

Université du Québec en Outaouais

Impact de l'amblyopie sur le traitement des visages : une étude psychophysique et électrophysiologique

Essai doctoral
Présenté au
Département de psychoéducation et de psychologie

Comme exigence partielle du doctorat en psychologie
Profil neuropsychologie clinique (D.Psy.)

Par
© Gabrielle Dugas

Avril 2024

Composition du jury

Impact de l'amblyopie sur le traitement des visages : une étude psychophysique et électrophysiologique

Par
Gabrielle Dugas

Cet essai doctoral a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Daniel Fiset, Ph.D., directeur de recherche, Département de psychoéducation et de psychologie,
Université du Québec en Outaouais.

Dave Saint-Amour, Ph.D., co-directeur de recherche, Département de psychologie, Université du
Québec à Montréal.

Geneviève Forest, Ph.D., examinatrice interne et présidente du jury, Département de
psychoéducation et de psychologie, Université du Québec en Outaouais.

Hélène Forget, Ph.D., examinatrice interne, Département de psychoéducation et de psychologie,
Université du Québec en Outaouais.

Ian Charest, Ph.D., examinateur externe, Département de Psychologie, Université de Montréal.

REMERCIEMENTS

Cet essai doctoral est le fruit de plusieurs années de travail qui n'auraient pas été possibles sans l'appui de plusieurs personnes.

J'aimerais tout d'abord remercier mon comité d'évaluation. Merci pour votre temps, mais surtout merci de m'aider à rendre cet essai le plus pertinent possible.

J'aimerais aussi remercier mon directeur de recherche, Daniel Fiset, ainsi que mon co-directeur, Dave Saint-Amour, pour m'avoir soutenue et encouragée tout au long du processus. Merci pour votre aide précieuse, mais aussi pour votre compréhension et votre patience. Un merci tout spécial aux gens de mon laboratoire de recherche avec qui j'ai partagé plusieurs années. Caroline, Daniel, merci d'avoir créé un environnement où j'ai pu m'épanouir en tant qu'étudiante, mais en tant que personne aussi. Vous m'avez permis de croire en moi un peu plus chaque année par votre dévouement et vos encouragements constants.

Je tiens aussi à dire merci à toute ma famille. Merci à toi maman, à papa, à François et à mon grand frère. Depuis le début, je ressens votre appui au travers nos discussions, mais surtout par vos gestes qui me font constamment sentir aimée et appréciée. Merci de croire en moi et de me supporter depuis toujours. Je vous aime à l'infini.

Je ne peux pas passer sous silence le support incroyable de mes amies. Grâce à vous, j'ai pu garder un semblant de zénitude dans ce tumulte qu'est le doctorat. Merci de m'avoir épaulée et de m'avoir fait rire, mais surtout merci de m'avoir écoutée.

Pour terminer, merci Alex. Ta compréhension et ta joie de vivre inépuisable m'ont propulsée tout le long de mon parcours. Merci de me challenger, de m'encourager et de m'aimer comme tu le fais si bien. Mes réussites sont possibles grâce à ton support inconditionnel.

RÉSUMÉ

Le rôle des expériences visuelles précoces sur la mise en place du système de perception de visages est encore mal compris. Certains chercheurs se sont penchés sur l'amblyopie, un trouble neurodéveloppemental de la vision binoculaire causant un débalancement neuronal du système visuel et son impact sur la perception des visages. Ces études suggèrent que l'amblyopie aurait un impact sur l'activation des circuits neuronaux ainsi que sur la composante électrophysiologique associés à la perception des visages (Lerner et al., 2003; Bankó et al., 2013). Le présent essai se divise en deux temps : un premier comportemental et un second en électrophysiologie. Le premier objectif était donc d'étudier les habiletés en perception de visages chez des participants amblyopes. Des tâches de détection et de reconnaissance de visages et d'objets en vision monoculaire ont donc été effectuées. En comparant la performance des participants amblyopes à celle de participants contrôles, nos résultats suggèrent que les amblyopes ont plus de difficultés que des participants contrôles en reconnaissance de visages, et ce tant avec l'œil amblyope qu'avec l'œil non-amblyope. Le second objectif du présent essai était de reproduire des résultats précédemment obtenus en électrophysiologie qui suggéraient un impact de l'amblyopie sur la composante N170, en plus d'investiguer la cause neurophysiologique du déficit comportemental en perception de visages. Ainsi, les mêmes participants amblyopes ont aussi effectué deux tâches de catégorisation de sexe pendant lesquelles les potentiels évoqués étaient enregistrés. De façon surprenante, nos résultats montrent que la N170 dans l'œil amblyope est plus négative que dans l'œil non-amblyope, ce qui va dans le sens opposé des résultats précédemment obtenus par Bankó et al. (2013). D'autre part, en utilisant la méthode des bulles d'orientations (Duncan et al., 2017), nous avons vérifié si le traitement des horizontales, qui est associé à une meilleure performance en perception de visages (Duncan et al., 2019; Pachai et al., 2015), ferait partie des mécanismes impliqués dans les difficultés comportementales observées. Nos résultats suggèrent que la N170 des participants amblyopes tant dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope, ne réagit pas normalement à la présence des orientations horizontales dans un stimulus. Pris tous ensemble, nos résultats démontrent que les expériences visuelles précoces ont un impact non seulement sur les habiletés en détection et en reconnaissance de visages à l'âge adulte, mais aussi sur la mise en place du système neurophysiologique associé à la perception des visages.

Mots-clés : Amblyopie; Perception de visages; Détection de visages; Reconnaissance de visages; Orientations spatiales; N170

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	x
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xi
CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	1
1.1. Préambule.....	2
1.2. La perception des visages.....	4
1.2.1. L'identification des visages.....	4
1.2.2. La détection de visages	7
1.2.3. Les corrélats neuroanatomiques et neurophysiologiques de la perception des visages	9
1.3. Le développement de la perception des visages.....	11
1.3.1. Impact des expériences précoces dans le développement de l'expertise en perception de visages	14
1.4. L'amblyopie	16
1.4.1. Conséquences perceptives et physiologiques de l'amblyopie.....	18
1.4.2. Conséquences de l'amblyopie sur la perception des visages	20
1.5. Objectifs et hypothèses.....	22
1.5.1. Objectif 1 : Aspects comportementaux	24
1.5.2. Objectif 2 : Aspects électrophysiologiques	24
CHAPITRE II : EXPÉRIENCE I.....	26
2.1. Participants	27
2.2. Protocole expérimental.....	28
2.3. Test de la carte trouée (Hole-in-card Test).....	29
2.4. Tests d'habiletés en reconnaissance de visages et d'objets.....	30
2.4.1. Cambridge Face Memory Test.....	30
2.4.2. Vanderbilt Expertise Test.....	31
2.5. Matériel et Stimuli.....	33
2.5.1. Tâches de détection	34
2.5.2. Manipulation expérimentale.....	35
2.6. Résultats et discussion.....	37
2.6.1 Méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise	39
2.6.2. Détection de visages et d'objets	41
2.6.3. Reconnaissance de visages et d'objets	41
CHAPITRE III : EXPÉRIENCE II.....	49
3.1. Participants	50
3.2. Matériel et stimuli	51
3.3. Procédure.....	51
3.4. Acquisition et prétraitement des données d'électroencéphalographie (EEG).....	52
3.5. Résultats et discussion.....	53
3.5.1. Résultats comportementaux	53
3.5.2. Effets de l'amblyopie sur les réponses électrophysiologiques.....	53
CHAPITRE IV : EXPÉRIENCE III	60
4.1. Participants, Matériel et Stimuli.....	61

4.2. Manipulation expérimentale.....	61
4.3. Acquisition et prétraitement des données EEG.....	62
4.4. Résultats et discussion.....	62
4.4.1. Résultats comportementaux	62
4.4.2. Utilisation comportementale des orientations spatiales	63
4.4.3. Orientations spatiales et ERP	66
CHAPITRE V : DISCUSSION GÉNÉRALE.....	72
5.1. Aspects comportementaux	73
5.1.1. <i>Impact de l'amblyopie en détection de visages</i>	73
5.1.2. <i>Impact de l'amblyopie en reconnaissance de visages</i>	77
5.2. Aspects électrophysiologiques	81
5.2.1. <i>L'utilisation des orientations en perception de visages chez des amblyopes</i>	85
5.2.3. <i>L'impact des orientations spatiales sur la NI70</i>	88
5.3. Limites de la présente étude	89
5.4. Pistes futures	92
5.5. Sommaire des résultats.....	93
CHAPITRE VI : CONCLUSION	95
RÉFÉRENCES.....	97
ANNEXES	131
Annexe A : Freiburg Vision Test	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Caractéristiques des participants amblyopes ayant participé à la première expérience</i>	27
Tableau 2. <i>Résultats des analyses par la méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise pour les tâches de détection et de reconnaissance</i>	42
Tableau 3. <i>Résultats de l'analyse sur la différence de performance entre les visages et les objets en détection et en reconnaissance, et ce pour l'œil amblyope et l'œil non-amblyope</i>	45
Tableau 4. <i>Caractéristiques des participants amblyopes ayant participé à la deuxième expérience</i> .	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. a) Rudolf II of Hamsburg or Vertumnus (Arcimboldo, 1591); b) Visages Mooney (Mooney, 1957).....	8
Figure 2. Configurations schématiques d'un visage à l'endroit et à l'envers utilisées dans les études sur la préférence des nouveau-nés envers les visages (image tirée de Johnson & Morton, 1991).....	12
Figure 3. Séparation de la présentation des stimuli par des lunettes à deux couleurs (image tirée de Lerner et al., 2003).	21
Figure 4. Déroulement de l'expérience pour les participants contrôles pairs, impairs et amblyopes. Les tâches se déroulaient dans le même ordre pour chaque participant. Toutefois, les participants contrôles pairs ont débuté les différentes sections avec leur œil dominant tandis que les participants contrôles impairs ont débuté avec leur œil non-dominant afin de contrebalancer l'œil avec lequel chaque test était effectué. Les participants amblyopes commençaient quant à eux chaque section de l'expérience avec leur œil dominant (non-amblyope). CFMT : Cambridge Face Memory Test (Duchaine et Nakayama, 2006); CFMT-A : Cambridge Face Memory Test-Australian (McKone et al., 2011); VET1 : première partie du Vanderbilt Expertise Test (VET; papillons, voitures, feuilles, motocyclettes; McGugin et al., 2012); VET2: deuxième partie du VET (champignons, hiboux, avions, échassiers).....	29
Figure 5. Exemple de stimuli du CFMT et des différentes conditions (Duchaine & Nakayama, 2006). A) Phase de mémorisation. Le participant doit mémoriser différents visages présentés dans différents angles. B)-D) Test de mémoire. Le participant doit identifier lequel parmi trois visages présentés correspond à un des visages appris. La difficulté augmente selon 3 niveaux de difficulté. B) premier niveau de difficulté, les images présentées sont les mêmes que celles utilisées dans la phase de mémorisation. C) deuxième niveau de difficulté, des photos différentes des mêmes individus sont présentées. D) troisième niveau de difficulté, du bruit est ajouté aux images.	31
Figure 6. Vanderbilt Expertise Test. Test d'habiletés de reconnaissance d'objets de diverses catégories (hiboux, feuilles, champignons, échassiers, voitures, motocyclettes, avions et papillons). Déroulement du test, exemple avec les motocyclettes. 1) Le participant commence par mémoriser un ensemble de 6 motocyclettes. 2) Six essais de pratique lui sont fournis avec une rétroaction. 3) Le participant revoit et remémorise le même ensemble de 6 motocyclettes. 4) six nouveaux essais de pratique lui sont fournis avec une rétroaction. 5) Le participant mémorise une dernière fois les six motocyclettes. 6) 36 essais avec des exemplaires de motocyclettes différentes sont présentés au participant et le participant doit se rappeler quels étaient les exemplaires à l'étude et répondre à l'aide des touches du clavier. Image tirée de l'article original (McGugin et al., 2012).	32
Figure 7. Tâche de détection. Le participant doit indiquer si le stimulus cible (visage, voiture ou maison) a été présenté en premier ou en deuxième en appuyant sur les touches de clavier correspondantes. Exemple de la condition visage présentée ci-haut.	35
Figure 8. Schéma de la méthode de la randomisation pondérée du spectre de la phase. À gauche est présentée la création du spectre de phase synthétique en additionnant une proportion de la phase originale avec du bruit visuel. En haut à droite se trouve l'addition des spectres d'énergie des visages, des voitures et des maisons afin d'obtenir un seul spectre d'énergie	

moyen qui sera appliqué à tous les stimuli et devenant ainsi non informatif pour la tâche de détection. Image tirée de Burns (2019).	37
Figure 9. Procédure d'analyse de différence entre les visages et les objets dans les tâches de détection et de reconnaissance. 1) Calcul de la moyenne de performance des 24 participants contrôles 2) Comparaison de cette moyenne à la moyenne de chaque <i>bootstrap</i> , créant un vecteur de différence contrôle- <i>bootstrap</i> ; La moyenne est aussi comparée à la moyenne des participants amblyopes 3) Comparaison de la différence contrôle- <i>bootstrap</i> visage à celle obtenue avec les objets pour créer un intervalle de confiance de différence de performance 4) Comparaison de la différence contrôle-amblyope visage à la différence contrôle-amblyope objet, créant un score de différence 5) comparaison du résultat obtenu en 4) avec l'intervalle de confiance obtenu en 3).	44
Figure 10. Exemple d'un essai de la tâche de catégorisation de sexe.	52
Figure 11. Formes d'ondes moyennes des ERP lors de la tâche de catégorisation de sexe chez les participants amblyopes en a) et b), ainsi que chez les participants contrôles en c) et d).	56
Figure 12. Procédure des bulles d'orientation. Voir le texte pour une description détaillée. (Image tirée de l'article de Duncan et al., 2019).	62
Figure 13. Vecteurs de classification de groupe dans la tâche de bulles d'orientation pour a) les participants contrôles et b) les participants amblyopes. Illustration de la corrélation (score z) entre les orientations présentées et la précision des réponses en catégorisation de sexe. Les lignes grises pointillées représentent le seuil de signification du test bilatéral, soit $ps < .05$. .66	
Figure 14. Lien entre la présence de différentes orientations dans le stimulus et leur impact sur l'amplitude de l'ERP chez les participants contrôles; a) Résultats de l'œil dominant et b) Résultats de l'œil non-dominant; La fenêtre temporelle de la N170 a été entourée d'un rectangle noir. Les orientations qui ont mené à un changement significatif de l'amplitude de l'ERP sont entourées en rouge.	69
Figure 15. Lien entre la présence de différentes orientations dans le stimulus et leur impact sur l'amplitude de l'ERP chez les participants amblyopes; a) Résultats de l'œil dominant et b) Résultats de l'œil amblyope; La fenêtre temporelle de la N170 a été entourée d'un rectangle noir. Les orientations qui ont mené à un changement significatif de l'amplitude de l'ERP sont entourées en rouge.	69
Figure 16. Exemple d'un visage Mooney. a) Visage Mooney et b) visage Mooney randomisé. (Image tirée de Silverstein et al., 2021)	77

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Aniso	Anisométrique
CFMT	Cambridge Face Memory Test
CFMT-A	Cambridge Face Memory Test – Australian
EEG	Électroencéphalographie
ERP	<i>Event-related potentials</i> (potentiels évoqués)
E.T.	Écart-type
f	Femme
FFA	<i>Fusiform Face Area</i>
IC	Intervalle de confiance
IFC	<i>Intervalled forced choice</i> (choix forcé à intervalle)
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
LCD	<i>Liquid cristal display</i> (écran à cristaux liquides)
M	Moyenne
MEG	Magnétoencéphalographie
OD	Œil droit
OFA	<i>Occipital Face Area</i>
OG	Œil gauche
Rx	Prescription
SNR	Signal-to-noise ratio (ratio signal-sur-bruit)
Strab	Strabique
VET	Vanderbilt Expertise Test

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

k Ω	kilo-ohms
mV	millivolts
μ V	microvolts
ms	millisecondes
Hz	Hertz
=	Égale
%	Pourcentage

CHAPITRE I : INTRODUCTION

1.1. Préambule

La reconnaissance des visages est centrale aux relations sociales. Le visage est un stimulus contenant des informations visuelles permettant d'inférer le genre, l'ethnie, l'identité, les émotions et l'âge des gens que nous côtoyons. La perception des visages nous permet donc d'ajuster nos comportements sociaux à ceux que l'on rencontre ainsi qu'à l'état émotionnel dans lequel ils sont. Pour ces raisons, le cerveau humain semble s'être adapté en développant des régions cérébrales spécialisées dans le traitement des visages (Kanwisher et al., 1997; Gauthier et al., 2000b; Haxby et al., 2000). Par ailleurs, le développement des réseaux neuronaux en lien avec la perception des visages serait dépendant des expériences visuelles précoces (Lerner et al., 2003; Kelly et al., 2019). Un exemple frappant montrant l'impact des expériences visuelles précoces sur le système visuel est l'amblyopie développementale. L'amblyopie est définie comme une réduction de l'acuité visuelle et de la sensibilité au contraste dans l'un des deux yeux. Généralement, cette condition est associée à un ou plusieurs facteurs amblyogènes (p. ex. le strabisme et/ou l'anisométrie) durant la période sensible du développement visuel (Ciuffreda et al., 1991) et n'est pas corrigible par des moyens optiques (Powell & Hatt, 2009). Les expériences visuelles précoces anormales causées par ces facteurs amblyogènes mènent à un fonctionnement atypique des circuits corticaux associés à l'œil amblyope (Hubel & Wiesel, 1965). Des conséquences fonctionnelles découlent de cette réorganisation neuronale. En plus d'affecter la perception du contraste (Kiorpes & Movshon, 1996; Kiorpes et al., 1998; Levi & Harwerth, 1977; Hess & Howell, 1977), du mouvement (Simmers et al., 2005; Knox et al., 2013; Meier et al., 2016; Simmers et al., 2003; Simmers et al., 2006; Ho et al., 2005; Wang & Ho, 2007) ainsi que la stéréoacuité (c.-à-d. la capacité de percevoir la profondeur; Levi et al., 2015; Webber & Wood, 2005; McKee et al., 2003), l'amblyopie affecterait le traitement visuel de plus haut niveau

(c.-à-d. le processus d'intégration de différentes informations pouvant provenir de différentes sources) comme la perception de visages (Lerner et al., 2003; Bankó et al., 2013). Ces études ont montré que l'amblyopie affecte l'activation de régions cérébrales spécialisées dans le traitement des visages ainsi que les processus neurophysiologiques qui en découlent. L'objectif de la présente étude est de caractériser les impacts de l'amblyopie sur la perception des visages et d'investiguer les mécanismes sous-jacents grâce à la psychophysique et à l'électrophysiologie. Les sections qui suivent présentent les connaissances actuelles sur les différents thèmes précédemment nommés et conduisent vers les objectifs de la présente étude ainsi que la méthodologie utilisée pour répondre à la question de recherche.

1.2. La perception des visages

Dès le plus jeune âge, les visages semblent être la catégorie de stimuli visuels la plus dominante dans notre environnement (Sinha et al., 2007). La majorité des adultes seraient experts en traitement de visage (Gauthier et al., 2000a), étant capables d'extraire une grande quantité d'information comme l'identité, l'état émotionnel, le sexe, l'ethnie et l'âge. Un déficit en reconnaissance de visage peut donc rendre difficiles les interactions sociales quotidiennes et parfois mener à des comportements sociaux inadaptés. Des études soulèvent d'ailleurs l'importance de plusieurs facteurs pouvant influencer la perception des visages tels que les troubles de santé mentale (Davies et al., 1994; Wolf et al., 2008; Weigelt et al., 2012; Herrmann et al., 2004), l'âge des participants (Maylor & Valentine, 1992; Shapiro & Penrod, 1986; Thomas et al., 2008) et les expériences perceptives (Levin, 2000; McGugin et al., 2011; Hugenberg et al., 2010; Tanaka et al., 2013). Malgré l'apparente simplicité du processus d'identification d'un visage, celui-ci relève de l'implication majeure des systèmes perceptifs et d'une analyse approfondie du stimulus complexe qu'est un visage (pour les revues de la littérature scientifique, voir Hole & Bourne, 2010; Maurer et al., 2002).

1.2.1. L'identification des visages

L'identification d'un visage est une habileté complexe qui se définit par la capacité perceptive d'accéder aux informations affectives, épisodiques et sémantiques relatives à l'identité d'une personne familière. Un exemple classique serait de croiser un collègue de travail dans un endroit inhabituel, comme dans un centre commercial, et de le reconnaître par son visage pour ainsi être en mesure d'entreprendre une action adaptée (p. ex. le saluer). Nous savons que les habiletés en reconnaissance de visages varient entre les individus (Berhmann et Avidan, 2005; Duchaine et Nakayama, 2006; Russell et al., 2009) et qu'il existerait un continuum de

performance en reconnaissance de visage (Bate et al., 2010; Royer et al., 2015, 2016, 2018; Wilmer et al., 2010). À un extrême d'habiletés avec les visages, des chercheurs ont montré l'existence de gens ayant des capacités exceptionnelles d'identification de visages, qu'ils ont nommés des super-physionomistes (Ramon et al., 2019). Ceux-ci peuvent par exemple reconnaître des gens qu'ils n'ont croisés qu'une seule fois dans leur vie (Bobak et al., 2016; Russell et al., 2009). À l'autre extrême du continuum, certaines personnes ont d'importantes difficultés en reconnaissance de visages. Ce trouble est communément appelé la prosopagnosie et se caractérise par une incapacité à reconnaître l'identité d'un individu par son visage (Corrow et al., 2016; Duchaine & Nakayama, 2006; Fox et al., 2008). La prosopagnosie a d'importantes conséquences sociales puisque les individus atteints de ce trouble peuvent rencontrer des difficultés à s'adapter à leur interlocuteur, ne pas reconnaître le visage de leurs proches (p. ex. reconnaître son enfant à la sortie de l'école), et dans les cas les plus graves, ne pas reconnaître leur propre visage.

Les différences individuelles en reconnaissance de visage semblent impliquer de meilleures stratégies perceptives dans l'extraction de l'information visuelle (Royer et al., 2015, 2018; Duncan et al., 2019; Tardif et al., 2018). D'ailleurs, plusieurs études suggèrent que l'extraction des caractéristiques visuelles de bas niveau (fréquences et orientations spatiales), auxquelles le cortex visuel primaire est sensible, joue un rôle important dans le traitement des visages. Les fréquences spatiales peuvent se définir par le niveau de granularité d'une image. Par exemple, les basses fréquences spatiales permettent de déterminer la forme globale, le contour des stimuli visuels sans détails fins, comme lorsqu'on regarde au travers d'une vitre givrée, tandis que les hautes fréquences spatiales représentent les détails fins d'un stimulus visuel. Les résultats de l'ensemble des études précédentes suggèrent que l'identification d'un visage se base sur une bande de fréquences spatiales moyennes, soit approximativement entre 8 à 20 cycles par visage

(Gaspar et al., 2008; Näsänen, 1999; Royer et al., 2017; Tardif et al., 2017; Willenbockel et al., 2010). Plus récemment, les études se sont intéressées aux orientations spatiales, qui semblent jouer un rôle tant en détection (Balas et al., 2015a) ainsi qu'en identification de visages (Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Goffaux et al., 2016; Goffaux & Greenwood, 2016; Goffaux et al., 2015; Pachai et al., 2017; Duncan et al., 2019).

