R. M. (1993). Infant use of relative motion as information for form: evidence for spatiotemporal integration of complex motion displays. *Percept Psychophys*, 53(2), 190-199.
- Sterr, A., Herron, K., Hayward, C., & Montaldi, D. (2006). Are mild head injuries as mild as we think? Neurobehavioral concomitants of chronic post-concussion syndrome. *BMC Neurol*, 6(1), 7.
- Stewart, D. P., Kaylor, J., & Koutanis, E. (1996). Cognitive deficits in presumed minor head-injured patients. *Acad Emerg Med*, 3(1), 21-26.
- Stoffregen, T. A., Schmuckler, M. A., & Gibson, E. J. (1987). Use of central and peripheral optical flow in stance and locomotion in young walkers. *Perception*, 16(1), 113-119.
- Strich, S. (1961). Shearing of nerve fibres as a cause of brain damage due to head injury. *Lancet*, 2, 443-448.
- Swaine, B. R., & Friedman, D. S. (2001). Activity restrictions as part of the discharge management for children with a traumatic head injury. *J Head Trauma Rehabil*, 16(3), 292-301.
- Swaine, B. R., Tremblay, C., Platt, R. W., Grimard, G., Zhang, X., & Pless, I. B. (2007). Previous head injury is a risk factor for subsequent head injury in children: a longitudinal cohort study. *Pediatrics*, 119(4), 749-758.
- Takeuchi, T. (1997). Visual search of expansion and contraction. *Vision Res*, 37(15), 2083-2090.
- Tanaka, K., Fukada, Y., & Saito, H. A. (1989). Underlying mechanisms of the response specificity of expansion/contraction and rotation cells in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *J Neurophysiol*, 62(3), 642-656.
- Tanaka, K., Hikosaka, K., Saito, H., Yukie, M., Fukada, Y., & Iwai, E. (1986). Analysis of local and wide-field movements in the superior temporal visual areas of the macaque monkey. *J Neurosci*, 6(1), 134-144.
- Tanaka, K., & Saito, H. (1989). Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *J Neurophysiol*, 62(3), 626-641.
- Te Pas, S. F., Kappers, A. M., & Koenderink, J. J. (1996). Detection of first-order structure in optic flow fields. *Vision Res*, 36(2), 259-270.
- Teasdale, G., & Jennett, B. (1974). Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet*, 2(7872), 81-84.
- Teller, D. Y. (1979). The forced-choice preferential looking procedure: A psychophysical technique for the use with human infants. *Infant Beh and Dev*, 2, 135-153.
- Teller, D. Y. (1982). Scotopic vision, color vision, and stereopsis in infants. *Curr Eye Res*, 2(3), 199-210.

- Teller, D. Y. (1997). First glances: the vision of infants. the Friedenwald lecture. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 38(11), 2183-2203.
- Teller, D. Y., McDonald, M. A., Preston, K., Sebris, S. L., & Dobson, V. (1986). Assessment of visual acuity in infants and children: the acuity card procedure. *Dev Med Child Neurol*, 28(6), 779-789.
- Tetewsky, S. J., & Duffy, C. J. (1999). Visual loss and getting lost in Alzheimer's disease. *Neurology*, 52(5), 958-965.
- Thibault, D., Brosseau-Lachaine, O., Faubert, J., & Vital-Durand, F. (2007). Maturation of the sensitivity for luminance and contrast modulated patterns during development of normal and pathological human children. *Vision Res*, 47(12), 1561-1569.
- Thurman, D. J., Branche, C. M., & Sniezek, J. E. (1998). The epidemiology of sports-related traumatic brain injuries in the United States: recent developments. *J Head Trauma Rehabil*, 13(2), 1-8.
- Timmers, A. M., Fox, D. A., He, L., Hansen, R. M., & Fulton, A. B. (1999). Rod photoreceptor maturation does not vary with retinal eccentricity in mammalian retina. *Curr Eye Res*, 18(6), 393-402.
- Tohyama, K., & Fukushima, K. (2005). Neural network model for extracting optic flow. *Neural Netw*, 18(5-6), 549-556.
- Tretter, F., Cynader, M., & Singer, W. (1975). Modification of direction selectivity of neurons in the visual cortex of kittens. *Brain Res*, 84(1), 143-149.
- Trick, G. L., Kaskie, B., & Steinman, S. B. (1994). Visual impairment in Parkinson's disease: deficits in orientation and motion discrimination. *Optom Vis Sci*, 71(4), 242-245.
- Turano, K., & Pantle, A. (1985). Discontinuity limits for the generation of visual motion aftereffects with sine- and square-wave gratings. *J Opt Soc Am A*, 2(2), 260-266.
- Vaina, L. M., & Cowey, A. (1996). Impairment of the perception of second order motion but not first order motion in a patient with unilateral focal brain damage. *Proc Biol Sci*, 263(1374), 1225-1232.
- Vaina, L. M., Cowey, A., & Kennedy, D. (1999). Perception of first- and second-order motion: separable neurological mechanisms? *Hum Brain Mapp*, 7(1), 67-77.
- Vaina, L. M., Makris, N., Kennedy, D., & Cowey, A. (1998). The selective impairment of the perception of first-order motion by unilateral cortical brain damage. *Vis Neurosci*, 15(2), 333-348.
- Vaina, L. M., & Rushton, S. K. (2000). What neurological patients tell us about the use of optic flow. *Int Rev Neurobiol*, 44, 293-313.
- van den Berg, A. V. (1992). Robustness of perception of heading from optic flow. *Vision Res*, 32(7), 1285-1296.
- Vanderploeg, R. D., Curtiss, G., & Belanger, H. G. (2005). Long-term neuropsychological outcomes following mild traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc*, 11(3), 228-236.
- Vital-Durand, F. (1992). Acuity card procedures and the linearity of grating resolution development during the first year of human infants. *Behav Brain Res*, 49(1), 99-106.
- Vital-Durand, F. (1996). An acuity cards cookbook. . *Strabismus*, 4, 89-97.
- Vital-Durand, F., Atkinson, J., & Braddick, O. J. (1996). *Infant vision*. Oxford ; New York: Oxford University Press.