Certains chercheurs suggèrent d'ailleurs que l'aspect « spécial » du traitement des visages serait associé à la structure horizontale dans le domaine des orientations spatiales (Dakin & Watt, 2009). Une des signatures comportementales de la spécialisation du traitement des visages, soit le fait que la performance en reconnaissance de visage chute drastiquement lorsqu'un visage est présenté à l'envers sur le plan de l'image, est appuyée par l'information contenue dans les orientations horizontales (Goffaux & Dakin, 2010; Pachai et al., 2013). L'effet d'inversion aurait comme conséquence une réduction de l'efficacité du traitement des informations pertinentes en reconnaissance de visages (Willenbockel et al., 2010, Gaspar et al., 2008), dont les orientations horizontales (Pachai et al., 2013). L'information horizontale est aussi avantageuse en reconnaissance de visages familiers, comparativement aux autres bandes d'orientations (p.ex. verticales; Dakin & Watt, 2009). En effet, en reconnaissance de visages, lorsque les informations présentées sont limitées à une bande étroite d'orientations, de meilleures performances sont obtenues en révélant uniquement des orientations horizontales que si le stimulus contient uniquement des orientations verticales. Les habiletés en identification de visages sont aussi corrélées avec la capacité à extraire l'information contenue dans les orientations horizontales d'un stimulus (Duncan et al., 2019; Pachai et al., 2013) tandis qu'une sensibilité réduite aux horizontales a été associée à la prosopagnosie développementale (Pachai et al., 2015). La sensibilité à la structure horizontale d'un visage joue aussi un rôle dans la perception des expressions faciales d'émotions (Balas et al., 2015b; Duncan et al. 2017; Huynh & Balas, 2014)

et des changements dans le profil de sensibilité aux horizontales ont déjà été associés à des modifications de la perception des visages durant l'enfance (Balas et al., 2015a; Goffaux et al., 2015; de Heering et al., 2016) et le vieillissement normal (Obermeyer et al., 2012; Parpia et al., 2015).

Ainsi, différentes informations de bas niveau comme les fréquences et les orientations spatiales semblent importantes pour la reconnaissance de visages. La présence de différences individuelles est aussi extrêmement intéressante puisqu'elle suggère des nuances en ce qui a trait à ce traitement perceptif d'un visage. Cela étant dit, une étape cruciale avant de pouvoir identifier le visage d'un individu ou son état émotionnel se retrouve dans la détection dudit visage dans notre environnement. Pourtant, à notre connaissance, peu d'études se sont consacrées à la détection des visages malgré son importance dans l'activation des processus de traitement des visages de plus haut niveau (Barragan-Jason et al., 2013; voir toutefois Garrido et al., 2008).

1.2.2. La détection de visages

La détection de visages est simplement le processus consistant à catégoriser un stimulus visuel dans notre environnement comme étant un visage. C'est d'ailleurs une étape cruciale, et parmi les plus difficiles lorsqu'il s'agit de la reconnaissance de visages. La détection automatique des visages, telle qu'observée chez l'humain, est particulièrement complexe. Il faut d'abord reconnaître un patron particulier (c.-à-d. deux yeux au-dessus d'un nez et d'une bouche) appartenant au visage humain (nécessitant de distinguer entre l'humain et les autres espèces animales), tout en ne sachant pas la taille ni l'endroit du visage dans la scène naturelle déjà complexe visuellement (Yang & Huang, 1994). Malgré un grand niveau de difficulté, les adultes sont remarquablement bons pour détecter des visages, et ce même en l'absence de réels traits faciaux (Mondloch et al., 2003). Par exemple, nous pouvons percevoir un visage dans les nuages

sans qu'il ne soit réellement présent (Robertson et al., 2017; pour une revue de la littérature scientifique, voir Maurer et al., 2002), dans du bruit visuel (Gosselin & Schyns, 2003), dans les peintures d'Arcimboldo (Moscovitch et al., 1997; Young et al., 2013; voir Figure 1a) et dans des visages Mooney (Mondloch et al., 2003; voir Figure 1b) par la simple configuration des objets ou pixels dans l'image. Le processus de détection de visage est un mécanisme extrêmement rapide ayant été mesuré tant au niveau des temps de réaction (Rousselet et al., 2003; Rousselet et al., 2008a), qu'à l'initiation d'une réponse électroencéphalographique (EEG; Rossion & Caharel, 2011) et magnétoencéphalographique (MEG; Liu et al., 2002). Les résultats obtenus à l'aide de différentes méthodologies soulèvent une vitesse de détection moyenne d'un visage sous la barre des 150 millisecondes (ms).



Figure 1. a) Rudolf II of Hamsburg or Vertumnus (Arcimboldo, 1591); b) Visages Mooney (Mooney, 1957).

La détection et la reconnaissance de visages sont donc deux habiletés généralement retrouvées chez l'adulte expert en perception de visages. D'ailleurs, la prédominance des visages dans notre environnement et l'importance sociale de cette catégorie visuelle a favorisé le développement de régions cérébrales préférentielles aux visages associées à cette expertise.

1.2.3. Les corrélats neuroanatomiques et neurophysiologiques de la perception des visages

Au fil des années, les études en neuro-imagerie ont découvert des régions cérébrales imbriquées dans un réseau neuronal complexe qui s'activent davantage pour des visages que pour d'autres objets (Young et al., 1985; Kanwisher et al., 1997, Gauthier et al., 2000b; Haxby et al., 2000; De Renzi et al., 1994; Duchaine & Yovel, 2015). Les modèles neuronaux associés à la perception des visages proposent que le *Occipital Face Area* (OFA; Gauthier et al., 2000b), généralement situé au niveau du lobe occipital droit, s'occuperait de la description précoce de la structure d'un visage (Haxby et al. 2000; Calder & Young, 2005) alors que les régions cérébrales de plus haut niveau comme le *Fusiform Face Area* (FFA; Kanwisher et al., 1997), localisé dans le gyrus fusiforme droit, ainsi que le lobe temporal antérieur droit (Kriegeskorte et al., 2007) traiteraient quant à elles les aspects invariants d'un visage comme l'identité. D'ailleurs, les différences individuelles en identification de visages sont corrélées positivement avec l'activation du FFA : les individus qui excellent en reconnaissance de visages ont une activation plus importante du FFA comparativement aux individus moins doués et aux prosopagnosiques (Furl et al., 2011). L'hypothèse que le OFA est une région cérébrale responsable des premières étapes de traitement des visages est aussi soutenue par sa position intermédiaire (Hemond et al., 2007). Ainsi, avant de subir une analyse approfondie dans les régions de plus haut niveau comme le FFA, la première analyse visuelle préférentielle aux visages se ferait dans le OFA (Pitcher et al., 2011), région activée par les parties de visages (p. ex. yeux, nez et bouche) et ce peu importe la configuration de celles-ci dans un visage contrairement au FFA, qui lui apparaît sensible à cette configuration (p. ex. deux yeux au-dessus d'un nez et d'une bouche; Liu et al., 2010).

Au niveau neurophysiologique, une bonne façon d'étudier de manière précise la temporalité des processus perceptifs chez l'humain est l'enregistrement des potentiels évoqués

(*event-related potentials*; ERP) par des stimuli visuels en utilisant l'EEG. Cette méthode a permis de découvrir chez l'humain la présence d'un traitement préférentiel au visage qui émerge lors des premiers stades du traitement visuel, c'est-à-dire dans la fenêtre temporelle de la N170. Cette composante ERP est généralement enregistrée dans les régions bilatérales occipito-temporales (avec une dominance de l'hémisphère droit) entre 120 et 200 ms après la présentation d'un stimulus visuel et a une amplitude plus grande pour les visages que pour d'autres catégories visuelles (p. ex. voitures, visages Mooney ou d'Arcimboldo inversés; Bentin et al., 1996; Rossion & Jacques, 2008, 2011). Cette plus grande amplitude pour les visages débute autour de 110-130 ms après la présentation du stimulus, même lorsqu'on contrôle pour les propriétés visuelles de bas niveau (p. ex. le spectre d'amplitude du domaine de Fourier; Rossion & Caharel, 2011; Rousselet et al., 2008b) et représente l'activation des neurones associés à la perception des visages dans le cortex occipito-temporal (Ganis et al., 2012; Rossion & Jacques, 2008; mais voir Thierry et al., 2007). La N170 ne serait cependant pas influencée par l'identité (Zheng et al., 2012, Bentin & Deouell, 2000; Eimer, 2000; Gosling & Eimer, 2011; Schweinberger et al., 2002; Tanaka et al., 2006; mais voir Jacques et Rossion, 2006; Caharel et al., 2009). Celle-ci serait plutôt traitée seulement autour de 230 ms après la présentation du stimulus, fenêtre temporelle généralement associée à la N250, une autre composante électrophysiologique associée à la perception des visages (Tanaka et al., 2006; Kauffman et al., 2009; Andrews et al., 2017).

Depuis une dizaine d'années, les chercheurs se sont intéressés aux informations visuelles associées à la N170. Jusqu'à présent, les résultats démontrent que la région des yeux, les fréquences spatiales et l'information contenue dans les horizontales auraient un rôle à jouer dans le changement d'amplitude et de latence de la N170 à la présentation de visages à l'envers (Jacques et al., 2014; Itier et al., 2007; Flevaris et al., 2008). L'information horizontale est

d'ailleurs nécessaire pour obtenir un effet d'inversion au niveau comportemental (Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Pachai et al., 2013; Pachai et al., 2018). L'absence d'orientations horizontales dans un visage serait aussi liée à une réduction de l'amplitude de la N170 (Hashemi et al., 2019), suggérant que la perception des visages dépend du traitement précoce de l'information contenue dans les horizontales.

L'existence de composantes neuroanatomiques et neurophysiologiques dont l'activation serait préférentielle aux visages mène à un débat concernant l'aspect inné (McKone et al., 2009; Wilmer et al., 2010; Zhu et al., 2010) ou acquis de ces processus. L'hypothèse proposant que la perception des visages est plutôt basée sur l'expérience suggère que la spécificité de ces composantes peut être le résultat d'une exposition extensive à cette catégorie visuelle et ce dès la naissance (Gauthier et al., 1999; Tarr & Gauthier, 2000; Bukach et al., 2006). Ainsi, afin de mieux comprendre l'origine de la spécialisation du traitement des visages et comment cette spécialisation structurelle et fonctionnelle arrive à maturité, l'approche développementale à la perception des visages est de mise.

1.3. Le développement de la perception des visages

Étant exposé à de très nombreux visages dès la naissance, il est primordial à la survie de l'humain que son cerveau s'adapte à cette catégorie importante. Les nouveau-nés ont d'ailleurs une préférence visuelle pour des stimuli dont la configuration est semblable à celle d'un visage (p. ex. triangle inversé; Johnson & Morton, 1991; Valenza et al., 1996; Cassia et al., 2004; voir figure 2), suggérant une prédisposition à orienter l'attention vers les visages. Toutefois, les capacités en traitement de visages continuent de s'améliorer jusqu'à l'âge adulte (Germine et al., 2011; Motta-Mena et al., 2017; Mondloch et al., 2002, 2003, 2006; Susilo et al., 2013; voir

toutefois McKone et al., 2009). Un bon exemple de la malléabilité du système de reconnaissance de visages pendant l'enfance provient de l'émergence de l'effet de l'autre ethnie, soit une plus grande facilité à identifier les visages de l'ethnie de l'observateur par rapport aux visages d'une ethnie différente de celle à laquelle il est exposé. L'effet de l'autre ethnie peut émerger malgré une exposition extensive à une ethnie de visages durant les premières années de vie. Par exemple, après avoir été adoptés entre l'âge de 3 et 9 ans par des familles caucasiennes, des enfants coréens développent un effet de l'autre ethnie pour les visages coréens après avoir été longuement exposés à des visages caucasiens, et ce malgré une exposition extensive à des visages d'origine asiatiques avant leur adoption (Sangrigoli et al., 2005). D'autres résultats similaires montrent que le développement de l'effet de l'autre ethnie, témoignant d'un traitement expert pour une catégorie visuelle à laquelle nous sommes longuement exposés, est dépendant des expériences (Kelly et al., 2007a, 2007b).

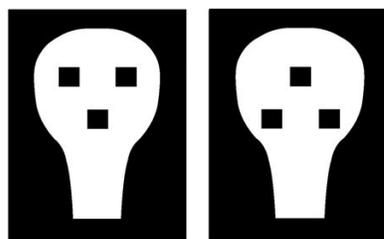


Figure 2. Configurations schématiques d'un visage à l'endroit et à l'envers utilisées dans les études sur la préférence des nouveau-nés envers les visages (image tirée de Johnson & Morton, 1991).

Des changements dans le traitement des visages se produisent encore à l'adolescence (Motta-Mena et al., 2017; Fuhrmann et al., 2016), certaines études soulignant d'ailleurs la présence d'une performance inférieure chez les adolescents comparativement aux jeunes enfants dans certaines tâches (Diamond et al., 1983; McGivern et al., 2002). Une étude a même montré qu'il existe encore une différence de performance en reconnaissance de visages entre l'âge de 18 et 33 ans (Susilo et al., 2013). En effet, une amélioration significative dans la performance des participants

était observée entre 18 et 33 ans, suggérant que les processus associés à la reconnaissance de visages n'atteignent pas leur maturité avant l'âge adulte (Susilo et al., 2013). D'ailleurs, les mécanismes de traitement des visages, incluant le traitement de l'information diagnostique, comme les orientations horizontales, continuent de se développer jusqu'à l'âge adulte (Goffaux et al., 2015; Balas et al., 2015a; Balas et al., 2015b).

Au niveau cortical, les patrons de réponses cérébrales préférentiels aux visages continuent de se préciser et de spécialiser au-delà l'enfance (Golarai et al., 2007; Cohen Kadosh et al., 2011; Taylor et al., 2004; Golarai et al., 2010; Germine et al., 2011; mais voir Cantlon et al., 2010). L'activation du circuit neuronal associée à la perception des visages devient d'ailleurs préférentielle à cette catégorie de stimuli seulement à partir de la préadolescence, malgré la présence d'une structure anatomique globalement mature plus tôt dans le développement (Cohen Kadosh et al., 2011; Taylor et al., 2004). Les études en électrophysiologie soutiennent aussi la spécialisation de la N170 pour les visages au fil du développement (Taylor et al., 2004). D'ailleurs, on retrouve un précurseur de la N170 chez des bébés de moins d'un an (de Haan et al., 2003; Halit et al., 2003; Conte et al., 2020). Cette composante devient plus sensible au visage humain ainsi qu'à l'effet d'inversion durant la première année de vie (Halit et al., 2003; de Haan & Nelson, 1999; de Haan et al., 2002). Jusqu'à l'âge adulte, la latence de la N170 diminue et son amplitude devient plus négative pour les visages, témoignant d'une spécialisation de cette composante pour cette catégorie visuelle (Batty & Taylor, 2006; Itier & Taylor, 2004a, 2004c; Taylor, McCarthy, Saliba, & Degiovanni, 1999). Les différences observées liées à l'âge, tant au niveau de la latence que de l'amplitude de la N170, ne sont toutefois pas constantes au travers des études mentionnées ci-haut. Puisque les tâches et les stimuli varient d'une étude à l'autre, il est possible que ces paramètres aient un impact sur les résultats. Ainsi, la question concernant la

mise en place de ce système pendant le développement et comment les expériences vécues pendant l'enfance influencent son activation et son efficacité demeure d'une grande importance.

1.3.1. Impact des expériences précoces dans le développement de l'expertise en perception de visages

Considérant que le système de traitement des visages se développe durant l'enfance et que le développement neuronal relié au traitement des visages n'atteint pas sa maturité avant l'âge adulte (Taylor et al., 1999; Golarai et al., 2007; de Haan, 2011), l'importance des expériences vécues pendant le développement paraît notable. Par exemple, en utilisant un paradigme d'habituation, des chercheurs ont montré que les bébés âgés de trois mois peuvent reconnaître un visage, peu importe son ethnie (Kelly et al., 2007a; Kelly et al., 2007b). Toutefois, dans la même étude, les bébés de six et neuf mois perdaient l'habileté à reconnaître des visages d'ethnies différentes auxquels ils n'étaient peu ou pas exposés (Kelly et al., 2007a; Kelly et al., 2007b; Sugden & Marquis, 2017). Ainsi, les expériences visuelles vécues en début de vie ont un impact sur les capacités du système de reconnaissance de visages.

Sachant le rôle des expériences perceptives sur le développement du système de reconnaissance des visages, il semble clair qu'une expérience visuelle précoce anormale (p. ex. cataractes congénitales, retrait chirurgical d'un œil, etc.) modifiera les habiletés en perception de visages. Les études suggèrent qu'une expérience visuelle précoce anormale provoque un ralentissement des capacités à discriminer entre des visages dont les traits internes sont modifiés (p. ex. forme ou espacement entre les traits; Kelly et al., 2012, 2019), une réduction de l'activité cérébrale fonctionnelle dans les régions préférentielles pour les visages (FFA gauche, OFA droit, OFA gauche; Kelly et al., 2019) et mène à des difficultés à reconnaître l'identité d'un visage indépendamment du point de vue (Geldart et al., 2002; de Heering & Maurer, 2014) ainsi qu'à

discriminer des visages qui ne diffèrent que par des changements dans l'espace des traits faciaux (Le Grand et al., 2003; de Heering & Maurer, 2014; Robbins et al., 2010)¹. En contrepartie, les capacités à reconnaître des aspects changeants d'un visage (lecture sur les lèvres, direction du regard, expression faciale; Geldart et al., 2002; Maurer & Mondloch, 2011) et la sensibilité aux différences dans la forme des traits individuels d'un visage ne seraient pas affectées par des expériences visuelles précoces anormales (Le Grand et al., 2001; Mondloch, Robbins & Maurer, 2010). Une étude de Mondloch et coll. (2013) a également conclu que les expériences visuelles précoces n'avaient pas d'impact sur les capacités à détecter des visages à grand contraste.

Les études électrophysiologiques ne sont pas unanimes. Certains résultats suggèrent que les expériences visuelles précoces anormales peuvent tout de même mener à une N170 dont l'activation est préférentielle pour les visages, mais étant plus ample et ayant une plus grande latence que celle observée chez des participants contrôles (Mondloch et al., 2013), alors que d'autres études soulèvent la présence d'une N170 non-préférentielle aux visages chez les participants ayant subi une privation visuelle à l'enfance (p. ex. amplitude similaire pour les visages et l'ensemble des objets présentés; Röder et al., 2013). Une autre étude, cette fois-ci auprès de participants amblyopes, propose que les expériences visuelles précoces anormales diminuent l'amplitude de la N170 (Bankó et al., 2013). Malgré des résultats contradictoires, les études suggèrent tout de même que les expériences précoces ont un impact sur la N170 à l'âge adulte. D'ailleurs, des anomalies au niveau des circuits corticaux associées à la perception des visages ont aussi été notées chez des adultes nés avec de cataractes retirées pendant l'enfance

¹ Les études portant sur l'amblyopie ont été exclues et seront discutées en détail plus loin dans le présent essai.

(Grady et al., 2014), témoignant encore une fois l'importance des expériences précoces dans le développement d'une expertise en perception de visages et des processus neuronaux associés.

L'ensemble des résultats précédents démontrent que la perception des visages se développe très tôt et qu'elle se spécialise avec le temps. La nécessité de ces expériences précoces s'illustre également par la présence de déficits dans le traitement des visages chez des enfants n'y ayant pas eu accès (Mondloch et al., 2003; Grady et al., 2014; Grand et al., 2003; De Heering & Maurer, 2014; Robbins et al., 2010; Röder et al., 2013; Geldart et al., 2002; Kelly et al., 2012; 2019) et par des anomalies structurelles dans les régions cérébrales associées à la perception des visages chez des populations ayant des performances atypiques (p.ex. autisme; van Kooten et al., 2008). Les expériences visuelles précoces sont donc non seulement nécessaires pour les développements anatomique et fonctionnel du système visuel et des régions cérébrales impliquées dans la perception visuelle en général (Atkinson, 1984; Boothe et al., 1985; Van Sluyters et al., 1990; Huttenlocher, 1990; pour une revue de la littérature voir Maurer & Lewis, 2018), mais sont aussi importantes pour le développement de processus visuels de plus haut niveau comme la reconnaissance de visages. Un bel exemple de l'impact des expériences visuelles précoces sur le développement et l'organisation du système visuel provient de l'amblyopie.

1.4. L'amblyopie

L'amblyopie est une anomalie développementale ayant pour conséquence des altérations physiologiques des voies visuelles et entraîne une vision altérée dans un œil (amblyopie unilatérale), et moins fréquemment dans les deux (amblyopie bilatérale). La présente étude se concentre sur l'amblyopie unilatérale. La prévalence de l'amblyopie unilatérale chez les enfants

d'âge préscolaire est d'environ 1 à 3%, la proportion dépendant en partie de la composition ethnique des échantillons étudiés (M-ePEDS, 2008; Friedman et al., 2009; Ying et al., 2014; Webber & Wood, 2005). L'amblyopie est d'ailleurs la cause la plus commune d'une atteinte monoculaire chez les enfants (Webber & Wood, 2005; Gunton, 2013). Cliniquement, l'amblyopie est associée à une différence d'acuité centrale entre les deux yeux d'au moins deux lignes sur une charte d'optotype (p. ex. Snellen, Landlot C, LogMAR) malgré une correction optique adaptée (McKee et al., 2003; Wallace et al., 2018). Cet écart d'acuité visuelle entre les deux yeux aurait un plus gros impact sur le développement du système visuel qu'une privation visuelle bilatérale en raison de la compétition interoculaire pour les connexions neuronales durant le développement (Lewis et al., 1995; Maurer & Lewis, 2001)².

L'amblyopie est généralement associée à un ou plusieurs facteurs amblyogènes durant la période sensible du développement visuel (Kiorpes & Movshon, 1996; Levi, 2020), soit entre la naissance et l'âge d'environ sept ou huit ans (West & Williams, 2011). Les facteurs amblyogènes les plus communs sont le strabisme (désalignement des deux yeux) et l'anisométrie (différence significative entre la prescription des deux yeux; Ciuffreda et al., 1991; Donahue, 2005).

L'amblyopie peut aussi survenir à la suite d'une privation visuelle précoce (p. ex. opacité de l'œil) causée par une cataracte ou encore une hémorragie du corps vitré (Donahue, 2005).

Plusieurs recherches sont actuellement menées pour comprendre l'impact de ces expériences visuelles anormales, mais nous savons au moins que l'amblyopie est un trouble du cerveau plutôt que de l'œil. Par exemple, Hubel et Wiesel (1963) ont été les premiers à montrer que ce sont des

² L'amblyopie bilatérale est causée par une réduction de l'acuité visuelle dans les deux yeux (De Santis, 2014). Des déficits plus importants ont été retrouvés à la suite d'une privation monoculaire qu'après une privation binoculaire de même durée (Maurer & Lewis, 2001).

conditions associées à des anomalies du cortex visuel qui pourraient conduire à l'amblyopie. Ce fonctionnement cérébral atypique associé à l'amblyopie conduirait à différentes conséquences perceptives et physiologiques.

1.4.1. Conséquences perceptives et physiologiques de l'amblyopie

Bien que l'amblyopie soit cliniquement définie par une mauvaise acuité visuelle (Kiorpes & Movshon, 1996; McKee et al., 2003, Levi, 2020), on sait maintenant qu'il existe plusieurs autres déficits perceptifs associés. Ainsi, l'amblyopie cause une diminution de la sensibilité au contraste dans l'œil amblyope, déficit parfois observé dans l'ensemble des fréquences spatiales (Levi & Harwerth, 1977; Hess & Howell, 1977), mais plus généralement dans les hautes fréquences spatiales (Kiorpes & Movshon, 1996; Kiorpes et al., 1998; Levi & Harwerth, 1977; Hess & Howell, 1977). Notons que des différences au niveau des types d'atteintes visuelles ont été notées entre les amblyopes strabiques et les anisométriques, les premiers étant généralement plus affectés au niveau de l'acuité visuelle et les seconds au niveau de la sensibilité au contraste (McKee et al., 2003). Une présence accrue de bruit interne dans l'œil amblyope (Levi & Klein, 2003) et la présence de déficits oculomoteurs (p. ex. problèmes d'initiation et d'exécution de saccades oculaires; Niechwiej-Szwedo et al., 2010) et des fixations visuelles instables (Subramanian et al., 2013; González et al., 2012; Shaikh et al., 2016; Schor, & Hallmark, 1978; Chung et al., 2015) ont aussi été observés. En plus des atteintes dans l'œil amblyope, des déficits perceptifs sont parfois retrouvés dans l'œil non-amblyope malgré une acuité visuelle normale, reflétant des réponses et des connexions neuronales altérées dans le cortex visuel (Ho et al., 2005). Dans l'œil amblyope comme dans l'œil non-amblyope, on retrouve des déficits au niveau de la perception du mouvement (Simmers et al., 2005; Knox et al., 2013; Meier et al., 2016; Simmers et al., 2003; Simmers et al., 2006; Ho et al., 2005; Wang & Ho, 2007) et de l'intégration

spatiale (Bonneh et al., 2004; Kovács et al., 2000; Mussap & Levi, 2000; Levi et al., 2007; Kosma & Kiorpes, 2003). Aux atteintes de la vision monoculaire s'ajoutent des conséquences sur la vision binoculaire (Levi et al., 1979; Harrad & Hess, 1994; Xi et al., 2014) dont une perturbation des connexions binoculaires des neurones corticaux (Kiorpes et al., 1998), menant à des difficultés au niveau de la perception de la profondeur (c.-à-d. stéréoscopie ou vision en trois dimensions). Cette réduction de la stéréoscopie est d'ailleurs la conséquence perceptive la plus répandue chez les amblyopes, en particulier chez les amblyopes strabiques (Levi et al., 2015; Webber & Wood, 2005; McKee et al., 2003). Des études suggèrent que l'ensemble des déficits nommés s'amplifient en aval au niveau cérébral, certains d'entre eux ne pouvant pas s'expliquer seulement par des anomalies des aires visuelles primaires (Levi, 2006; Muckli et al., 2006; Farzin & Norcia, 2011; Levi, 2006; Sharma et al., 2000). L'amblyopie mène donc non seulement à des déficits visuels de bas niveau comme une diminution de l'acuité visuelle et de la sensibilité au contraste, mais atteint aussi d'autres aspects de la cognition visuelle de plus haut niveau comme la perception de mouvement, l'intégration de contour et même les capacités attentionnelles de l'œil amblyope (Poppo & Levi, 2008; Farzin & Norcia, 2011). Malgré ces résultats, peu d'études se sont consacrées aux effets de l'amblyopie sur les aires visuelles au-delà de V1 et V2. Ainsi, il est possible de croire que l'amblyopie peut affecter le fonctionnement des aires cérébrales impliquées dans les processus de plus haut niveau comme la perception de visages (Lerner et al., 2003; Bankó et al., 2013), cette habileté se développant dès les premiers moments de vie (Johnson & Morton, 1991; Valenza et al., 1996; Cassia et al., 2004) et étant nettement influencée par les expériences visuelles précoces (Maurer & Lewis, 2001).

1.4.2. Conséquences de l'amblyopie sur la perception des visages

Nous savons maintenant que les circuits neuronaux associés à la perception des visages se développent de la naissance jusqu'à plusieurs années après avoir atteint l'âge adulte (p. ex. environ 33 ans; Susilo et al., 2013) et que les expériences visuelles précoces influencent les habiletés en reconnaissance de visages. Ainsi, il est possible de croire qu'un développement visuel anormal aura un impact sur l'activité des aires cérébrales dédiées aux processus visuels de haut niveau. Dans leur étude, Lerner et ses collaborateurs (2003) ont étudié l'activité cérébrale de participants amblyopes adultes à l'aide d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) lorsque des visages et des bâtiments leur étaient présentés visuellement. Pour séparer les stimulations envoyées aux deux yeux pendant que l'activité cérébrale fonctionnelle était enregistrée, les images ont été présentées indépendamment à l'œil non-amblyope et à l'œil amblyope par des lunettes à deux couleurs (voir Figure 3). Les résultats de leur première expérience montrent que la présentation de visages et de bâtiments à l'œil non-amblyope active les régions cérébrales dédiées à leur traitement visuel respectif. Un patron de réponse différent survient lorsque les images sont présentées à l'œil amblyope : les bâtiments activent normalement les régions cérébrales associées à leur traitement (Epstein & Kanwisher, 1998), tandis que les visages n'activent pas le FFA ni le OFA de manière préférentielle. Ainsi, les résultats de cette première expérience suggèrent un impact des expériences visuelles précoces sur l'activité des régions cérébrales liées à la perception des visages. D'ailleurs, les participants avaient de la difficulté à déterminer si les visages présentés étaient célèbres ou non et à reconnaître l'expression faciale d'émotion avec leur œil amblyope. Toutefois, aucune difficulté à déterminer si les bâtiments présentés étaient connus ou non n'a été observée avec l'œil amblyope.



Figure 3. Séparation de la présentation des stimuli par des lunettes à deux couleurs (image tirée de Lerner et al., 2003).

Cette étude de Lerner et coll. (2003) montre donc un déficit du traitement des visages chez les participants amblyopes au niveau neuronal, mais aussi au niveau comportemental, plus particulièrement lorsque les visages sont présentés à l'œil amblyope. Cette sous-activation du FFA dans l'œil amblyope peut d'ailleurs avoir un impact sur des composantes électrophysiologiques comme la N170, qui selon certains chercheurs découle en partie de cette région cérébrale (Yovel et al., 2008; Sadeh et al., 2010; Dalrymple et al., 2011). C'est d'ailleurs ce que les résultats de Bankó et al. (2013) ont permis de vérifier à l'aide de potentiels évoqués chez des participants amblyopes. Leur objectif était de caractériser les déficits causés par l'amblyopie sur la composante N170. Les participants devaient effectuer une tâche de catégorisation de sexe avec des visages résultant d'un morphage homme/femme en vision monoculaire. Le niveau de difficulté de la tâche était ajusté selon l'œil à l'étude durant la tâche afin d'atteindre 80-90% de bonnes réponses. Ainsi, les résultats obtenus dans l'étude ne peuvent pas être expliqués par une plus grande difficulté à effectuer la tâche lorsque l'œil amblyope était ouvert versus lorsque l'œil non-amblyope était ouvert. Les résultats révèlent un effet non négligeable de l'amblyopie sur l'amplitude et la latence de P1 et de la N170 (Bankó et al., 2013). L'amplitude se voit réduite et la latence augmentée, et ce pour les deux composantes lorsque la tâche est effectuée avec l'œil amblyope. De plus, des différences hémisphériques significatives apparaissent lorsque la N170 de l'œil non-amblyope et de l'œil amblyope sont comparées. La

différence de latence entre la N170 de l'œil non-amblyope et de l'œil amblyope est significativement plus grande dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche, ceci corroborant la littérature montrant un biais de l'hémisphère droit en traitement de visage (Young et al., 1985; Kanwisher et al. 1997; De Renzi et al., 1994; Duchaine & Yovel, 2015). Ces résultats suggèrent un déficit de l'hémisphère droit dans le développement temporel des niveaux de traitement supérieur associé à la perception des visages, processus neuronaux reflétés dans la composante N170 (Bentin, et al., 1996; Rossion & Jacques, 2008). Ainsi, la réduction de l'amplitude et l'augmentation de la latence de la N170 chez les patients amblyopes trouvés dans l'étude de Bankó et al. (2013) est en accord avec les résultats en neuro-imagerie qui montrent des réponses diminuées dans les zones corticales visuelles préférentielles au visage chez des participants amblyopes (Lerner et al., 2003). Cela étant dit, à notre connaissance, aucune autre étude ne s'est consacrée aux conséquences comportementales de l'amblyopie sur différents aspects de la perception des visages (détection et reconnaissance) en utilisant des tâches standardisées et des stimuli dont les propriétés visuelles de bas niveau ont été contrôlées. De plus, la présente étude sera la première, à notre connaissance, à faire le lien entre l'amblyopie, l'utilisation des orientations horizontales et leur impact sur la performance comportementale et les processus neurophysiologiques en perception de visage.

1.5. Objectifs et hypothèses

La présente étude se divise en deux temps, un premier comportemental et un second neurophysiologique. Dans un premier temps, l'objectif de cet essai est d'investiguer l'impact de l'amblyopie sur la perception de visages. Les études mentionnées plus haut suggèrent la présence de différences neurophysiologiques en reconnaissance de visages chez les sujets amblyopes, mais

aucune étude, à notre connaissance, ne s'est penchée sur les habiletés comportementales de détection et de reconnaissance de visages chez cette population. Ainsi nous souhaitons étudier les capacités en reconnaissance de visages et d'objets ainsi que la sensibilité de l'œil amblyope et de l'œil non-amblyope à détecter différentes catégories de stimuli visuels. Étant donné la présence de déficits visuels tant dans l'œil amblyope et dans l'œil non-amblyope ainsi que les résultats des études portant sur différentes populations ayant eu des expériences visuelles précoces anormales, il est possible de croire que la performance des participants amblyopes sera inférieure à celle des participants contrôles dans l'ensemble des tâches, mais que la différence de performance sera plus grande avec les visages qu'avec les objets.

Dans un deuxième temps, nous souhaitons étudier les mécanismes perceptifs et physiologiques sous-jacents à la perception des visages par l'entremise de l'électrophysiologie. La latence et l'amplitude de la N170 dans l'œil dominant sera comparée à celle dans l'œil non dominant, et ce tant chez les participants amblyopes que chez les participants contrôles. L'objectif étant de vérifier la présence d'une différence dans la N170 entre les deux yeux et de nous permettre de comparer nos résultats à ceux précédemment obtenus par Bankó et coll. (2013). D'autre part, l'impact des orientations spatiales sur l'amplitude et la latence de la N170 seront aussi étudiés à l'aide des bulles d'orientations (Duncan et al., 2017). Cette expérience s'avère pertinente étant donné la corrélation entre la présence de différentes orientations spatiales dans un stimulus visuel et leur impact sur l'amplitude de la N170 (Jacques et al., 2014; Hashemi et al., 2019; Duncan et al., 2018).

1.5.1. Objectif 1 : Aspects comportementaux

Le présent essai vise à pallier le manque d'études portant sur le développement du système visuel et l'impact des expériences visuelles précoces sur les capacités en détection et en reconnaissance de visages. La première expérience du présent essai (Chapitre II) permet de vérifier l'impact comportemental de l'amblyopie sur les habiletés en perception de visages de deux façons : en étudiant la sensibilité de l'œil amblyope et de l'œil non-amblyope à détecter différents stimuli visuels (visages, voitures et maisons) et en comparant les habiletés en mémorisation et en reconnaissance de visages et d'objets de participants amblyopes à des participants contrôles. L'hypothèse de travail est que l'amblyopie aura un impact plus important sur le seuil de détection de visages et sur les capacités en reconnaissance de visages que sur le seuil de détection et les habiletés en reconnaissance d'objets.

1.5.2. Objectif 2 : Aspects électrophysiologiques

Le second objectif de cet essai vise à reproduire des résultats précédemment obtenus chez des participants amblyopes (Bankó et al., 2013) en observant l'impact de l'amblyopie sur les processus neurophysiologiques lors d'une tâche de catégorisation de sexe ainsi qu'à comparer ceux-ci à des participants contrôles. La seconde expérience (Chapitre III) permet de répondre à cet objectif en utilisant l'EEG chez des participants amblyopes et des participants contrôles pendant qu'ils complètent une tâche de catégorisation de sexe en vision monoculaire. Il est ainsi possible de comparer l'amplitude et la latence de la N170 des participants amblyopes pour l'œil amblyope et l'œil non-amblyope séparément à la N170 des participants contrôles (œil non-dominant et dominant). Notre hypothèse de travail est que l'amplitude de la N170 dans l'œil

amblyope se verra réduite et sa latence augmentée comparativement à leur œil non-amblyope, tel que précédemment observé (Bankó et al., 2013).

D'autre part, le présent essai vise aussi à fournir une première exploration de l'utilisation des orientations spatiales en perception de visages chez des participants amblyopes. La troisième expérience de cet essai (Chapitre IV) permet de répondre à cet objectif. En effet, les données de cette expérience, obtenues en utilisant la méthode des bulles d'orientation (Duncan et al., 2017), permettent d'observer le lien entre l'activité cérébrale (p. ex. amplitude et latence de la N170) et la présence de différentes orientations spatiales dans le stimulus, et ce pour l'œil amblyope et l'œil non-amblyope séparément. Notre hypothèse de travail est que l'œil amblyope ne sera pas en mesure d'extraire efficacement l'information contenue dans les orientations horizontales, ceci ayant un impact sur l'amplitude de la N170 (Jacques et al., 2014; Hashemi et al., 2019; Duncan et al., 2018) lorsque la tâche est effectuée avec cet œil.

CHAPITRE II : EXPÉRIENCE I

2.1. Participants

Neuf participants amblyopes (8 femmes) et 24 participants contrôles (16 femmes) âgés entre 18 et 62 ans ayant grandi au Canada, n'ayant aucun trouble de santé mentale connu et étant d'ethnie caucasienne ont été recrutés à l'Université du Québec en Outaouais ainsi que sur les réseaux sociaux pour cette expérience. Trois participants (2 femmes et 1 homme) ont dû être exclus après avoir obtenu leurs résultats optométriques (p. ex. absence d'amblyopie malgré un facteur amblyogène ou amblyopie alternante). Les examens de la vue ont été réalisés chez les optométristes respectifs de chaque participant amblyope et chacun d'entre eux a accepté de partager leurs résultats d'examen avec l'équipe de recherche. L'échantillon final du groupe d'amblyopes était donc composé de 6 participants (6 femmes). Une vision normale ou corrigée supérieure à 20/25 sur la charte de Snellen de l'œil non-amblyope et des deux yeux des participants contrôles était nécessaire pour participer à l'étude (voir Annexe A pour une description détaillée de l'outil). L'acuité visuelle de l'œil amblyope devait quant à elle être supérieure à 20/100. Les caractéristiques des participants amblyopes sont détaillées dans le Tableau 1. Cette recherche a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec en Outaouais. Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant de participer à la présente étude.

Tableau 1.

Caractéristiques des participants amblyopes ayant participé à la première expérience.

sujet	Type amblyopie	Œil amblyope	Âge/ Sexe	AV/OD	AV/OG	Rx/OD	Rx/OG
1	Aniso	OG	30/f	20/20	20/25	-	+2.75/- 1.50*10
2	Strab	OG	25/f	20/20	20/25-2	+3.25/- 2.00*15	+4.00/- 2.00*165

3	Aniso	OD	21/f	20/50-2	20/20	+2.00/- 1.50*145	+0.25
4	Strab	OD	21/f	20/40+2	20/20	+4.50/- 0.75*30	+2.75/- 0.25*175
5	Strab	OD	21/f	20/40+2	20/20	+3.00/- 4.25*173	+1.25/- 1.75*10
6	Aniso	OD	61/f	20/50	20/20	+1.25/- 1.50*103 add +2.5	-0.75/- 0.75*15 add +2.5

Note. Strab : strabique; Aniso : anisométrique; OG : œil gauche; OD : œil droit; f : femme; Rx : prescription selon l'examen optique;

2.2. Protocole expérimental

Les participants ont effectué l'ensemble des tâches en vision monoculaire. Les performances de l'œil amblyope ont été comparées aux performances de l'œil non-dominant des participants contrôles et les performances de l'œil non-amblyope ont été comparées à celles de l'œil dominant des participants contrôles. L'œil dominant des participants était déterminé à l'aide du test de la carte trouée (voir section 2.3). L'ordre des tâches était le même pour tous les participants, soit : reconnaissance de visages (voir section 2.4.1), reconnaissance d'objets (voir section 2.4.2), détection de visages, détection de voitures et détection de maisons (voir section 2.6). Chaque participant a donc effectué une tâche de reconnaissance de visages avec un œil, puis une deuxième tâche de reconnaissance de visages équivalente avec l'autre œil. Ce même protocole a été répété pour les tâches de reconnaissance d'objets, soit une première tâche avec un œil et une seconde tâche équivalente avec l'autre œil. Les tâches de détection de visages, voitures et maisons ont aussi été effectuées avec chaque œil, de manière indépendante. Chez les participants contrôles, les participants pairs ont entamé les différentes sections de l'expérience avec leur œil dominant tandis que les participants impairs commençaient avec leur œil non-dominant afin d'éviter un effet de l'œil dans les analyses (dominant/non-dominant) et ainsi contrebalancer l'œil avec lequel les différentes tâches ont été complétées (voir Figure 4). Les

participants amblyopes ont quant à eux toujours entamé les différentes sections avec leur œil non-amblyope (voir Figure 4). Une cache oculaire était fournie aux participants afin de bien isoler l'œil à l'étude.

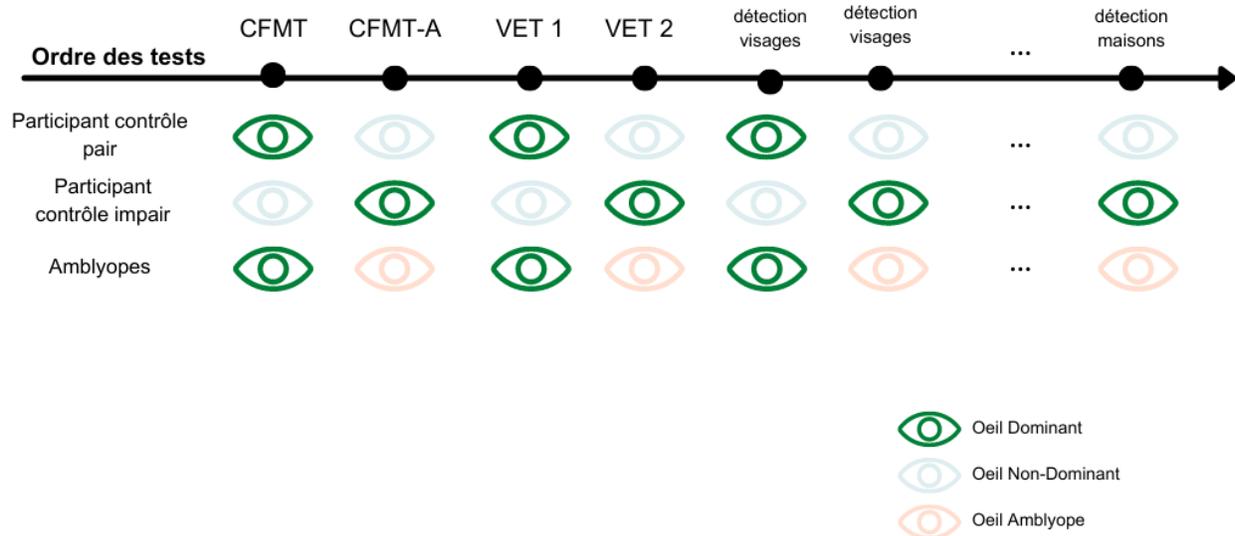


Figure 4. Déroulement de l'expérience pour les participants contrôles pairs, impairs et amblyopes. Les tâches se déroulaient dans le même ordre pour chaque participant. Toutefois, les participants contrôles pairs ont débuté les différentes sections avec leur œil dominant tandis que les participants contrôles impairs ont débuté avec leur œil non-dominant afin de contrebalancer l'œil avec lequel chaque test était effectué. Les participants amblyopes commençaient quant à eux chaque section de l'expérience avec leur œil dominant (non-amblyope). CFMT : Cambridge Face Memory Test (Duchaine et Nakayama, 2006); CFMT-A : Cambridge Face Memory Test-Australian (McKone et al., 2011); VET1 : première partie du Vanderbilt Expertise Test (VET; papillons, voitures, feuilles, motocyclettes; McGugin et al., 2012); VET2: deuxième partie du VET (champignons, hiboux, avions, échassiers).

2.3. Test de la carte trouée (Hole-in-card Test)

Le test de la carte trouée (Hole-in-card Test; Miles, 1929, 1930) permet de déterminer la dominance oculaire visuelle des participants, soit l'œil que le participant utilise le plus, de manière inconsciente, pour voir. Ce test est le plus simple et le plus rapide à administrer pour déterminer l'œil dominant des participants. Pour effectuer le test, le participant tient devant lui,

au bout de ses bras et avec ses deux mains, une carte dotée d'un petit trou en son centre. En ayant les deux yeux ouverts, il place au milieu de ce trou une cible visuelle dans la pièce (p. ex. un point sur un mur, une poignée de porte, etc.). En fermant chacun de ses deux yeux en alternance, l'œil dominant verra encore la cible tandis que l'œil non-dominant ne verra plus la cible. Cette procédure a été répétée jusqu'à ce que le participant perçoive la cible trois fois de suite avec le même œil.

2.4. Tests d'habiletés en reconnaissance de visages et d'objets

2.4.1. Cambridge Face Memory Test

Deux versions du Cambridge Face Memory Test, version originale (CFMT; Duchaine & Nakayama, 2006; voir Figure 5) et version australienne (CFMT-A; McKone et al., 2011), ont été administrées dans la présente étude afin de mesurer les habiletés en reconnaissance de visages des participants de façon indépendante dans chaque œil et ainsi éviter un effet d'apprentissage. Les participants contrôles pairs ont effectué le CFMT avec l'œil dominant et le CFMT-A avec l'œil non-dominant et les participants impairs ont fait l'inverse (voir Figure 4). Chez les participants amblyopes, le CFMT a été effectué avec l'œil non-amblyope et le CFMT-A a été utilisé dans l'œil amblyope (voir Figure 4). Dans chaque version de ce test, les participants doivent mémoriser six visages d'hommes présentés brièvement selon différents points de vue (de face, de profil $\frac{3}{4}$ vers la gauche et $\frac{3}{4}$ vers la droite). Les participants doivent ensuite reconnaître ces identités parmi des distracteurs (Duchaine & Nakayama, 2006). Au fil du test, du bruit visuel est ajouté aux visages cibles et aux distracteurs afin de rendre la tâche de plus en plus difficile (voir Figure 5D) permettant donc d'observer la facilité, ou bien la difficulté, avec laquelle les participants mémorisent et reconnaissent les visages.