- Volkman, F. C., & Dobson, M. V. (1976). Infant responses of ocular fixation to moving visual stimuli. *J Exp Child Psychol*, 22(1), 86-99.
- Voller, B., Benke, T., Benedetto, K., Schnider, P., Auff, E., & Aichner, F. (1999). Neuropsychological, MRI and EEG findings after very mild traumatic brain injury. *Brain Inj*, 13(10), 821-827.
- von Grunau, M., & Dube, S. (1994). Visual search asymmetry for viewing direction. *Percept Psychophys*, 56(2), 211-220.
- Warren, W. H., Jr., Blackwell, A. W., Kurtz, K. J., Hatsopoulos, N. G., & Kalish, M. L. (1991). On the sufficiency of the velocity field for perception of heading. *Biol Cybern*, 65(5), 311-320.
- Warren, W. H., Jr., Blackwell, A. W., & Morris, M. W. (1989). Age differences in perceiving the direction of self-motion from optical flow. *J Gerontol*, 44(5), P147-153.
- Warren, W. H., Jr., Morris, M. W., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 14(4), 646-660.
- Warren, W. H., Jr., & Saunders, J. A. (1995). Perceiving heading in the presence of moving objects. *Perception*, 24(3), 315-331.
- Watamaniuk, S. N., Sekuler, R., & Williams, D. W. (1989). Direction perception in complex dynamic displays: the integration of direction information. *Vision Res*, 29(1), 47-59.
- Wattam-Bell, J. (1991). Development of motion-specific cortical responses in infancy. *Vision Res*, 31(2), 287-297.
- Wattam-Bell, J. (1992). The development of maximum displacement limits for discrimination of motion direction in infancy. *Vision Res*, 32(4), 621-630.
- Wattam-Bell, J. (1994). Coherence thresholds for discrimination of motion direction in infants. *Vision Res*, 34(7), 877-883.
- Wattam-Bell, J. (1996a). Visual motion processing in one-month-old infants: preferential looking experiments. *Vision Res*, 36(11), 1671-1677.
- Wattam-Bell, J. (1996b). Visual motion processing in one-month-old infants: habituation experiments. *Vision Res*, 36(11), 1679-1685.
- Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech*, 18, 292-297.
- Wetherill, G. B., & Levitt, H. (1965). Sequential Estimation of Points on a Psychometric Function. *Br J Math Stat Psychol*, 18, 1-10.
- WHO Motor Development Study: windows of achievement for six gross motor development milestones. (2006). *Acta Paediatr Suppl*, 450, 86-95.
- Willer, B., Dumas, J., Hutson, A., & Leddy, J. (2004). A population based investigation of head injuries and symptoms of concussion of children and adolescents in schools. *Inj Prev*, 10(3), 144-148.
- Williams, D., & Phillips, G. (1987). Cooperative phenomena in the perception of motion direction. *J Opt Soc Am A*, 4(5), 878-885.
- Williams, D., Phillips, G., & Sekuler, R. (1986). Hysteresis in the perception of motion direction as evidence for neural cooperativity. *Nature*, 324(6094), 253-255.
- Wilson, H. R., Ferrera, V. P., & Yo, C. (1992). A psychophysically motivated model for two-dimensional motion perception. *Vis Neurosci*, 9(1), 79-97.
- Wohlgemuth, A. (1911). On the aftereffect of seen movement. *Brit J Psychol., Monograph suppl.*, 1, 1-117.