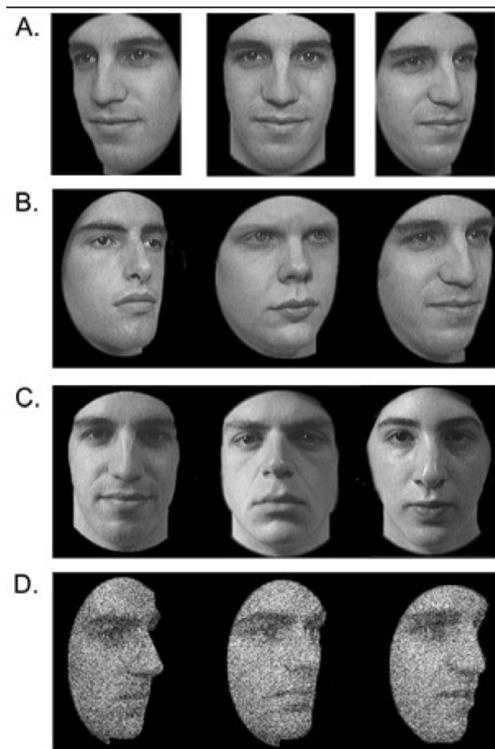


Figure 5. Exemple de stimuli du CFMT et des différentes conditions (Duchaine & Nakayama, 2006). A) Phase de mémorisation. Le participant doit mémoriser différents visages présentés dans différents angles. B)-D) Test de mémoire. Le participant doit identifier lequel parmi trois visages présentés correspond à un des visages appris. La difficulté augmente selon 3 niveaux de difficulté. B) premier niveau de difficulté, les images présentées sont les mêmes que celles utilisées dans la phase de mémorisation. C) deuxième niveau de difficulté, des photos différentes des mêmes individus sont présentées. D) troisième niveau de difficulté, du bruit est ajouté aux images.

2.4.2. Vanderbilt Expertise Test

Le Vanderbilt Expertise Test (VET) est une tâche qui mesure la capacité à reconnaître des exemplaires visuellement similaires de huit catégories d'objets : papillons, voitures, feuilles, motocyclettes, champignons, hiboux, avions et échassiers (McGugin et al., 2012). Le test est divisé en huit blocs, chaque bloc étant associé à une des huit catégories d'objets. Ainsi, les participants contrôles pairs ont effectué les quatre premières catégories (papillons, voitures, feuilles, motos) avec l'œil dominant et les quatre dernières (champignons, hiboux, avions,

échassiers) avec l'œil non-dominant tandis que les participants impairs ont fait l'inverse. Les participants amblyopes ont quant à eux effectué les quatre premiers blocs de ce test avec l'œil non-amblyope et les quatre derniers avec l'œil amblyope. Une présentation d'objets différents aux deux yeux élimine la possibilité d'un apprentissage et permet ainsi de mesurer la capacité de chaque œil en reconnaissance d'objets de façon indépendante. Au fil du test, les arrière-plans des cibles et des distracteurs changent afin de rendre la tâche de plus en plus difficile (voir Figure 6) permettant donc d'observer la facilité, ou bien la difficulté, avec laquelle les participants mémorisent et reconnaissent différentes catégories d'objets.

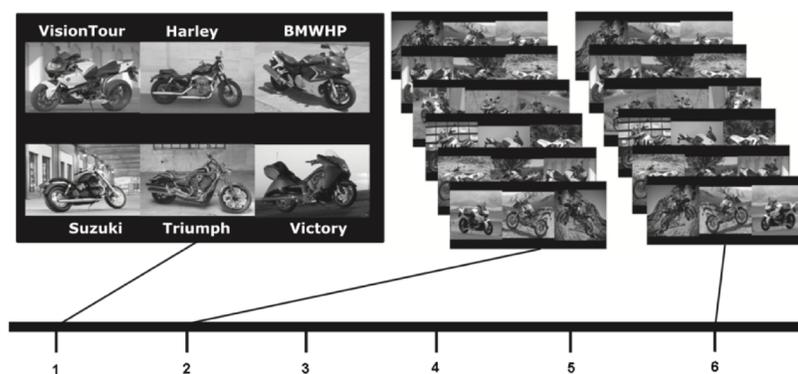


Figure 6. Vanderbilt Expertise Test. Test d'habiletés de reconnaissance d'objets de diverses catégories (hiboux, feuilles, champignons, échassiers, voitures, motocyclettes, avions et papillons). Déroulement du test, exemple avec les motocyclettes. 1) Le participant commence par mémoriser un ensemble de 6 motocyclettes. 2) Six essais de pratique lui sont fournis avec une rétroaction. 3) Le participant revoit et remémorise le même ensemble de 6 motocyclettes. 4) six nouveaux essais de pratique lui sont fournis avec une rétroaction. 5) Le participant mémorise une dernière fois les six motocyclettes. 6) 36 essais avec des exemplaires de motocyclettes différents sont présentés au participant et le participant doit se rappeler quels étaient les exemplaires à l'étude et répondre à l'aide des touches du clavier. Image tirée de l'article original (McGugin et al., 2012).

2.5. Matériel et Stimuli

Les stimuli étaient présentés sur un écran à cristaux liquides (liquid crystal display; LCD) calibré ayant une résolution de 1080p avec un taux de rafraîchissement de 60 hertz (Hz). Trois participants ont fait l'étude sur un MacBook Pro calibré ayant une résolution de 2880x1800 et un taux de rafraîchissement de 60Hz. La distance entre les yeux du participant et l'écran d'ordinateur était maintenue constante à l'aide d'une mentonnière. Les tâches de reconnaissance de visages et d'objets étaient les tâches originales et les stimuli couvraient environ 5.2 degrés d'angle visuel. Les tâches expérimentales de détection ont quant à elles été programmées en MATLAB avec des fonctions de la PsychToolbox (Brainard, 1997; Kleiner et al., 2007; Pelli, 1997).

Pour les tâches de détection, vingt photographies de visages provenant de la banque de visages de Karolinska (Lundqvist et al., 1998), vingt images de voitures (Goffaux et al., 2003) et vingt images de maisons (banque de stimuli maison) ont été sélectionnées. Ces images ont toutes été converties en tons de gris d'une dimension de 256x256 pixels et ont été présentées aux participants à une distance de sorte que les stimuli couvraient 6.5 degrés d'angle visuel. Toutes les photos ont été filtrées à l'aide de la SHINE toolbox pour MATLAB (Willenbockel et al., 2010) afin d'égaliser la luminance et l'énergie dans les différentes fréquences spatiales. Cette manipulation est effectuée afin d'éliminer l'impact possible des caractéristiques visuelles de bas niveau sur les résultats. Les stimuli faciaux ont également été alignés afin que les traits des visages (c.-à-d. les yeux, le nez et la bouche) se situent approximativement au même endroit sur l'écran. Un ovale a aussi été surimposé aux visages afin d'éliminer les traits physiques externes au visage (p. ex. cheveux et oreilles).

2.5.1. Tâches de détection

Les participants ont effectué trois tâches expérimentales de choix forcé à deux intervalles (2-IFC) où deux images étaient présentées l'une après l'autre pendant 100 millisecondes chacune (voir Figure 7). Entre les deux stimuli ainsi qu'après la présentation du deuxième stimulus, une plage de bruit blanc variable à chaque 10 ms était présentée pour une durée totale de 50 ms servant de masque visuel. Cette procédure permet d'éviter une rémanence visuelle de l'image (Gerling & Spillmann, 1987). À la fin de chaque essai, le participant devait indiquer si le stimulus cible (visage, voiture ou maison) était présenté en premier ou en deuxième à l'aide des touches du clavier. Les différentes catégories de stimuli ont été présentées en blocs et le participant était informé du stimulus cible (visage, voiture ou maison) avant de débiter le bloc. Chaque participant a exécuté les trois tâches de détection (visage, voiture et maison) sous deux conditions expérimentales : avec l'œil non-amblyope (dominant pour les participants contrôles) et avec l'œil amblyope (non-dominant pour les participants contrôles). Ces deux conditions nous permettent de vérifier le seuil de détection de visages, de voitures et de maisons de l'œil non-amblyope (dominant) et l'œil amblyope (non-dominant) de manière indépendante. L'algorithme QUEST (Watson & Pelli, 1983) estimait à chaque essai le meilleur ratio signal-sur-bruit en manipulant la cohérence de l'image (voir section 2.7 sur la manipulation expérimentale) permettant un taux de bonne réponse de 75% à l'essai suivant, soit à mi-chemin entre la performance parfaite (100%) et le hasard (50%), et ce de manière indépendante pour chacune des

catégories de stimuli et chaque œil. Ainsi, le ratio signal-sur-bruit obtenu à la fin de l'expérience représente le seuil de détection de l'œil à l'étude, et ce pour chaque type de stimulus.

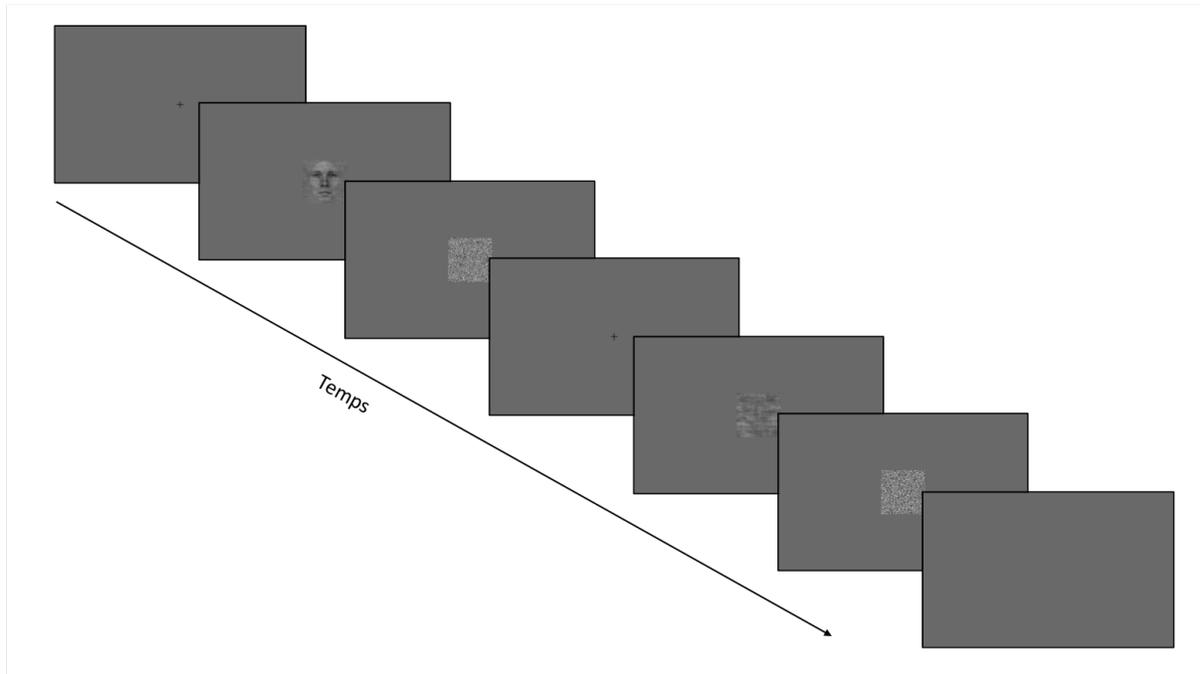


Figure 7. Tâche de détection. Le participant doit indiquer si le stimulus cible (visage, voiture ou maison) a été présenté en premier ou en deuxième en appuyant sur les touches de clavier correspondantes. Exemple de la condition visage présentée ci-haut.

2.5.2. Manipulation expérimentale

Un des objectifs de l'expérience étant de connaître la sensibilité des participants en détection de visages, une randomisation de phase était appliquée aux stimuli afin d'intégrer du bruit visuel. La quantité de bruit visuel était ajustée selon la performance du participant (voir Figure 8). Ainsi, d'après la méthode de Dakin et al. (2002), l'image présentée a subi une transformation de Fourier afin de diviser son signal en son spectre de phase et son spectre d'énergie (pour une description détaillée, voir Burns (2019)).

Les stimuli ont été générés selon la procédure suivante : une partie du spectre de la phase originale est d'abord randomisée dans le but de créer un spectre de phase synthétique (voir Figure 8). La proportion de la phase originale de l'image présente dans le spectre de phase synthétique est déterminée d'après la performance du participant avec l'algorithme QUEST (Watson & Pelli, 1983). Plus le participant est bon pour détecter le stimulus, moins la proportion de la phase originale de l'image sera grande dans le spectre de phase synthétique pour que le participant atteigne 75% de bonnes réponses. Cette proportion est calculée pour chaque œil (amblyopes : non-amblyope, amblyope; contrôles : dominant, non-dominant) et dans chaque catégorie indépendamment (visage, voiture et maison). Dans cette expérience, le ratio signal-sur-bruit (la sensibilité du participant) est déterminé par la proportion de la phase synthétique attribuée à l'image originale (signal) et celle attribuée à la randomisation de la phase (bruit). Une fois le spectre de phase synthétique pondéré d'après la performance du participant, il est combiné à la moyenne du spectre d'énergie de tous les stimuli confondus (visages, voitures et maisons) afin de créer un nouveau stimulus à l'aide d'une transformée inverse de Fourier. Ainsi, chaque stimulus présenté contient un spectre de phase synthétique dépendant de la performance du participant ainsi que l'énergie moyenne de toutes les images confondues. Le spectre d'énergie est donc toujours le même pour tous les stimuli et ne peut ainsi pas expliquer la présence de sensibilités différentes entre les catégories de stimuli. Le distracteur présenté consistait à l'application d'une transformée de Fourier inverse sur la phase randomisée (bruit complet sans stimulus) et la moyenne des spectres d'énergie.

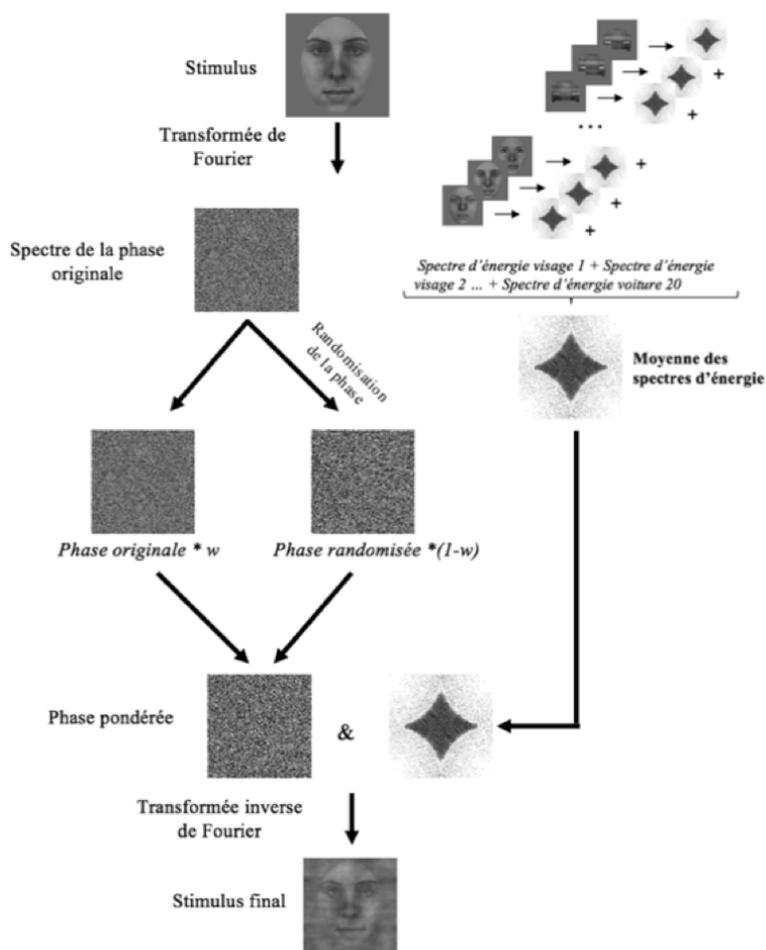


Figure 8. Schéma de la méthode de la randomisation pondérée du spectre de la phase. À gauche est présentée la création du spectre de phase synthétique en additionnant une proportion de la phase originale avec du bruit visuel. En haut à droite se trouve l'addition des spectres d'énergie des visages, des voitures et des maisons afin d'obtenir un seul spectre d'énergie moyen qui sera appliqué à tous les stimuli et devenant ainsi non informatif pour la tâche de détection. Image tirée de Burns (2019).

2.6. Résultats et discussion

Un premier test-t pour échantillons indépendants a été effectué afin de vérifier s'il existe une différence d'âge entre les participants amblyopes et les participants contrôles. L'analyse ne révèle aucune différence significative entre l'âge des participants amblyopes (29.83 ± 15.68) et celle des participants contrôles (24.92 ± 8.47), $t(28) = -1.06$, $p = .3$.

Une seconde analyse a été effectuée afin de vérifier la présence d'une différence de difficulté entre le CFMT et le CFMT-A. La performance de chaque participant contrôle aux deux tests a donc été comparée de façon intra-participant. Un test-t pour échantillon apparié ne révèle pas de différence significative entre les résultats au CFMT et au CFMT-A, $t(23) = .241$, $p = .812$. Il est ainsi possible de comparer la performance d'un participant contrôle à un test (p. ex. CFMT) avec la performance d'un autre participant à l'autre test (p. ex. CFMT-A) dans les analyses subséquentes. Ceci signifie qu'une différence entre la performance d'un participant amblyope au CFMT-A dans l'œil amblyope et, par exemple, des participants contrôles au CFMT dans l'œil non-dominant ne peut s'expliquer par une différence entre les deux tests. Une analyse identique a été menée en comparant la performance des participants contrôles à la première partie du VET (VET1 : papillons, voitures, feuilles, motocyclettes) à celle de la deuxième partie (VET2: champignons, hiboux, avions, échassiers). Un test-t pour échantillon apparié révèle une différence significative entre les deux parties du VET, $t(23) = -4.032$, $p = .001$. La performance des participants contrôles dans la deuxième partie du test est plus faible que dans la première partie. Toutefois, notons que la performance des participants aux deux parties du test corrèle positivement, $r = .771$, $p < .001$. Ceci implique que si un participant performe bien à la première partie du VET, sa performance à la seconde partie sera aussi élevée, et vice versa. À la suite de cette analyse et afin de faciliter la comparaison des tâches entre elles dans les analyses subséquentes, les résultats à l'ensemble des tâches de reconnaissance ont été z-scorés. Une analyse par catégorie a ensuite été effectuée chez l'ensemble des participants (amblyopes et contrôles) afin de vérifier l'impact de chaque catégorie d'objets sur la performance globale au VET. Ainsi, la performance de chaque participant dans chacune des catégories présentes dans le VET a été z-scorée et les valeurs aberrantes, soit au-delà de $|2.5|$ écart-type (E.T.), ont été éliminées. À titre informatif, seulement deux participants ont obtenu un score au-delà de ce seuil,

et ce dans une seule catégorie d'objet chacun. Un score par œil a ensuite été calculé pour déterminer la performance moyenne de chaque participant aux deux parties du VET. Le score de performance moyen de chaque œil a été réalisé en faisant la moyenne des z-scores des quatre catégories pour chaque partie du test séparément (c.-à-d. moyenne des z-scores des quatre premières catégories d'objets pour un œil et moyenne des z-scores des quatre dernières catégories pour l'autre œil). Le score moyen obtenu pour chaque œil (dominant et non-dominant/amblyope) a été utilisé dans les analyses subséquentes comme score d'habileté en reconnaissance d'objets.

2.6.1 Méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise

Afin de vérifier si l'amblyopie a un impact sur la sensibilité de l'œil amblyope et de l'œil non-amblyope en détection ainsi qu'en reconnaissance de visages et d'objets, la performance des participants amblyopes a été comparée à celles des participants contrôles dans chacune des tâches. Pour ce faire, la méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise, ou *bootstrap*, a été utilisée puisqu'elle permet de déterminer les intervalles de confiance d'une population à partir d'un échantillon de départ. Étant donné le petit nombre de participants amblyopes, cette analyse a été effectuée dans l'optique de comparer la performance des participants amblyopes à l'intervalle de confiance créé par les *bootstraps* chez les participants contrôles. L'œil amblyope a ainsi été comparé à l'intervalle de confiance créé avec la performance de l'œil non-dominant des participants contrôles et l'œil non-amblyope a été comparé à la performance de l'œil dominant de l'échantillon contrôle. Cette analyse permet de vérifier si les résultats obtenus par l'échantillon de participants amblyopes sont simplement dus au hasard (leur performance moyenne se trouvera à l'intérieur de l'intervalle de confiance) où s'ils sont significativement différents de la population normale (leur performance moyenne se trouvera à l'extérieur de l'intervalle de confiance). La procédure d'analyse utilisée pour créer un intervalle de confiance pour chacune des tâches

(reconnaissance de visage, reconnaissance d'objet, détection de visages, de voitures et de maisons) dans chacune des conditions (œil dominant et œil non-dominant), était la suivante : *premièrement*, un vecteur de performance a été créé à partir des résultats de l'échantillon de participants contrôles dans les différentes tâches (p.ex. vecteur des performances en reconnaissance de visages avec l'œil dominant). *Deuxièmement*, ce vecteur a été z-scored afin de pouvoir subséquemment comparer les vecteurs entre eux dans des analyses ultérieures. *Troisièmement*, 10 000 *bootstraps* avec remise ont été effectués à partir du vecteur z-scored afin de créer 10 000 échantillons différents de 6 participants à partir des 24 participants contrôles. Ceci nous permet d'estimer la distribution de la population normale pour chaque tâche effectuée, et ce pour l'œil dominant et non-dominant séparément. *Quatrièmement*, les moyennes des résultats de chacun des 10 000 échantillons ont été calculées puis classées en ordre croissant (p. ex. moyenne de chacun des 10 000 échantillons de 6 participants créés par *bootstrap* des 24 participants contrôles en reconnaissance de visages avec l'œil dominant). Étant donné notre hypothèse que les participants amblyopes sont moins bons que les participants contrôles pour l'ensemble des tâches, seulement un côté de la distribution a été utilisé pour créer l'intervalle de confiance. Ainsi, la valeur critique de l'intervalle de confiance est la valeur du vecteur des moyennes correspondant au 5% le plus faible des 10 000 échantillons, soit la 500e valeur sur le vecteur une fois les moyennes mises en ordre croissant. Pour les tâches de détection de visages, voitures et maisons, un ratio signal-sur-bruit (SNR) plus haut signifie une sensibilité plus faible de l'œil. Un SNR plus élevé est donc associé à un z-score plus élevé. Ainsi, pour faciliter l'interprétation des résultats, les z-scores ont été inversés pour les tâches de détection. La moyenne de performance des participants amblyopes a donc été comparée à la valeur inférieure de l'intervalle de confiance (500e valeur) pour l'ensemble des tâches de détection et de reconnaissance, permettant de déterminer si les amblyopes s'insèrent dans la courbe normale (moyenne des résultats de

l'échantillon au-delà de la 500e valeur du vecteur) ou s'ils se trouvent à l'extérieur de cet intervalle de confiance (p. ex. performance en deçà de la valeur minimale de l'intervalle de confiance). L'ensemble des résultats de ces analyses se trouvent dans le Tableau 2.

2.6.2. Détection de visages et d'objets

En détection de visages, de voitures et de maisons, la moyenne du niveau de signal nécessaire pour effectuer la tâche avec l'œil amblyope s'est retrouvée à l'extérieur de l'intervalle de confiance créé avec l'œil non-dominant des participants contrôles, et ce dans les trois tâches (voir Tableau 2). Ceci indique que les participants amblyopes ont besoin de significativement plus de signal, donc sont moins sensibles, pour détecter les trois types de stimuli avec leur œil amblyope que les participants contrôles avec leur œil non-dominant. La moyenne de niveau de signal nécessaire à l'œil non-amblyope en détection de visages et de voitures se situe à l'extérieur de l'intervalle de confiance créé avec l'œil dominant des participants contrôles pour les deux catégories visuelles. Ceci suggère que les participants amblyopes sont moins sensibles que les participants contrôles en détection de visages et de voitures avec leur œil non-amblyope. Toutefois, le niveau de signal nécessaire pour détecter une maison avec l'œil non-amblyope s'inscrit dans l'intervalle de confiance, indiquant que la sensibilité de l'œil non-amblyope n'est pas significativement différente de celle de l'œil dominant de la population générale pour détecter des maisons.

2.6.3. Reconnaissance de visages et d'objets

Dans les tâches de reconnaissance de visages, la moyenne des performances des participants amblyopes avec leur œil amblyope et leur œil non-amblyope s'est retrouvée à l'extérieur de l'intervalle de confiance créé à partir de la performance des participants contrôles

(voir Tableau 2). Ceci suggère que les participants amblyopes ont plus de difficulté que la population normale à reconnaître des visages lors d'une tâche en vision monoculaire tant avec leur œil amblyope qu'avec leur œil non-amblyope. En reconnaissance d'objets, la moyenne des performances de l'œil amblyope s'est aussi retrouvée à l'extérieur de l'intervalle de confiance, suggérant que les participants amblyopes ont plus de difficulté à reconnaître différentes catégories d'objets avec leur œil amblyope que la population normale avec leur œil non-dominant. Toutefois, la moyenne des performances de l'œil non-amblyope s'est retrouvée à l'intérieur de l'intervalle de confiance en reconnaissance d'objets. Les participants amblyopes seraient donc en mesure de reconnaître des objets avec leur œil non-amblyope aussi bien que les participants contrôles avec leur œil dominant.

Tableau 2.

Résultats des analyses par la méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise pour les tâches de détection et de reconnaissance.

Tâche	Moyenne œil amblyope (min et max)	Intervalle de confiance de l'œil non-dominant contrôles	Moyenne œil non-amblyope (min et max)	Intervalle de confiance de l'œil dominant contrôles
Détection visages (SNR)	-0.79* (-1.94, 0.09)	] -0.52, 1.21]	-0.51* (-1.56, 0.11)	] -0.45, 1.79]
Détection voitures (SNR)	-1.04* (-2.02, 0.2)	] -0.55, 1.71]	-0.81* (-1.14, -0.57)	] -0.16, 1.53]
Détection maisons (SNR)	-0.89* (-1.62, 0.75)	] -0.50, 1.34]	-0.11 (-1.94, 1.02)	] -0.47, 1.55]
Reconnaissance visages (performance)	-1.17* (-1.70, -0.85)	] -0.25, 1.30]	-0.83* (-2.07, 0.09)	] -0.5, 1.23]
Reconnaissance objets (performance)	-0.52* (-2.44, 0.57)	] -0.29, 0.92]	-0.17 (-0.77, 1.41)	] -0.51, 1.03]

Note. * $p < .05$: Moyenne des performances à l'extérieur de l'intervalle de confiance, donc significativement différente de l'échantillon contrôle.

Bien que cette expérience soit exploratoire, les résultats suggèrent que les participants amblyopes ont de la difficulté tant en détection qu'en reconnaissance de visages et d'objets lorsqu'ils effectuent les tâches avec leur œil amblyope. Des difficultés sont aussi présentes dans l'œil non-amblyope en détection de visages et de voitures ainsi qu'en reconnaissance de visages. Afin de vérifier la présence d'une interaction entre le type de stimulus visuel à détecter/reconnaitre (visage ou objets) et l'œil utilisé pour la tâche (amblyope vs non-amblyope), un score de différence visage-objet a été calculé en détection ainsi qu'en reconnaissance (voir Figure 9). Cette analyse permet de vérifier si les difficultés soulevées en détection ainsi qu'en reconnaissance sont plus importantes avec des visages qu'avec des objets ou si elles sont similaires pour l'ensemble des stimuli. La procédure a été répétée à trois reprises, et ce pour chaque œil, donc six fois en tout : détection de visages vs détection de maisons, détection de visages vs détection de voitures, reconnaissance de visages vs reconnaissance d'objets. Les résultats se trouvent dans le Tableau 3. La procédure était la suivante pour chaque comparaison (voir Figure 9) : *premièrement*, la moyenne (M) des z-scores des 24 participants contrôles a été calculée (M1). *Deuxièmement*, cette moyenne a ensuite été comparée à la moyenne de chacun des 10 000 bootstraps afin de créer un vecteur de différence ($\Delta_{\text{visage1 à 10 000}}$; $\Delta_{\text{objet1 à 10 000}}$) entre la moyenne de l'échantillon contrôle et les moyennes de chacun des bootstraps. Cette même moyenne (M1) a aussi été comparée à celle de l'échantillon amblyope (Ma), créant un score de différence entre la performance moyenne des 24 participants contrôles et celle des participants amblyopes ($\Delta_{\text{visage_amblyope}}$; $\Delta_{\text{objet_amblyope}}$). *Troisièmement*, le vecteur de différence pour les visages ($\Delta_{\text{visage1 à 10 000}}$) a été comparé au vecteur de différence des objets ($\Delta_{\text{objet1 à 10 000}}$), afin de créer un intervalle de confiance de différence visage-objet (Δ_{IC}). Le même processus a aussi été effectué pour les amblyopes: le vecteur de différence contrôles-amblyopes pour les visages ($\Delta_{\text{visage_amblyope}}$) a été comparé au vecteur de différence contrôles-

amblyopes pour les objets ($\Delta_{\text{objet_amblyope}}$), et ce pour l'œil amblyope et non-amblyope séparément, créant un score de différence visage-objet (Δ_{amblyope}) pour chaque œil, et pour chaque tâche. *Quatrièmement*, ce résultat de la comparaison visage-objet chez les amblyopes (Δ_{amblyope}) a été comparé à la valeur supérieure de l'intervalle de confiance de différence (9500e valeur), car une plus grande valeur signifie une plus grande différence de performance entre les visages et les objets.

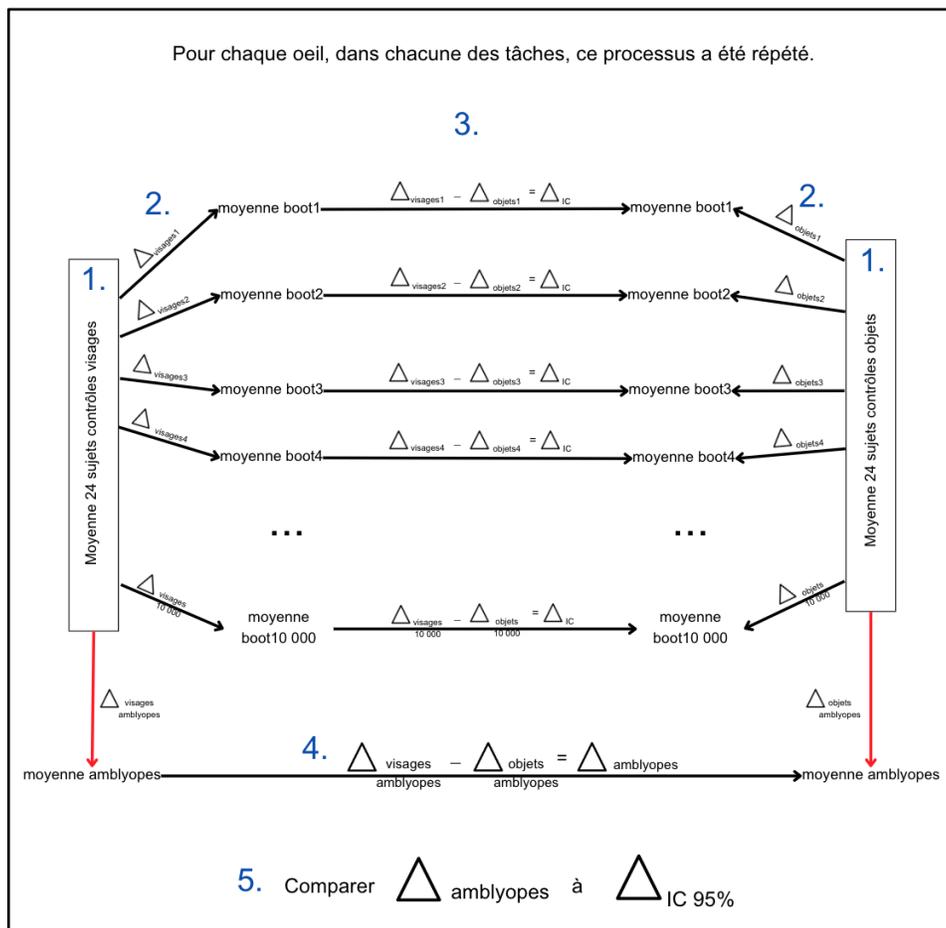


Figure 9. Procédure d'analyse de différence entre les visages et les objets dans les tâches de détection et de reconnaissance. 1) Calcul de la moyenne de performance des 24 participants contrôles 2) Comparaison de cette moyenne à la moyenne de chaque *bootstrap*, créant un vecteur de différence contrôle-bootstrap; La moyenne est aussi comparée à la moyenne des participants amblyopes 3) Comparaison de la différence contrôle-bootstrap visage à celle obtenue avec les objets pour créer un intervalle de confiance de différence de performance 4) Comparaison de la différence contrôle-amblyope visage à la différence contrôle-amblyope objet, créant un score de différence 5) comparaison du résultat obtenu en 4) avec l'intervalle de confiance obtenu en 3).

L'analyse de différence ne révèle aucune interaction significative lorsqu'on compare les résultats en détection de visages aux résultats en détection de maisons et de voitures et ce pour l'œil amblyope et l'œil non-amblyope. Ces résultats suggèrent que les participants amblyopes ne sont pas moins sensibles pour détecter des visages que des objets. Toutefois, une interaction significative a été soulevée dans l'œil amblyope ainsi que dans l'œil non-amblyope dans les tâches de reconnaissance. Ainsi, la différence de performance entre la reconnaissance de visages et la reconnaissance d'objets avec l'œil amblyope est significativement plus grande que la différence de performances obtenue par l'œil non-dominant des participants contrôles. Cette différence de performance est aussi observée dans l'œil non-amblyope comparativement à l'œil dominant de l'échantillon contrôle. Les participants amblyopes ont donc plus de difficultés en reconnaissance de visages qu'en reconnaissance d'objets lorsqu'ils effectuent les tâches avec leur œil amblyope ou avec leur œil non-amblyope. Ceci suggère que les résultats obtenus par les participants amblyopes dans la première analyse ne s'expliquent pas simplement par une faiblesse visuelle générale de l'œil amblyope, mais bien par la présence de difficultés en reconnaissance de visages.

Tableau 3.

Résultats de l'analyse sur la différence de performance entre les visages et les objets en détection et en reconnaissance, et ce pour l'œil amblyope et l'œil non-amblyope.

Tâche	Moyenne œil amblyope (z-score)	IC œil non-dominant contrôles (z-score)	Moyenne œil non-amblyope (z-score)	IC œil dominant contrôles (z-score)
Différence visage-maison (détection)	-0.16 p = .64	[-1.73, 0.79[	0.53 p = .2	[-2.15, 0.99[
Différence visage-voiture (détection)	-0.32 p = .73	[-1.99, 0.87[	-0.33 p = .72	[-2.11, 0.95[
Différence	0.89*	[-0.85, 0.53[	0.77*	[-1.19, 0.60[

visage-objet (reconnaissance)	p =.01	p =.02
----------------------------------	--------	--------

Note. * $p < .05$: Moyenne des performances à l'extérieur de l'intervalle de confiance, donc significativement différente de l'échantillon contrôle.

La première expérience avait comme premier objectif de vérifier l'impact comportemental de la sous-activation précédemment observée de l'aire fusiforme faciale chez les participants amblyopes (Lerner et al., 2003) en étudiant la sensibilité de l'œil amblyope et de l'œil non-amblyope en détection de visages. En utilisant une méthode développée par Xu et Biederman (2014), le ratio signal-sur-bruit nous a permis d'évaluer la sensibilité de l'œil amblyope et non-amblyope de façon indépendante, ceci permettant d'observer si le développement atypique du système visuel a un impact sur les capacités en détection de visages et d'objets à l'âge adulte. Les performances des participants amblyopes ont été comparées à ceux d'un groupe contrôle en utilisant la méthode d'échantillonnage aléatoire avec remise. Les résultats de nos analyses suggèrent un impact des expériences visuelles précoces tant sur les capacités en détection de visages que sur celles en détection d'objets. Plus précisément, l'œil amblyope et non-amblyope ont besoin de plus de signal que l'œil non-dominant et dominant des participants contrôles respectivement, tant pour détecter des visages que pour détecter des objets. Mis ensemble, ces résultats suggèrent que les expériences visuelles précoces ont un impact sur les capacités à détecter un stimulus visuel. Toutefois, une différence au niveau de la sensibilité de l'œil non-amblyope selon la catégorie d'objet à détecter est observée. En effet, l'œil non-amblyope semble aussi sensible que l'œil dominant des participants contrôles lorsqu'il doit détecter des maisons. Ces derniers résultats suggèrent donc que l'utilisation d'objets différents d'une étude à l'autre chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont atypiques pourrait avoir un impact sur les résultats obtenus, en particulier si une seule catégorie d'objets est utilisée comme stimulus contrôle dans une étude en perception de visages.

Le second objectif de cette première expérience était de mieux comprendre l'impact des expériences visuelles précoces sur le développement des habiletés en reconnaissance de visages en comparant la performance de participants amblyopes à des participants contrôles. Afin de vérifier si les résultats obtenus sont différents pour les visages que pour d'autres objets ou s'ils sont plutôt d'ordre général, les capacités en reconnaissance de visages ont été comparées à celles en reconnaissance d'objets. Plusieurs catégories d'objets ont été utilisées afin d'éviter l'effet d'une seule catégorie d'objet sur les résultats. Cette expérience suggère que lorsque les participants amblyopes effectuent les tâches avec leur œil amblyope, des difficultés en reconnaissance de visages ainsi qu'en reconnaissance d'objets semblent émerger. Les difficultés présentes en reconnaissance de visages semblent toutefois plus grandes que celles en reconnaissance d'objets lorsqu'on les compare directement. Avec l'œil non-amblyope, seules des difficultés en reconnaissance de visages sont soulevées tandis que la reconnaissance d'objets s'avère normale. Contrairement à l'étude de Lerner et al. (2003), un déficit en reconnaissance d'objets dans l'œil amblyope a été retrouvé dans la présente étude. Dans leur étude, Lerner et ses collaborateurs ont comparé la reconnaissance de visages à la reconnaissance de bâtiments. Les participants amblyopes performaient aussi bien avec l'œil amblyope qu'avec l'œil non-amblyope lorsqu'ils devaient reconnaître un bâtiment connu et dire à quelle catégorie il appartenait (p. ex. privé ou endroit public) tandis que l'œil amblyope était déficitaire comparé à l'œil non-amblyope lorsqu'ils devaient reconnaître une personne connue ainsi que son expression faciale d'émotion (p. ex. joie, neutre ou tristesse). Plusieurs aspects différencient les tâches effectuées dans la présente étude de celles utilisées dans l'étude de Lerner et al. (2003). Tout d'abord, nos tâches sont plus complexes que celles de Lerner et coll. (2003), car elles requièrent non seulement des capacités de reconnaissance, mais aussi de mémorisation puisque les participants doivent apprendre à reconnaître plusieurs nouveaux stimuli appris en laboratoire plutôt que des stimuli

auxquels ils ont été grandement exposés. Reconnaître des stimuli déjà connus et emmagasinés en mémoire aurait donc pu masquer la présence de déficits dans les processus de mémorisation dans l'étude de Lerner et coll. (2003). Deuxièmement, les tâches que nous avons sélectionnées sont des tâches standardisées qui sont largement utilisées dans le domaine de la reconnaissance de visage et d'objets. Ainsi, les demandes entre la tâche de reconnaissance de visages et celle de reconnaissance d'objets sont grandement similaires (p. ex. nombre d'identités à mémoriser, nombre de distracteurs, variabilité intra-catégorie, séquence d'apprentissage), ce qui permet de mieux les comparer.

La première expérience suggère donc, de façon exploratoire, la présence de difficultés en reconnaissance de visages chez des participants amblyopes. Ces déficits comportementaux pourraient être le reflet de modifications des processus neuronaux associés à la perception des visages à la suite d'un développement visuel atypique chez les amblyopes. Toutefois, peu d'études ont été menées jusqu'à présent sur l'impact des expériences visuelles précoces sur l'activité des régions cérébrales associées à la perception des visages (voir toutefois Lerner et al., 2003; Kelly et al., 2019) et des processus neurophysiologiques associés comme la N170 (Bankó et al., 2013). Le peu d'études menées chez des amblyopes a cependant souligné la présence d'anomalies dans le traitement neuronal des visages associé à l'œil amblyope. Ainsi, l'objectif de la seconde expérience vise à explorer et mieux comprendre les conséquences des expériences visuelles précoces sur les processus neurophysiologiques associés à la perception des visages. Plus précisément, l'objectif est d'étudier l'impact de l'amblyopie sur la latence et l'amplitude de la N170 en plus d'essayer de reproduire les résultats précédemment observés par Bankó et al. (2013). Pour ce faire, l'activité cérébrale a été enregistrée à l'aide d'un EEG pendant une tâche de catégorisation de sexe.

CHAPITRE III : EXPÉRIENCE II

3.1. Participants

Cinq participantes amblyopes et 10 participants contrôles (5 femmes) âgés entre 21 et 61 ans et ayant grandi au Canada, n'ayant aucun trouble de santé mentale connu et étant d'ethnie caucasienne ont été recrutés pour cette expérience. Tous les participants ont aussi pris part à la première expérience. Une vision normale ou corrigée, soit un résultat égal ou supérieur à 20/25 sur la charte de Snellen, dans l'œil non-amblyope et dans les deux yeux des participants contrôles était nécessaire pour participer à l'étude. L'acuité visuelle de l'œil amblyope devait quant à elle être supérieure à 20/100. Les caractéristiques des participants amblyopes sont détaillées dans le Tableau 4. Cette recherche a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec en Outaouais. Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant de participer à la présente étude.

Tableau 4.

Caractéristiques des participants amblyopes ayant participé à la deuxième expérience.

sujet	Type amblyopie	Œil amblyope	Âge/ Sexe	AV/OD	AV/OG	Rx/OD	Rx/OG
1	Aniso	OG	30/f	20/20	20/25	-	+2.75/- 1.50*10
2	Strab	OG	25/f	20/20	20/25-2	+3.25/- 2.00*15	+4.00/- 2.00*165
3	Strab	OD	21/f	20/40+2	20/20	+4.50/- 0.75*30	+2.75/- 0.25*175
4	Strab	OD	21/f	20/40+2	20/20	+3.00/- 4.25*173	+1.25/- 1.75*10
5	Aniso	OD	61/f	20/50	20/20	+1.25/- 1.50*103 add +2.5	-0.75/- 0.75*15 add +2.5

Note. Strab : strabique; Aniso : anisométrique; OG : œil gauche; OD : œil droit; f : femme; Rx : prescription selon l'examen optique;

3.2. Matériel et stimuli

Les stimuli étaient présentés sur un écran Vpixx calibré ayant une résolution de 1080p avec un taux de rafraîchissement de 120 Hz. La distance entre les participants et l'écran d'ordinateur était maintenue constante à l'aide d'une mentonnière. Une cache oculaire était fournie au participant afin d'isoler facilement l'œil à l'étude. La tâche expérimentale a été programmée en MATLAB à l'aide de la PsychToolbox (Brainard, 1997; Kleiner et al., 2007; Pelli, 1997).

Trente-deux photographies de visages (8 femmes et 8 hommes; 2 expressions faciales (neutre et joie)) ont été sélectionnées pour cette expérience. Elles ont toutes été converties en tons de gris d'une dimension de 256x256 pixels et ont été présentées aux participants à une distance permettant de couvrir 6 degrés d'angle visuel. Toutes les photos ont été filtrées à l'aide de la SHINE toolbox pour MATLAB (Willenbockel et al., 2010) afin d'égaliser la luminance et l'énergie pour les différentes fréquences spatiales. Cette manipulation est effectuée afin d'éliminer l'impact possible des caractéristiques visuelles de bas niveau des stimuli sur les résultats. Les stimuli faciaux ont également été alignés afin que les traits des visages (c.-à-d. les yeux, le nez et la bouche) se situent approximativement au même endroit sur l'écran. Un ovale a aussi été surimposé aux visages afin d'éliminer les traits physiques externes au visage (p. ex. cheveux et oreilles).

3.3. Procédure

Les participants ont effectué une tâche de catégorisation de sexe où le stimulus était présenté pendant 250 millisecondes (voir Figure 10). À la fin de chaque essai, le participant

devait indiquer si le stimulus présenté était un homme ou une femme à l'aide des touches du clavier. Les participants ont effectué 384 essais (192 essais par œil).