- Wong, J. L., Regennitter, R. P., & Barrios, F. (1994). Base rate and simulated symptoms of mild head injury among normals. *Arch Clin Neuropsychol*, 9(5), 411-425.
- Wrightson, P., McGinn, V., & Gronwall, D. (1995). Mild head injury in preschool children: evidence that it can be associated with a persisting cognitive defect. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 59(4), 375-380.
- Wurtz, R. H. (1998). Optic flow: A brain region devoted to optic flow analysis? *Curr Biol*, 8(16), R554-556.
- Wurtz, R. H., & Kandel, E. R. (2000). Perception of motion, depth, and form. In E. R. Kandel, Schwartz, J. H., Jessel, T. M. (Ed.), *Principles of Neural Science, 4th Edition*. New-York: McGraw Hill.
- Yakovlev, P. I., Lecours, A. (1967). The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In A. Minokowski (Ed.), *Regional Development of the Brain in Early Life*. (pp. 3-70). Philadelphia: FA Davis Co.
- Yeates, K. O., Luria, J., Bartkowski, H., Rusin, J., Martin, L., & Bigler, E. D. (1999). Postconcussive symptoms in children with mild closed head injuries: *J Head Trauma Rehabil*, 14(4), 337-350.
- Yonas, A., Pettersen, L., & Lockman, J. J. (1979). Young infant's sensitivity to optical information for collision. *Can J Psychol*, 33(4), 268-276.
- Yorkston, K. M., Jaffe, K. M., Polissar, N. L., Liao, S., & Fay, G. C. (1997). Written language production and neuropsychological function in children with traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 78(10), 1096-1102.
- Young, M. P. (1992). Objective analysis of the topological organization of the primate cortical visual system. *Nature*, 358(6382), 152-155.
- Yuodelis, C., & Hendrickson, A. (1986). A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision Res*, 26(6), 847-855.
- Zeki, S. M. (1974). Functional organization of a visual area in the posterior bank of the superior temporal sulcus of the rhesus monkey. *J Physiol*, 236(3), 549-573.
- Zhou, Y. X., & Baker, C. L., Jr. (1993). A processing stream in mammalian visual cortex neurons for non-Fourier responses. *Science*, 261(5117), 98-101.
- Zhou, Y. X., & Baker, C. L., Jr. (1996). Spatial properties of envelope-responsive cells in area 17 and 18 neurons of the cat. *J Neurophysiol*, 75(3), 1038-1050.
- Zihl, J., von Cramon, D., & Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, 106 (Pt 2), 313-340.

## **Annexe 1**

**Accord des coauteurs des articles de la thèse.**



## **Annexe 2**

### **Permission de l'éditeur du 1<sup>e</sup> article**

## **Annexe 3**

### **Définition du Traumatisme craniocérébral léger.**

Définition du TCCL selon le Task Force du centre de collaboration de Neurotraumatologie de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

**Le traumatisme craniocérébral léger (TCCL) est une atteinte cérébrale aigue résultant d'un transfert d'énergie d'une source externe vers le crâne et les structures sous-jacentes.**

**Opérationnellement, il se traduit par :**

**1. l'objectivation d'au moins un des éléments suivants :**

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

**2. un résultat variant de 13 à 15 sur l'échelle de coma de Glasgow 30 minutes ou plus après l'accident, lors de l'évaluation à l'urgence.**

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

Adapté de (Carroll, Cassidy, Holm, Kraus, & Coronado, 2004)

## **Annexe 4**

### **Questionnaire des symptômes post-commotionnels**

Évaluation (entourer) : 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>.

Nom:

Échelle: 0=aucun problème

Date:

1=pas plus que d'habitude

2=un problème léger

3=un problème modéré

4=un problème sévère

Mal de tête	0	1	2	3	4
Sensation d'étourdissement	0	1	2	3	4
Nausées ou vomissements	0	1	2	3	4
Sensibilité aux sons	0	1	2	3	4
Dérangement du sommeil	0	1	2	3	4
Fatigue, facilement fatigable	0	1	2	3	4
Irritable, se fâche facilement	0	1	2	3	4
Sensation de dépression, pleure facilement	0	1	2	3	4
Sensation de frustration, d'impatience	0	1	2	3	4
Perte de mémoire, oublis	0	1	2	3	4
Manque de concentration	0	1	2	3	4
Prendre plus de temps pour penser	0	1	2	3	4
Vision trouble	0	1	2	3	4
Sensibilité à la lumière	0	1	2	3	4
Vision double	0	1	2	3	4
Agitation	0	1	2	3	4

Adapté de Oxford Head Injury Service, 1994