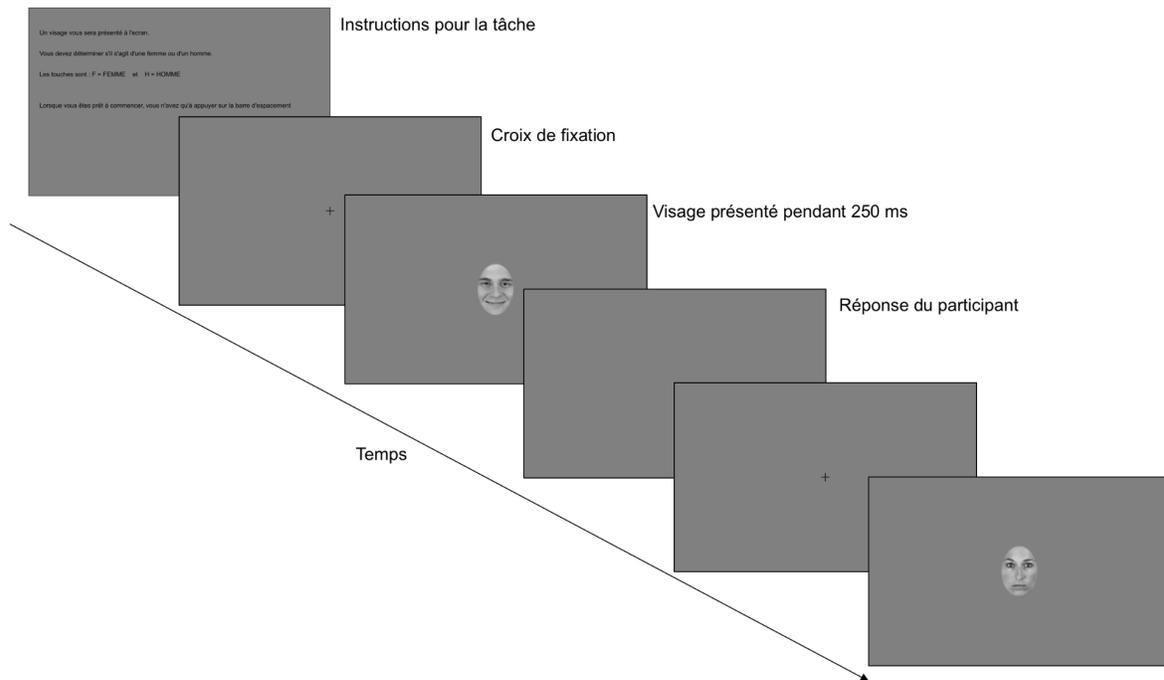


Figure 10. Exemple d'un essai de la tâche de catégorisation de sexe.

3.4. Acquisition et prétraitement des données d'électroencéphalographie (EEG)

L'activité EEG a été enregistrée en continu avec un casque G.gamma cap2 (g-tec, Autriche) à 64 canaux Ag/AgCl avec un amplificateur g.HIamp-research selon le système d'électrodes international 10-20. L'électrode AFZ a été utilisée comme électrode de mise à terre. Le lobe d'oreille droit a été utilisé comme électrode de référence pendant l'enregistrement et la moyenne des canaux a été utilisée pour re-référencer les données après l'enregistrement (excluant les électrodes oculaires et les lobes d'oreilles). Toutes les impédances entrantes ont été maintenues en dessous de 50 kilo-ohms (k Ω). Les données ont été échantillonnées à 1 200 Hz et ont été sous-échantillonnées à 300 Hz après l'enregistrement. Les données ont ensuite été filtrées

avec une bande passante de 0,1 à 30 Hz (utilisation d'un filtre Butterworth de quatrième ordre), segmentées en époques de -200 à 600 ms relativement à l'apparition du stimulus, les artéfacts rejetés manuellement (± 100 millivolts (mV)) et une correction de ligne de base a été appliquée en soustrayant de l'époque l'activité moyenne de -200 à 0 ms.

3.5. Résultats et discussion

3.5.1. Résultats comportementaux

Au niveau comportemental, aucune différence de performance entre l'œil dominant et l'œil non dominant a été retrouvée tant chez les participants contrôles (performance moyenne de 0.979 ± 0.022 et 0.974 ± 0.026 dans l'œil dominant et non dominant respectivement) que chez les participants amblyopes (performance moyenne de 0.965 ± 0.057 et 0.962 ± 0.056 dans l'œil dominant et amblyope respectivement), $t_s < 1.6$, $p_s > .2$. Ces résultats comportementaux impliquent que les effets associés à l'amblyopie retrouvés dans les réponses ERP ne peuvent pas s'expliquer sur la base des différences de performance comportementale dans la tâche entre l'œil amblyope (non-dominant chez les contrôles) et l'œil dominant. Les performances presque parfaites suggèrent d'ailleurs qu'au niveau perceptif, la tâche était très simple à compléter, et ce tant avec l'œil non-amblyope qu'avec l'œil amblyope.

3.5.2. Effets de l'amblyopie sur les réponses électrophysiologiques

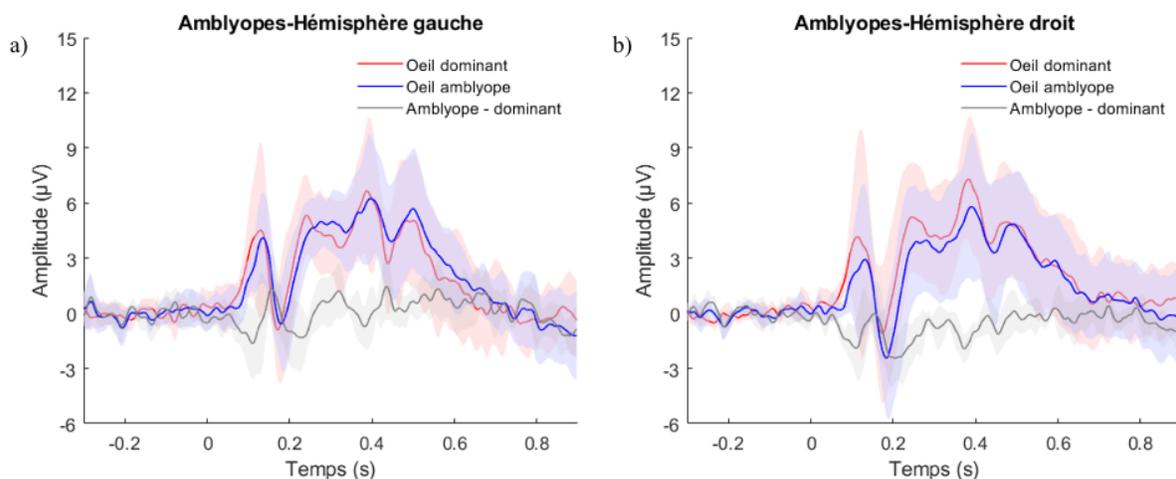
L'amplitude et la latence de la N170 enregistrées par quatre électrodes occipito-temporales, où son activité est la plus proéminente sur le scalpe (P7, PO7 dans l'hémisphère gauche et P8, PO8 dans l'hémisphère droit) ont été analysées, tel que cela se fait classiquement dans les études en perception de visages (p. ex., Bentin et al., 1996; Itier & Taylor, 2004; Rossion et al., 2000) ainsi que dans l'étude de Bankó et al. (2013). La N170 des participants a été

déterminée comme étant l'endroit le plus négatif de l'ERP se situant entre 150 et 220 ms. Pour les analyses qui suivent, l'œil dominant a été comparé à l'œil non-dominant pour chacun des participants. Cette comparaison a été priorisée dans le but de confronter les résultats de la présente étude à ceux obtenus précédemment par Bankó et al. (2013). Afin de vérifier l'impact de l'amblyopie sur la N170, des ANOVAs 2 (hémisphère) x 2 (œil) à mesures répétées ont été réalisées sur l'amplitude ainsi que sur la latence de la N170 des participants contrôles et des participants amblyopes séparément.

Chez les participants contrôles, les résultats révèlent un effet marginal de l'œil sur l'amplitude de la N170, (rANOVA, effet principal de l'œil : $F(1, 9)=3.15$, $p=.114$). L'amplitude moyenne de la N170 était marginalement moins négative lorsque les participants effectuaient la tâche avec l'œil non-dominant (-0.46 microvolts (μV), IC 95% [-4.09, 3.17]), que lorsque la tâche était effectuée avec l'œil dominant (-1.10 μV avec un IC 95% [-4.52, 2.32]). Aucun effet significatif de l'hémisphère (rANOVA, $F(1, 9)=0.63$, $p=.449$) n'est révélé par l'analyse. La différence marginale interoculaire dans l'amplitude de la N170 était similaire dans les deux hémisphères (pas d'interaction œil x hémisphère, $F(1, 9)=0.36$, $p=.562$; voir figure 11c et d). Chez les amblyopes, les résultats soulèvent un effet marginal de l'œil sur l'amplitude de la N170 (rANOVA, effet principal de l'œil: $F(1, 4) = 4.07$, $p=.114$). L'utilisation de l'œil amblyope lors de la tâche entraînait une N170 plus négative (-1.33 μV , IC 95% [-4.74, 2.09]) comparativement à l'œil non-amblyope (-1.01 μV , IC 95% [-4.71, 2.70]). Une interaction marginale entre l'hémisphère et l'œil est soulevée chez les amblyopes ($F(1, 4)=3.09$, $p=.153$). Nous avons fait le choix de décortiquer cette interaction marginale à des fins exploratoires. Le test post-hoc révèle que l'amplitude de la N170 dans l'œil amblyope est marginalement plus négative que dans l'œil non-amblyope dans l'hémisphère droit seulement, $t(4)=2.426$, $p=.072$ (voir figure 11a et b). Aucune différence d'amplitude entre l'œil amblyope et non-amblyope n'a été retrouvée dans

l'hémisphère gauche, $t(4)=-0.709$, $p=0.52$. La différence marginale d'amplitude observée dans la présente étude entre l'œil non-amblyope et l'œil amblyope se retrouverait donc seulement dans l'hémisphère droit des participants amblyopes.

Au niveau de la latence, l'ANOVA chez les participants contrôles ne révèle aucun effet principal significatif. Une interaction marginale est cependant soulevée par l'analyse, $F(1, 9)=3.10$, $p=.112$. Les tests post-hoc ne révèlent pas de différence significative de latence de la N170 entre les yeux qui varierait en fonction de l'hémisphère, $t_s < 1.6$, $p_s > .25$. Ainsi, chez les participants contrôles, aucune différence dans la latence de la N170 est observée quand la tâche est effectuée avec l'œil dominant et l'œil non-dominant et ce tant dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Chez les participants amblyopes, l'analyse révèle un effet significatif de l'œil sur la latence de la N170 ($F(1, 4)=11.91$, $p=.026$). Ainsi, la latence moyenne de la N170 est significativement plus grande lorsque la tâche est effectuée avec l'œil amblyope (185ms, CI 95% [180, 191]) que lorsqu'elle est effectuée avec l'œil non-amblyope (175ms, CI 95% [167, 183]). Aucun autre effet principal ni d'interaction n'a été soulevé par l'analyse.



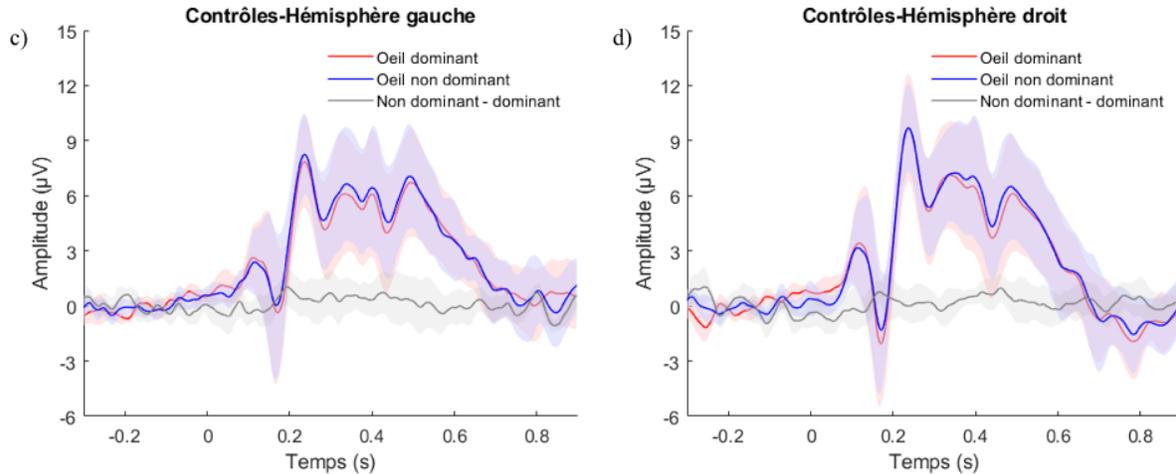


Figure 11. Formes d'ondes moyennes des ERP lors de la tâche de catégorisation de sexe chez les participants amblyopes en a) et b), ainsi que chez les participants contrôles en c) et d).

Étant donné la petite taille des échantillons et lorsque les postulats de normalité de la distribution et de la variance sont remis en doutes, il est possible d'y remédier en procédant à une transformation des données en rang, pour ensuite soumettre ces rangs à une ANOVA non-paramétrique (Zimmerman & Zumbo, 1993; Rayner & Best, 2013; Mansouri, 1999; Toothaker & Newman, 1994). Ainsi, afin de vérifier que l'impact de l'amblyopie sur la N170 n'est pas causé par la présence de valeurs aberrantes, des ANOVAs non-paramétriques 2 (hémisphère) x 2 (œil) à mesures répétées ont été réalisées sur les rangs associés à l'amplitude ainsi qu'à la latence de la N170 des participants contrôles et des participants amblyopes séparément.

Chez les participants contrôles, l'ANOVA non-paramétrique ne révèle aucun effet principal de l'œil (r ANOVA, $F(1, 9)=1.251$, $p=.292$) ni de l'hémisphère ($F(1, 9)=.568$, $p=.470$) sur les rangs associés à l'amplitude de la N170. Une interaction marginale est ressortie de cette analyse ($F(1,9)=2.051$, $p=.186$). Nous avons décidé de décortiquer cette interaction marginalement significative à des fins exploratoires. Les tests post-hoc ne révèlent pas de différence significative entre les rangs associés à l'amplitude de la N170 entre les yeux qui

varierait en fonction de l'hémisphère, $t_s < 1.473$, $p_s > .175$. Ainsi, chez les sujets contrôles, l'ANOVA non-paramétrique ne suggère pas de différence entre l'amplitude de la N170 associée à l'œil dominant et à l'œil non-dominant. Chez les amblyopes, les résultats soulèvent un effet marginal de l'œil sur l'amplitude de la N170 (rANOVA, effet principal de l'œil: $F(1, 4) = 5.879$, $p = .072$). L'utilisation de l'œil amblyope lors de la tâche entraînait un rang de la N170 plus grand, comparativement à l'œil non-amblyope, suggérant une N170 plus négative dans l'œil amblyope. Une interaction marginale entre l'hémisphère et l'œil est soulevée chez les amblyopes ($F(1, 4) = 2.63$, $p = .180$). Nous avons fait le choix de décortiquer cette interaction marginale à des fins exploratoires. Le test post-hoc révèle que les rangs associés à l'amplitude de la N170 dans l'œil amblyope sont marginalement plus grands que dans l'œil non-amblyope dans l'hémisphère droit seulement, $t(4) = -2.331$, $p = .080$. Aucune différence d'amplitude entre l'œil amblyope et non-amblyope n'a été retrouvée dans l'hémisphère gauche, $t(4) = .623$, $p = 0.567$. La différence marginale d'amplitude observée dans la présente étude entre l'œil non-amblyope et l'œil amblyope se retrouverait donc seulement dans l'hémisphère droit des participants amblyopes.

Au niveau de la latence, l'ANOVA sur les rangs chez les participants contrôles ne révèle aucun effet principal significatif. Une interaction marginale entre l'hémisphère et l'œil est toutefois soulevée par l'analyse ($F(1,9) = 2.335$, $p = .161$). Les tests post-hoc ne révèlent pas de différence significative dans les rangs associés à la latence de la N170 entre les yeux qui varierait en fonction de l'hémisphère, $t_s < 1.34$, $p_s > .213$. Ainsi, chez les participants contrôles, l'ANOVA sur les rangs des données ne révèle aucune différence au niveau de la latence de la N170 lorsque la tâche est effectuée avec l'œil dominant et l'œil non-dominant et ce tant dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Chez les participants amblyopes, l'analyse révèle un effet significatif de l'œil sur la latence de la N170 ($F(1, 4) = 10.299$, $p = .033$). Les rangs associés à la latence de la N170 étaient donc plus grands dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope.

Aucun effet principal de l'hémisphère ($F(1, 4)=.761, p=.423$), ni aucune interaction significative ($F(1, 4)=.397, p=.563$) n'est révélé par l'analyse. Les ANOVAs paramétriques et non-paramétriques révèlent donc des résultats similaires tant chez les participants contrôles que chez les participants amblyopes.

La deuxième expérience du présent projet avait pour objectif d'étudier l'impact de l'amblyopie sur les processus neurophysiologiques associés à la perception des visages. Les résultats ont été obtenus en utilisant une tâche de catégorisation de sexe pendant laquelle les potentiels évoqués étaient enregistrés en EEG. Au niveau comportemental, les participants amblyopes ont été en mesure d'effectuer la tâche aussi bien avec leur œil amblyope qu'avec leur œil non-amblyope. Cela étant dit, quelques différences marginales ont été observées entre les ERPs associées à l'œil amblyope et celles associées à l'œil non-amblyope. Premièrement, une tendance a été notée au niveau de l'amplitude de la N170. Celle-ci était marginalement plus négative dans l'œil amblyope que non-amblyope et ce dans l'hémisphère droit seulement. Cette différence n'a pas été observée chez les participants contrôles. Deuxièmement, l'amblyopie semble avoir un impact sur la latence de la N170, celle-ci étant significativement plus lente lorsque la tâche est effectuée avec l'œil amblyope qu'avec l'œil non-amblyope. Ce dernier résultat suggère que les expériences visuelles précoces semblent avoir des conséquences sur les processus neurophysiologiques associés à la perception de visages à l'âge adulte. Il est important de noter que les résultats obtenus sont à interpréter avec réserve étant donné la taille de l'échantillon et l'hétérogénéité des facteurs amblyogènes des participants (p. ex. strabisme et anisométrie). Malgré cela, les résultats mettent en lumière l'importance d'études subséquentes permettant de mieux comprendre comment l'amblyopie a un impact sur les processus visuels de plus haut niveau comme la reconnaissance de visages.

Ainsi, les résultats de la deuxième expérience du présent projet suggèrent une anomalie des mécanismes neuronaux associés à la perception des visages chez les amblyopes. Sachant qu'il existe un lien entre l'amplitude de la N170 et le traitement des orientations horizontales (Jacques et al., 2014; Duncan et al., 2018), ces dernières semblent un bon point de départ pour comprendre la cause de la perturbation de la N170 dans l'œil amblyope. La troisième expérience vise donc à explorer l'impact des expériences visuelles précoces anormales sur l'utilisation de cette information visuelle et son lien avec la N170.

CHAPITRE IV : EXPÉRIENCE III

4.1. Participants, Matériel et Stimuli

Les participants ainsi que le matériel et stimuli utilisés dans la présente expérience sont identiques à l'expérience 2 (voir Chapitre III). Les participants ont cependant complété un total de 1920 essais (960 essais par œil) de la tâche de catégorisation de sexe, cette fois-ci avec stimuli filtrés à l'aide des bulles d'orientations (Duncan et al., 2017; voir section 4.2).

4.2. Manipulation expérimentale

Afin de révéler l'information contenue dans les orientations spatiales utilisées par chaque participant pour faire une tâche de catégorisation de sexe, les stimuli ont été filtrés avec les bulles d'orientations (Duncan et al., 2017; figure 12). Pour ce faire, une image est *premièrement* soumise à une transformation de Fourier afin de révéler les orientations qu'elle contient. *Deuxièmement*, un vecteur d'échantillonnage aléatoire est ensuite créé en additionnant 10 bulles d'orientation. Chaque bulle d'orientation consiste en une paire de distributions circulaires (Von Mises) avec une orientation opposée (à 180 degrés l'une de l'autre). *Troisièmement*, une matrice d'échantillonnage d'orientations de 256 x 256 pixels est créée en appliquant le vecteur d'orientation à la matrice. Cette matrice est égale à $\tan^{-1}[(y-127)/(x-127)]$, où x et y correspondent respectivement aux colonnes et aux rangées de la matrice d'orientation. *Quatrièmement*, la matrice d'échantillonnage d'orientation est ensuite multipliée avec le spectre de Fourier du stimulus, qui par la suite subit une transformation inverse de Fourier. Une proportion de bruit blanc gaussien est ensuite ajoutée à l'image filtrée afin de moduler la performance et la maintenir entre le niveau plancher (50%) et plafond (100%). La proportion adéquate de bruit visuel a été déterminée avec l'algorithme QUEST (Watson et Pelli, 1983) sur la performance de l'œil dominant seulement et appliquée à l'œil non-dominant/amblyope. Le choix

de conserver le même niveau de difficulté pour les deux yeux permet d'assurer que la même quantité d'information soit présentée dans l'œil dominant et l'œil non-dominant.

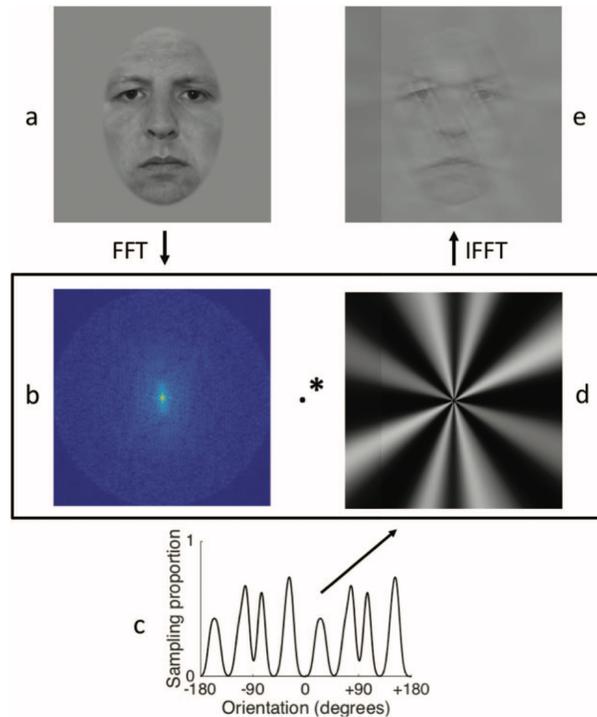


Figure 12. Procédure des bulles d'orientation. Voir le texte pour une description détaillée. (Image tirée de l'article de Duncan et al., 2019).

4.3. Acquisition et prétraitement des données EEG

La même procédure d'acquisition et de prétraitement des données EEG que celle utilisée dans l'expérience 2 (voir Chapitre III) a été effectuée sur les données de la présente expérience.

4.4. Résultats et discussion

4.4.1. Résultats comportementaux

Au niveau comportemental, aucune différence significative n'est observée dans la précision des réponses entre l'œil dominant ($.848 \pm .026$) et l'œil non-dominant ($.847 \pm .027$) des

participants contrôles, $t(9)=0.17$, $p=.869$. Toutefois, une différence significative est observée en comparant la performance des participants amblyopes quand la tâche est effectuée avec l'œil non-amblyope ($.835 \pm .032$) et l'œil amblyope ($.814 \pm .043$), $t(4)=3.04$, $p=.04$. Notons que la performance est cependant nettement au-delà du hasard avec l'œil amblyope, suggérant que les participants ont réussi à faire la tâche sans grande difficulté. Afin de comparer le ratio signal-sur-bruit nécessaire aux participants contrôles et aux participants amblyopes pour effectuer la tâche, un test-t pour échantillons indépendants a été effectué. L'analyse ne révèle aucune différence entre le ratio signal-sur-bruit des participants contrôles ($.770 \pm .115$) et des participants amblyopes ($.783 \pm .101$), $t(13)= -0.202$, $p=.843$. Ceci suggère que l'œil non-amblyope des participants amblyopes ne nécessitait pas plus de signal que l'œil dominant des participants contrôles pour effectuer la tâche.

4.4.2. Utilisation comportementale des orientations spatiales

Pour extraire les profils comportementaux de l'utilisation des orientations, nous avons effectué une analyse d'image de classification (Eckstein & Ahumada, 2002 ; Gosselin & Schyns, 2004), analogue à une régression linéaire multiple des bulles d'orientation sur la précision des réponses. Cette analyse a été conduite chez les participants contrôles et les participants amblyopes séparément. Pour chaque participant dans chaque condition (œil dominant et non-dominant), une somme pondérée des vecteurs d'échantillonnage d'orientations a été calculée, attribuant des poids positifs/négatifs (z scores de la performance) aux filtres qui ont conduit à des réponses correctes/incorrectes, respectivement. La procédure a généré n (taille de l'échantillon) vecteurs de coefficients de régression (c'est-à-dire des vecteurs de classification) quantifiant l'association entre les orientations et la précision des réponses dans la tâche de catégorisation de sexe. Ceux-ci ont été standardisés à l'aide de la moyenne et de l'écart-type de l'hypothèse nulle

dont les paramètres ont été estimés en simulant 100 vecteurs de classification avec autant de permutations aléatoires des réponses. Un vecteur de classification de groupe a ensuite été généré (deux vecteurs par condition, soit un vecteur pour l'œil dominant et un autre pour l'œil non-dominant et ce dans le groupe contrôle et amblyope séparément) en additionnant les vecteurs individuels et en divisant le résultat par \sqrt{n} . Un test de pixel (Chauvin et al., 2005) a été appliqué pour déterminer le seuil de signification statistique ($Z_{crit} = |2.49|$, $p < .05$; bilatéral). La figure 13a montre qu'au niveau du groupe, chez les contrôles, les informations autour de l'axe horizontal étaient positivement corrélées à la catégorisation de sexe dans l'œil dominant de -116 à -73 degrés, avec un pic de performance quand les orientations autour de -92 degrés étaient présentes dans le stimulus, ($Z_{max} = 8.11$). Dans l'œil non-dominant, la performance était positivement corrélée avec la présence d'orientations horizontales entre -107 et -61 degrés, avec un pic à -88 degrés ($Z_{max} = 9.37$). Les orientations obliques et verticales étaient quant à elles négativement corrélées avec la performance dans l'œil dominant entre -180 à -150 degrés et -50 à 0 avec un pic à -21 ($Z_{min} = -4.37$) ainsi que dans l'œil non-dominant entre -180 à -140 degrés et de -30 jusqu'à 0 degré avec un pic à -160 ($Z_{min} = -7.39$). Notons que l'information nuisant à la catégorisation de sexe (orientations obliques et verticales) avait plus d'impact sur la performance de l'œil non-dominant que de l'œil dominant entre -173 à -143 degrés, avec un pic à -163 degrés ($Z_{max} = 4.07$). Toutefois, l'œil non-dominant semblait utiliser davantage les orientations horizontales obliques que l'œil dominant pour effectuer la tâche de catégorisation de sexe, soit entre -84 et -65 degrés, avec un pic à -75 degrés ($Z_{min} = -3.28$). L'œil dominant ainsi que l'œil non-dominant des participants contrôles utilisent donc tous deux les orientations horizontales pour effectuer une tâche de catégorisation de sexe. Des différences sont toutefois observées entre les deux yeux au niveau de l'impact des orientations verticales et obliques sur la performance. La performance de

l'œil non-dominant est plus affectée que l'œil dominant quand ces orientations sont présentées aux participants et l'œil non-dominant fait un meilleur usage d'une petite gamme d'orientations horizontales. Pris ensemble, ces résultats suggèrent que le système visuel dépendant de l'œil dominant semble faire un meilleur usage de l'ensemble des orientations, même lorsque celles-ci ne sont pas utiles à la tâche. L'œil non-dominant nécessite la présence d'informations spatiale sur un spectre plus restreint que l'œil dominant pour réussir une tâche de catégorisation de sexe.

Chez les participants amblyopes, les informations autour de l'axe horizontal ont aussi mené à une meilleure performance dans l'œil non-amblyope entre -123 et -68 degrés avec un pic de performance lorsque les orientations autour de -91 degrés étaient présentes dans le stimulus ($Z_{\max}=11.43$, voir figure 13b). Dans l'œil amblyope les orientations horizontales entre -109 et -61 degrés ont favorisé une meilleure performance, avec un pic de performance lorsque les orientations autour de -89 degrés étaient présentes dans le stimulus ($Z_{\max}=8.92$). Les orientations verticales ont nui à la performance dans les deux yeux. Dans l'œil non-amblyope, les orientations entre -180 et -135 degrés, ainsi que -36 à 0 degré avec un pic à -146 ($Z_{\min}=-5.80$) étaient nuisibles tandis que les orientations entre -180 et -136 degrés ainsi que -38 à 0 degré avec un pic à -150 degrés ($Z_{\min}=-5.83$) ont nui à l'œil amblyope. Lorsqu'on compare directement les résultats de l'œil non-amblyope à ceux de l'œil amblyope, on remarque que l'œil non-amblyope utilise mieux les orientations obliques se rapprochant des horizontales entre -119 et -89, avec un pic à -98 ($Z_{\max}=3.04$), suggérant que l'œil non-amblyope fait un meilleur usage de cette information que l'œil amblyope. Toutefois, les orientations obliques se rapprochant des verticales entre -179 et -166 avec un pic à -171 ($Z_{\min}=-2.96$) semblent nuire davantage à la performance de l'œil non-amblyope que de l'œil amblyope.

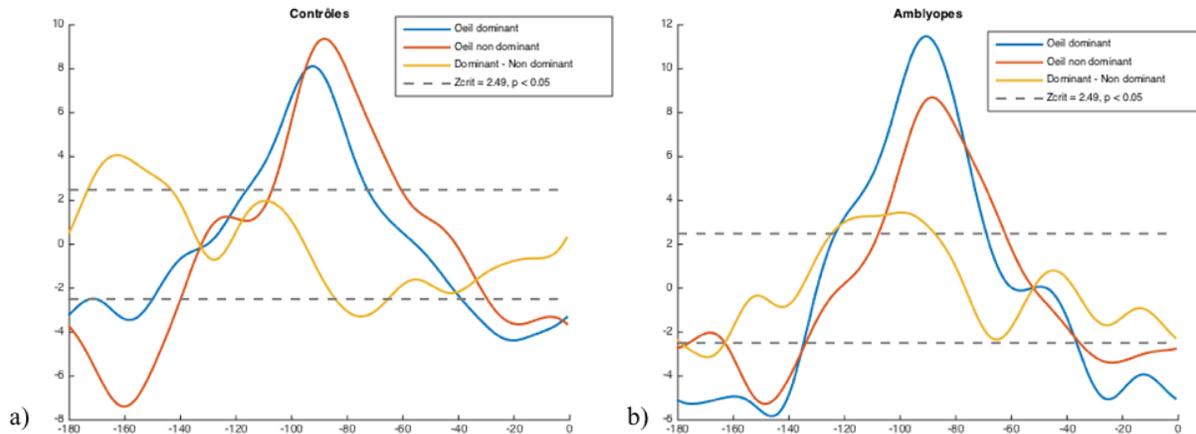


Figure 13. Vecteurs de classification de groupe dans la tâche de bulles d'orientation pour a) les participants contrôles et b) les participants amblyopes. Illustration de la corrélation (score z) entre les orientations présentées et la précision des réponses en catégorisation de sexe. Les lignes grises pointillées représentent le seuil de signification du test bilatéral, soit $ps < .05$.

Les résultats suggèrent donc que l'œil amblyope est sensible aux informations qui sont utiles à la tâche, ici les horizontales, dans une tâche de perception de visages. Une différence est toutefois observée entre l'œil non-amblyope et l'œil amblyope en ce qui concerne l'impact de la présence de certaines orientations à un essai et la performance du participant à ce même essai. En effet, les orientations verticales obliques semblent nuire davantage à l'œil non-amblyope tandis que les orientations horizontales favorisent sa performance comparativement à l'œil amblyope. Pris ensemble, ces résultats suggèrent que l'œil amblyope est moins sensible que l'œil non-amblyope à l'information utile à la tâche et sa performance semble moins affectée que l'œil non-amblyope lorsqu'une information nuisible est présentée.

4.4.3. Orientations spatiales et ERP

Afin de définir quelles orientations avaient un impact sur l'amplitude de la N170, nous avons encore une fois effectué une analyse d'image de classification (Eckstein & Ahumada, 2002; Gosselin & Schyns, 2004), analogue à une régression linéaire multiple. Toutefois, cette analyse a été effectuée sur la présence des bulles d'orientation sur l'amplitude de la N170 plutôt que sur la

précision des réponses comportementales. Cette analyse a été conduite chez les participants contrôles et les participants amblyopes séparément en moyennant les réponses aux électrodes P7, PO7, P8 et PO8. Pour chaque participant dans chaque condition (œil dominant et non-dominant), une somme pondérée des vecteurs d'échantillonnage d'orientations a été calculée, attribuant des poids positifs/négatifs (z scores de la performance) aux filtres qui ont conduit à une diminution/augmentation de l'amplitude de la N170, respectivement. La procédure a généré n (taille de l'échantillon) vecteurs de coefficients de régression (c'est-à-dire des vecteurs de classification) quantifiant l'association entre les orientations et l'amplitude de la N170 dans la tâche de catégorisation de sexe. Ceux-ci ont été standardisés à l'aide de la moyenne et de l'écart-type de l'hypothèse nulle dont les paramètres ont été estimés en simulant 100 vecteurs de classification avec autant de permutations aléatoires des réponses. Un vecteur de classification de groupe a ensuite été généré (deux vecteurs par condition, soit un vecteur pour l'œil dominant et un autre pour l'œil non-dominant et ce dans le groupe contrôle et amblyope séparément) en additionnant les vecteurs individuels et en divisant le résultat par \sqrt{n} . Un test de pixel (Chauvin et al., 2005) a été appliqué pour déterminer le seuil de signification statistique ($Z_{crit} = |2.9|$, $p < .05$; bilatéral).

Chez les participants contrôles, l'amplitude de la N170 est significativement corrélée avec la présence des horizontales dans l'œil dominant et dans l'œil non-dominant. Le haut des Figures 14 et 15 montre l'impact de la présence des différentes orientations dans le stimulus visuel sur l'activité cérébrale à différents instants sur l'ERP dans les deux conditions (œil dominant et non-dominant). Un rectangle a été superposé sur chacune des figures pour mieux visualiser la fenêtre temporelle de la N170. L'ERP moyen des participants contrôles est présenté dans le bas de la Figure 14 pour mieux visualiser l'impact des orientations spatiales au niveau temporel.

L'amplitude de la N170 est plus négative lorsque les horizontales sont présentes dans le stimulus, et ce dans les deux yeux. Dans l'œil non-dominant, la présence des orientations verticales a eu l'effet inverse sur la N170, soit que son amplitude se voit plus positive (donc diminuée) lorsque les verticales sont présentes dans le stimulus. Le même patron a été observé dans l'œil dominant quand les verticales sont présentes, sans toutefois être significatif. Certaines orientations ont aussi eu un impact à l'extérieur de la fenêtre de la N170. Dans l'œil dominant des participants contrôles, la présence d'orientations obliques semble mener à une P100 plus positive. Cet effet n'est toutefois pas observé dans l'œil non-dominant. Les orientations semblent aussi avoir un impact sur l'amplitude plus loin sur l'ERP, dans la fenêtre temporelle de la N250, une autre composante associée à la perception des visages (Tanaka et al., 2006; Pierce et al., 2011). La N250 semble modifiée par la présence des horizontales dans l'œil non-dominant des participants contrôles. Celle-ci a une plus grande amplitude, donc est plus négative, lorsque les horizontales sont présentes dans le stimulus. Aucune orientation ne semble avoir d'effet dans la fenêtre temporelle de la N250 des participants contrôles lorsque l'information passe par l'œil dominant.

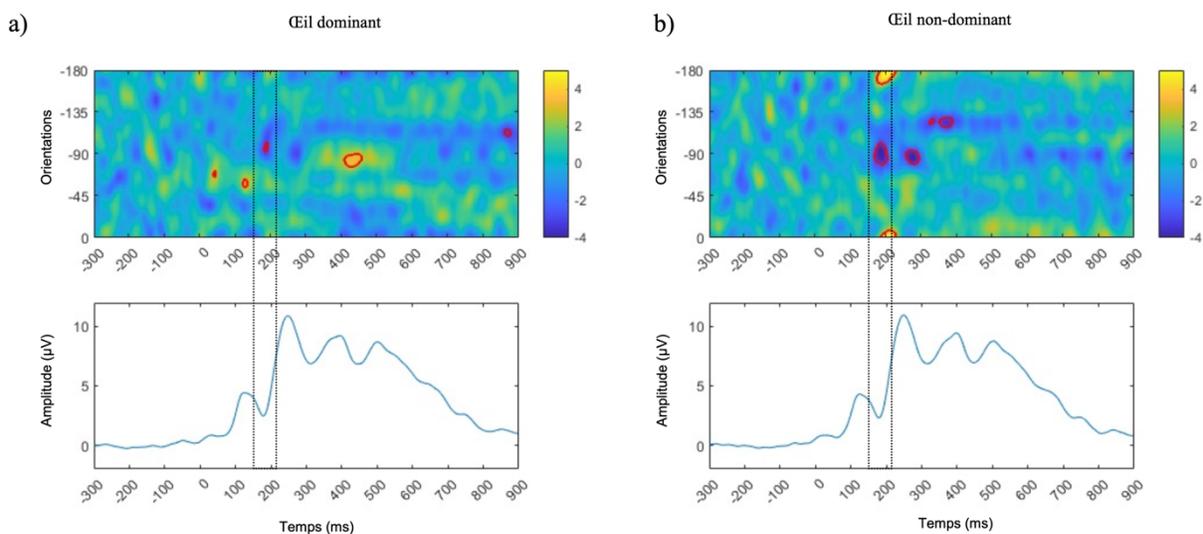


Figure 14. Lien entre la présence de différentes orientations dans le stimulus et leur impact sur l'amplitude de l'ERP chez les participants contrôles; a) Résultats de l'œil dominant et b) Résultats de l'œil non-dominant; La fenêtre temporelle de la N170 a été entourée d'un rectangle noir. Les orientations qui ont mené à un changement significatif de l'amplitude de l'ERP sont entourées en rouge.

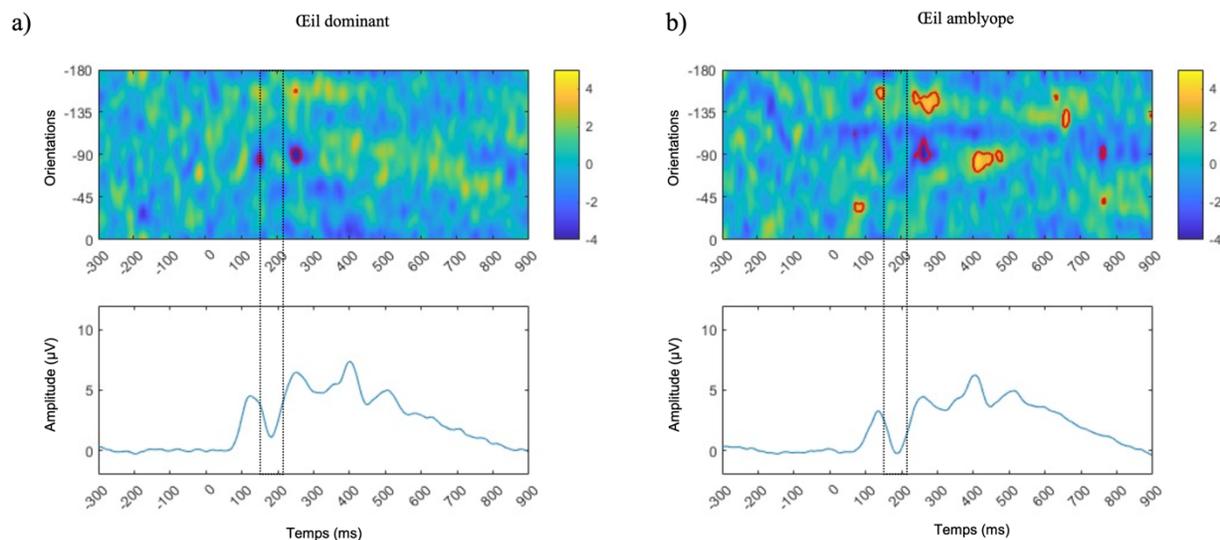


Figure 15. Lien entre la présence de différentes orientations dans le stimulus et leur impact sur l'amplitude de l'ERP chez les participants amblyopes; a) Résultats de l'œil dominant et b) Résultats de l'œil amblyope; La fenêtre temporelle de la N170 a été entourée d'un rectangle noir. Les orientations qui ont mené à un changement significatif de l'amplitude de l'ERP sont entourées en rouge.

Chez les participants amblyopes, dans la fenêtre de la N170, on remarque que la présence d'orientations horizontales augmente la négativité de l'ERP au début de la fenêtre temporelle de la N170 dans l'œil dominant (non-amblyope). Aucune autre orientation n'a d'effet à d'autres moments dans la fenêtre de la N170 dans cet œil. Dans l'œil amblyope, aucune orientation n'a d'impact significatif sur l'ERP dans la fenêtre de la N170. Ainsi, les orientations présentes dans le stimulus n'amènent aucune modification significative sur l'amplitude de la N170 dans l'œil amblyope. Toutefois, la présence de différentes orientations est associée à des changements à l'extérieur de la fenêtre de la N170. Dans l'œil dominant (non-amblyope), la présence des orientations horizontales semble mener à une amplitude plus négative et les orientations obliques mèneraient à une amplitude plus positive entre la P200 et le début de la composante N250. Aucune autre orientation n'a mené à des changements significatifs de l'amplitude de l'ERP dans l'œil non-amblyope. Dans l'œil amblyope, la présence des orientations obliques semble mener à une amplitude plus positive de la P100, composante précédant la N170 et ayant une amplitude positive. Toujours dans l'œil amblyope, la présence de certaines orientations est aussi associée à des modifications de l'amplitude de l'ERP dans la fenêtre de la P200. Les horizontales semblent mener à une amplitude plus négative de cette composante tandis que les obliques favorisent une amplitude plus positive.

Nos résultats obtenus chez les participants contrôles supportent l'hypothèse que la N170 est associée à la présence des orientations horizontales dans un stimulus. L'amplitude de la N170 associée à l'œil dominant ainsi qu'à l'œil non-dominant des participants contrôles était modulée par la présence des orientations horizontales et verticales : les horizontales augmentent l'amplitude de la N170 tandis que les verticales la diminuent. Toutefois, chez les participants amblyope, la présence des horizontales n'avait aucun effet sur l'amplitude de la N170 dans l'œil

amblyope alors qu'un impact est noté au début de la fenêtre temporelle de la N170 dans l'œil non-amblyope. Ainsi, l'amplitude de la N170 des participants amblyopes ne semble pas être associée à la présence de différentes orientations dans un stimulus visuel. Bien que notre échantillon soit petit et que cette étude soit exploratoire, nos résultats suggèrent que l'amblyopie aurait un impact sur la sensibilité de la N170 aux différentes orientations spatiales. L'utilisation comportementale des orientations horizontales dans la tâche de catégorisation de sexe pourrait donc potentiellement refléter des mécanismes neurologiques plus tardifs que la N170. Des études ont d'ailleurs suggéré que le traitement du genre et de l'identité d'un visage se ferait au-delà de la N170, soit dans la fenêtre temporelle de la N250 (Mouchetant-Rostaing et al., 2000; Wiese et Schweinberger, 2018; Tanaka et al., 2006; Kaufmann et al., 2009; Zheng et al., 2012).

CHAPITRE V : DISCUSSION GÉNÉRALE

Le présent essai avait pour objectif général d'investiguer comment les expériences visuelles précoces ont un impact sur différents aspects de la perception des visages. Pour ce faire, cet essai a été divisé en deux temps : un premier comportemental et un second en électrophysiologie. Les performances d'amblyopes adultes ont été comparées à celles de participants contrôles. Il est important de noter que cette étude a une visée exploratoire et que des études subséquentes seront nécessaires afin de généraliser les résultats. Cela étant dit, au niveau comportemental, les résultats suggèrent que l'effet de l'amblyopie sur le traitement visuel n'est pas généralisé à l'ensemble des stimuli. En effet, un impact plus important de l'amblyopie a été soulevé pour les visages que pour d'autres catégories d'objets, en particulier en reconnaissance de visages. Au niveau neurophysiologique, un impact de l'amblyopie a été observé sur la temporalité des processus neuronaux associés à la perception des visages et sur l'information visuelle modulant leur amplitude.

5.1. Aspects comportementaux

5.1.1. Impact de l'amblyopie en détection de visages

Le premier objectif comportemental était d'explorer l'impact de l'amblyopie sur les capacités en détection de visages. Pour ce faire, les capacités de détection de l'œil amblyope et de l'œil non-amblyope ont été comparées à des participants contrôles dans des tâches de détection de visages, de voitures et de maisons. Nous avons choisi d'utiliser un paradigme de choix forcé à deux alternatives afin d'étudier la sensibilité des participants amblyopes à détecter différents types de stimuli en jouant avec le ratio signal-sur-bruit. Les résultats des participants amblyopes ont été comparés à ceux des participants contrôles de sorte que l'œil non-dominant des participants amblyopes, soit l'œil amblyope, était comparé à l'œil non-dominant des participants

contrôles et l'œil dominant (non-amblyope) était comparé à l'œil dominant des participants contrôles. Cette comparaison a été choisie dans l'optique de vérifier si les deux yeux des participants amblyopes se comparaient à la population normale. Bien que cet essai soit de nature exploratoire, nos résultats semblent suggérer que l'œil amblyope est moins sensible que l'œil non-dominant des participants contrôles lorsqu'il doit détecter des visages, mais aussi des objets. L'œil non-amblyope semble lui aussi moins sensible que l'œil dominant des contrôles en détection de visages. Toutefois, en détection d'objets, le type de stimuli a eu un impact sur les résultats obtenus dans l'œil non-amblyope. En détection de voiture, la performance de l'œil non-amblyope était plus faible que celle des participants contrôles tandis qu'en détection de maison, la performance était similaire entre les participants amblyopes et les contrôles. La différence de sensibilité de l'œil non-amblyope en détection de voiture et de maison suggère que le type de stimulus contrôle utilisé lors d'une expérience peut avoir un impact sur les conclusions tirées. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser des voitures vues de face puisqu'elles ont plusieurs points communs avec les visages (hautement familiers, grande homogénéité intra-catégorie, symétrie de l'axe vertical, plus d'énergie dans les bandes horizontales) tandis que les maisons ont des différences importantes avec les visages (peu de symétrie, énergie répartie dans plusieurs orientations). Ceci nous permettait donc de comparer les résultats obtenus avec les visages à des stimuli d'une catégorie dont les exemplaires sont visuellement similaires (voitures) et une catégorie où les stimuli sont dissimilaires (maisons). En utilisant une comparaison visages-objets, cela nous permet de déterminer si la détection de visages est plus affectée que la détection d'objets chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales. Nos résultats suggèrent que la détection de visages et d'objets semblent toutes deux affectées par l'amblyopie et ce tant dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope. Ainsi, nos résultats ne

suggèrent pas un déficit plus important avec les visages en détection chez les participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales.

Une explication possible de la différence entre les résultats obtenus par l'œil non-amblyope en détection de voitures et de maisons pourrait provenir de la différence entre les propriétés visuelles des stimuli. En effet, les récentes études portant sur les propriétés visuelles de bas niveaux comme les fréquences spatiales et les orientations spatiales suggèrent que les informations visuelles utiles à une tâche varient en fonction de la tâche, mais aussi en fonction des stimuli utilisés (Goffaux & Dakin, 2010; Goffaux & Greenwood, 2016; Goffaux et al., 2015). Un exemple provient des orientations spatiales utiles en perception de visages, de voitures et de bâtiments. En perception de visages et de voitures, les orientations horizontales favorisent la performance des participants (Duncan et al., 2019; Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Goffaux & Greenwood, 2016; Goffaux et al., 2015; Goffaux et al., 2011; Pachai et al., 2018; Pachai et al., 2013) tandis que la perception des scènes est facilitée par la présence des orientations verticales (Goffaux et Dakin, 2010). Ainsi, l'importance relative de différentes orientations spatiales pour réussir la tâche pourrait avoir un impact sur la différence entre les résultats obtenus en détection de visages et de voitures et ceux en détection de maisons dans l'œil non-amblyope. Des recherches antérieures ont montré que les expériences visuelles précoces étaient nécessaires pour le développement d'autres aspects de la perception des visages. Par exemple, Kelly et al. (2012) ont comparé les capacités de discrimination entre des visages à celles de discrimination entre des maisons chez des participants adultes ayant subi une énucléation à l'enfance. Ils ont conclu que les déficits étaient spécifiques aux visages comme aucune différence n'a été retrouvée entre les capacités des participants ayant subi l'énucléation et l'échantillon contrôle dans la tâche de discrimination de maisons. Des résultats similaires ont aussi été obtenus par Lerner et al. (2003) en fMRI chez des participants amblyopes. Ces derniers suggéraient que

l'œil amblyope montrait des déficits tant comportementaux qu'au niveau de l'activation des régions cérébrales associées aux visages tandis que la reconnaissance de bâtiments et l'activation des régions cérébrales associées à cette catégorie de stimuli étaient normales (Lerner et al., 2003). Toutefois, nos résultats suggèrent que l'utilisation d'une autre catégorie d'objets aurait pu mener à des résultats différents. D'ailleurs, les résultats de la présente étude et de celle menée par Kelly et al. (2012) diffèrent de ceux obtenus dans une autre étude où les chercheurs ont suggéré que les capacités en détection de visage n'étaient pas affectées par un développement visuel atypique (Mondloch et al., 2013). Lors de cette étude, les participants devaient indiquer si le stimulus présenté était un visage ou non en utilisant des visages Mooney (figure 16a; Mooney, 1957) à haut contraste, ainsi qu'une version mélangée des visages Mooney comme stimulus contrôle (figure 16b). Les résultats de cette étude suggéraient que la détection de visages n'était pas dépendante des expériences visuelles précoces puisque des participants nés avec des cataractes congénitales n'avaient pas plus de difficulté que des participants contrôles à déterminer si le stimulus présenté (ici un visage Mooney à l'endroit ou mélangé) était un visage. Il a précédemment été suggéré que les amblyopes nécessitent autant de contraste que les participants contrôles pour détecter des stimuli en basses fréquences spatiales, mais que plus de contraste que les participants contrôles serait nécessaire pour qu'ils puissent détecter des stimuli en hautes fréquences spatiales (Gstalter, & Green, 1971; Levi, & Harwerth, 1977; Hess, & Howell, 1977). Ainsi, la différence dans les résultats obtenus lors de l'étude de Mondloch et al. (2013) et ceux de la présente étude peut provenir du type de tâche et des stimuli utilisés. En utilisant des visages Mooney, les chercheurs ont plutôt observé la capacité des amblyopes à faire du sens de stimuli à grand contraste tandis que nous avons étudié la sensibilité, soit le niveau de signal nécessaire pour détecter différents stimuli en utilisant le ratio signal-sur-bruit. Nos résultats ne sont donc pas en contradiction avec ceux obtenus par Mondloch et al. (2013), étant donné que la nature de la

tâche et les stimuli utilisés diffèrent grandement. Il est possible que malgré une sensibilité plus faible chez les participants ayant eu des expériences visuelles précoces anormales, ils soient aussi bons que des participants contrôles en détection de visages lorsque les stimuli sont à plein contraste. Nos résultats, interprétés dans le contexte de la littérature scientifique, suggèrent que les expériences visuelles précoces ont un impact sur la sensibilité du système visuel en détection de visages et d'objets.



Figure 16. Exemple d'un visage Mooney. a) Visage Mooney et b) visage Mooney randomisé. (Image tirée de Silverstein et al., 2021)

5.1.2. Impact de l'amblyopie en reconnaissance de visages

La présente étude avait non seulement pour objectif comportemental d'observer la sensibilité des participants amblyopes en détection de visages, mais aussi de vérifier l'impact des expériences visuelles précoces sur les habiletés en reconnaissance de visages. La littérature scientifique n'est pas unanime quant au développement et à la mise en place du système de reconnaissance de visages durant l'enfance. Certains sont d'avis que les processus associés à la perception des visages sont spécifiques aux visages alors que d'autres croient que l'expérience forge l'expertise avec cette catégorie visuelle et que les mécanismes associés deviennent matures beaucoup plus tard dans le développement. Nos résultats, bien qu'ils soient exploratoires,

suggèrent que les expériences visuelles précoces sont nécessaires pour la mise en place adéquate du système de reconnaissance de visages à l'âge adulte. En se servant de tests largement utilisés dans le domaine de la reconnaissance de visages et d'objets, nos résultats suggèrent la présence d'un effet plus important de l'amblyopie sur les habiletés en reconnaissance de visages qu'en reconnaissance d'objets. Cette différence entre les visages et les objets a été retrouvée dans l'œil amblyope ainsi que dans l'œil non-amblyope lorsque la performance des participants est comparée à un groupe contrôle. Notons que des difficultés en reconnaissance d'objets ont été observées dans l'œil amblyope, mais une comparaison directe a montré que les difficultés associées aux visages semblaient plus importantes. Aucun déficit en reconnaissance d'objet n'a été noté dans l'œil non-amblyope. Nos résultats suggèrent donc que les expériences visuelles précoces anormales semblent causer des difficultés en reconnaissance de visages plus importantes qu'en reconnaissance d'objets. Précédemment, il a été proposé que les expériences visuelles précoces sont nécessaires pour plusieurs aspects de la perception des visages dont la discrimination de visages dont les traits internes sont modifiés (Kelly et al., 2012, 2019), la reconnaissance d'identité d'un visage indépendamment du point de vue (Geldart et al., 2002; de Heering & Maurer, 2014) et pour discriminer des visages qui ne diffèrent que par des changements dans l'espacement des traits faciaux (Le Grand et al., 2003; de Heering & Maurer, 2014; Robbins et al., 2010). D'après nos résultats exploratoires, la reconnaissance de visages pourrait faire partie de la liste de déficits observés chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont atypiques. D'autres études menées chez des participants ayant eu des expériences visuelles précoces anormales, n'étant cependant pas amblyopes, ont aussi trouvé un déficit de la mémorisation des visages (de Heering & Maurer, 2014; Putzar et al., 2010) ainsi qu'une sous-activation des régions cérébrales associées aux connaissances vis-à-vis une personne (Grady et al., 2014). Nos résultats sont donc en accord avec ceux des études antérieures. Cela

étant dit, un avantage important de la présente étude, comparativement aux études précédentes, est que nous comparons les habiletés en reconnaissance de visages à celles en reconnaissance d'objets de différentes catégories. Cette comparaison permet de conclure si les résultats obtenus sont plus importants avec les visages ou s'ils s'étendent à l'ensemble des stimuli visuels. Aussi, en utilisant plusieurs catégories d'objets dans la tâche contrôle, nous évitons l'impact d'une expertise particulière avec une catégorie d'objets (p.ex. voitures) sur les résultats obtenus. Nos résultats suggèrent ainsi que les déficits observés semblent plus importants en reconnaissance de visages qu'en reconnaissance d'objets en général.

Il reste cependant important de mentionner que nos résultats obtenus avec l'œil non-amblyope sont différents d'une autre étude ayant vérifié l'impact de l'amblyopie sur la perception des visages. Dans leur étude, les chercheurs n'avaient pas trouvé de déficit dans l'œil non-amblyope (Lerner et al., 2003) tandis que nos résultats suggèrent le contraire. Notons que les tâches que nous avons utilisées sont standardisées et plus complexes que celles utilisées dans l'étude de Lerner et al. (2003). Ainsi, nos tâches sont probablement plus sensibles étant donné un plus grand degré de difficulté que celles de Lerner et al., expliquant la différence dans les résultats. D'ailleurs, malgré le fait que Lerner et al. (2003) ont proposé que l'œil non-amblyope ne rencontrait aucune difficulté en reconnaissance de visages, notre étude n'est pas la première à trouver des déficits associés à l'œil non-amblyope (Meier et al., 2016). Plusieurs études suggèrent d'ailleurs que l'œil non-amblyope ne devrait pas être considéré comme "normal" considérant que des déficits y sont associés tant au niveau oculomoteur (Shaikh et al., 2016; Ghasia et al., 2018; Bedell & Flom, 1985) que perceptif (Simmers et al., 2003; Knox et al., 2013; Meier et al., 2016; mais voir Ho et al., 2005 et 2006). Plusieurs propositions ont été soulevées pour expliquer la présence de déficits dans l'œil non-amblyope dont une suggérant que cet œil subi une occlusion temporaire lors du traitement clinique de l'amblyopie, ce qui rend les expériences visuelles

précoces anormales non seulement dans l'œil amblyope, mais aussi dans l'œil non-amblyope.

Ainsi, l'utilisation d'un protocole où les deux yeux sont étudiés de manière indépendante nous a permis de vérifier si les expériences visuelles précoces anormales associées à l'amblyopie ont un impact sur différents aspects de la perception des visages de l'œil amblyope, mais aussi de l'œil non-amblyope.

Un résultat comportemental de la présente étude qui pourrait surprendre concerne la performance adéquate des amblyopes en catégorisation de sexe. Il serait possible de croire, avec les résultats mentionnés ci-haut concernant la détection et la reconnaissance de visages, que les capacités en catégorisation de sexe seraient aussi affectées par l'amblyopie. Cela étant dit, ce processus cognitif semble être extrêmement efficace et les adultes atteignent généralement des effets plafonds au niveau de leur performance dans une tâche de catégorisation de sexe avec des visages adultes (Hillairet de Boisferon et al., 2019; Bruce et al., 1993; Wild et al., 2000).

Plusieurs caractéristiques physiques peuvent être à l'origine de la saillance du sexe d'un visage dont les traits faciaux (ex. les sourcils, les yeux, la forme de la mâchoire, le menton, le nez et la bouche; Bruce et al., 1993; Brown & Perrett, 1993; Chronicle et al., 1995), mais aussi l'information contenue dans les fréquences spatiales. Ainsi, il est possible de spéculer que l'information contenue dans les basses fréquences spatiales, information visuelle dont le traitement serait considéré normal ou presque normal chez les amblyopes (Hess & Howell, 1977; Levi & Harwerth, 1977; Volkens et al., 1987), serait amplement suffisante pour effectuer cette tâche. D'ailleurs, une étude de Cellerino et al., (2004) a montré qu'en filtrant des visages d'hommes et de femmes pour révéler seulement les basses fréquences spatiales en pixélisant l'image (4, 8, 16 et 32 pixels), les participants sont en mesure d'effectuer la tâche nettement au-dessus du hasard dans l'ensemble des conditions, suggérant donc que les basses fréquences spatiales seraient suffisantes pour la catégorisation de sexe d'un visage.

Ainsi, au niveau comportemental, la présente étude suggère donc un impact de l'amblyopie tant en détection qu'en reconnaissance de visages. En reconnaissance, ces déficits seraient plus grands pour les visages que pour d'autres catégories d'objets et seraient présents tant dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope. La présence de déficits comportementaux en perception de visages chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales mène à croire que les mécanismes neuronaux sous-jacents à la perception des visages pourraient être altérés. D'ailleurs, des études antérieures révèlent que le FFA des participants amblyopes ne s'active pas normalement (Lerner et al., 2003) et que les processus neurophysiologiques associés sont modifiés (Bankó et al., 2013). Les expériences 2 et 3 du présent essai avaient justement pour objectif de vérifier l'impact de l'amblyopie sur la N170 et les mécanismes perceptifs sous-jacents en utilisant l'électroencéphalographie.

5.2. Aspects électrophysiologiques

Le présent essai visait deuxièmement à investiguer l'impact de l'amblyopie sur les processus neurophysiologiques associés à la perception des visages. Pour ce faire, des participants amblyopes ont effectué une tâche de catégorisation de sexe en vision monoculaire pendant que leur activité cérébrale était enregistrée à l'aide d'un EEG. Les résultats de notre expérience exploratoire suggèrent des différences marginales entre la N170 des participants contrôles et celle des amblyopes, sans que celles-ci soient significatives. Comparativement aux participants contrôles, la N170 des participants amblyopes se voyait marginalement plus négative, donc plus ample, dans l'œil amblyope que dans l'œil non amblyope tandis qu'aucune différence n'a été observée entre l'œil dominant et non-dominant des participants contrôles. Les analyses exploratoires subséquentes ont montré que cette différence d'amplitude était marginalement plus importante dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche. Pourtant,

dans une étude antérieure, des résultats opposés ont été obtenus. Dans cette étude, l'amplitude de la N170 était moins ample dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope et aucune interaction n'avait été notée entre l'œil et l'hémisphère au niveau de l'amplitude (Bankó et al., 2013). D'ailleurs, une différence majeure entre l'étude de Bankó et al. et la présente étude, pouvant être à l'origine des différents résultats, provient du protocole expérimental. Dans leur étude, Bankó et al. ont choisi d'ajuster la difficulté de la tâche d'un œil à l'autre. Pour ce faire, ils ont présenté des stimuli différents aux deux yeux : les stimuli dans l'œil non-amblyope étaient ambigus sur le plan du sexe tandis que les stimuli présentés à l'œil amblyope ne l'étaient pas. En présentant des stimuli différents aux deux yeux, la possibilité que les résultats soient associés aux différences entre les stimuli ne peut être écartée. De notre côté, nous avons choisi de conserver le même niveau de difficulté pour les deux yeux en présentant les mêmes stimuli d'un œil à l'autre. Les résultats comportementaux à cette tâche ne montrent aucune différence de performance entre l'œil amblyope et l'œil non-amblyope. La présentation de stimuli identiques aux deux yeux est plus écologique que le paradigme utilisé par Bankó et al. puisqu'elle est représentative des demandes auxquelles l'œil amblyope fait face quotidiennement. Ceci suggère que nos résultats, soit que l'amplitude de la N170 serait plus négative, donc plus ample, dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope, reflèteraient une plus grande mobilisation cérébrale pour effectuer la tâche aussi bien avec l'œil amblyope qu'avec l'œil non-amblyope. Cette idée qu'une plus grande amplitude de la N170 est associée à une plus grande mobilisation cérébrale lors de tâches en perception de visage a été suggérée à la suite de la présence de modifications de la N170 associées à l'effet d'inversion (Jacques et al., 2014; Itier & Taylor, 2004, Rossion et al., 2000). Inverser un stimulus sur le plan de l'image rend son traitement plus difficile, peu importe la catégorie visuelle, mais les études montrent que l'effet est plus grand pour les visages que pour d'autres catégories d'objets (Kanwisher, 2000; Yin, 1969, Yovel & Kanwisher, 2004). Dans

l'effet d'inversion, on observe au niveau des ERPs une augmentation de l'amplitude ainsi qu'une plus grande latence de la N170 pour des visages présentés à l'envers que pour des visages présentés à l'endroit (Bentin et al., 1996; Eimer, 2000; Caharel et al., 2006; Itier & Taylor, 2004; Rossion et al., 2000; Sadeh & Yovel, 2010). Ainsi, certains chercheurs suggèrent que l'augmentation du signal EEG reflète une plus grande mobilisation du système de traitement des visages dû à une plus grande difficulté à reconnaître des visages à l'envers et à en extraire l'information pertinente (Rossion et al., 1999; Watanabe et al., 2003; Marzi & Viggiano, 2007). Selon cette hypothèse, la plus grande amplitude de la N170 obtenue dans l'œil amblyope relèverait d'un plus grand effort de traitement pour effectuer une tâche que le système visuel considère plus difficile. Une étude antérieure a aussi obtenu des résultats similaires en EEG chez des participants ayant eu des expériences visuelles précoces anormales (Mondloch et al., 2013). Dans leur étude, Mondloch et coll. ont observé l'impact d'une privation visuelle précoce due à des cataractes congénitales bilatérales sur le développement des mécanismes neuronaux associés à la détection de visages. Leurs résultats sont similaires à ceux que nous avons obtenus dans la présente étude, soit que les patients dont les expériences visuelles précoces étaient anormales avaient une N170 plus ample que les participants contrôles. D'ailleurs, les amblyopes ont des atteintes importantes à leur vision binoculaire et leur système visuel est habitué à ignorer l'information provenant de l'œil amblyope pour se concentrer sur l'œil non-amblyope, phénomène communément appelé la suppression (Harrad, 1996). Utiliser l'information provenant de l'œil amblyope pour en faire du sens nécessiterait donc un effort important du système visuel, ce qui pourrait se présenter par une augmentation de l'amplitude de la N170, tel que nous l'avons observé dans la présente étude.

Outre l'amplitude, un deuxième aspect d'une composante ERP intéressant à observer est la latence, soit le temps nécessaire pour que le cerveau réagisse de manière précise au stimulus

présenté. La N170 répond généralement autour de 170 ms après la présentation d'un visage (Bentin et al., 1996). Chez les amblyopes, une augmentation de la latence de la N170 a été observée lorsque la tâche était effectuée avec l'œil amblyope comparativement à l'œil non-amblyope, résultat ayant aussi précédemment été obtenu par Bankó et al. (2013). Notons toutefois que Bankó et ses collaborateurs avaient noté une augmentation de la latence de la N170 dans l'œil amblyope qui était plus prononcée dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche. De notre côté, cette augmentation de la latence a aussi été retrouvée dans l'œil amblyope, mais celle-ci était présente dans les deux hémisphères, sans différence entre l'hémisphère droit et gauche. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette différence dans nos résultats, dont la taille de l'échantillon, l'hétérogénéité des facteurs amblyogènes et le protocole expérimental. Des études précédentes ont d'ailleurs suggéré que le traitement neuronal de l'information visuelle provenant de l'œil amblyope est plus lent que si l'information provient de l'œil non-amblyope (Eschweiler and Rauschecker, 1993; Sokol, 1983). Ce délai dans la réponse neuronale se reflète dans l'augmentation de la latence de la N170. D'ailleurs, cette plus grande latence de la N170 est aussi retrouvée à la présentation de visages à l'envers (Righart et de Gelder, 2007; Bentin et al., 1996; Eimer, 2000; Rossion et al., 2000; Itier et al., 2007). L'augmentation de la latence de la N170 dans l'œil amblyope comparativement à l'œil non-amblyope semble donc refléter une plus grande complexité neurophysiologique à traiter l'information visuelle provenant de cet œil.

Nos résultats renforcent donc l'idée que les expériences visuelles précoces sont nécessaires pour le développement des habiletés comportementales, mais aussi pour la mise en place du système neuronal associé à la perception des visages, tel que représenté par la composante N170.

5.2.1. L'utilisation des orientations en perception de visages chez des amblyopes

Sachant que la N170 est sensible aux orientations horizontales dans un visage (Jacques et al., 2014) et qu'il existe une corrélation entre l'utilisation des horizontales et les capacités en reconnaissance de visages (Duncan et al., 2019; Pachai et al., 2013), la troisième expérience visait à vérifier si la sous-activation des régions préférentielles aux visages (Lerner et al., 2003), les modifications retrouvées au niveau de la N170 ainsi que la faible performance en perception de visages chez les participants amblyopes étaient plutôt associées à un déficit dans le traitement des orientations horizontales. Ainsi, le dernier objectif de cet essai était donc de fournir une première exploration de l'utilisation des orientations spatiales en perception de visages chez des participants amblyopes en plus de vérifier la sensibilité de la N170 aux orientations. Nous voulions vérifier, de manière exploratoire, si les difficultés observées en perception de visages chez les participants amblyopes peuvent s'expliquer au niveau perceptif par une sous-utilisation des horizontales et/ou par un manque de sensibilité de la N170 à ces orientations.

Au niveau comportemental, nos résultats exploratoires suggèrent que l'œil amblyope est sensible à l'information horizontale et que cette information mène aussi à des bonnes réponses, comme dans l'œil non-amblyope. L'œil amblyope semble donc en mesure d'utiliser les horizontales en perception de visages, mais serait légèrement moins sensible que l'œil non amblyope. Le profil de sensibilité aux différentes orientations chez les participants amblyopes suggère des différences entre l'œil amblyope et l'œil non-amblyope. Premièrement, une différence entre l'utilisation des orientations obliques (près des horizontales) est notée alors que l'œil non-amblyope semble faire un meilleur usage de ces orientations, celles-ci menant plus fréquemment à de bonnes réponses lorsqu'elles étaient présentes dans le stimulus. Deuxièmement, les orientations verticales ont un impact significativement plus négatif dans l'œil

non-amblyope que dans l'œil amblyope. Considérant que le traitement spécialisé des orientations horizontales se précise encore durant l'enfance, et ce jusqu'à l'âge adulte (Goffaux et al., 2015, Balas et al., 2015a, 2015b), le profil de sensibilité aux différentes orientations spatiales est susceptible de subir des modifications si les expériences vécues pendant le développement visuel s'avèrent anormales. Ainsi, l'amblyopie semble avoir un impact sur les capacités de l'œil amblyope à faire usage des horizontales dans une tâche de catégorisation de sexe. D'autre part, la performance de l'œil amblyope semble moins affectée par la présence d'orientations spatiales généralement nuisibles en perception de visages. Toutefois, malgré une moins bonne utilisation des horizontales par l'œil amblyope que par l'œil non-amblyope, les participants ont tout de même démontré un traitement préférentiel à ces orientations, et ce dans les deux yeux. Nos résultats suggèrent donc que les difficultés en perception de visages observées dans le présent essai ne proviendraient pas d'une incapacité des participants amblyopes à utiliser l'information contenue dans les horizontales. D'autres possibilités peuvent expliquer les difficultés observées avec les visages. Par exemple, une seconde information visuelle de bas niveau s'avère importante en perception de visages, soit les fréquences spatiales. La littérature suggère que les fréquences spatiales moyennes soit approximativement entre 8 à 20 cycles par visage (Gaspar et al., 2008; Näsänen, 1999; Royer et al., 2017; Tardif et al., 2017; Willenbockel et al., 2010) seraient les fréquences spatiales les plus utiles en reconnaissance de visages. Une étude menée par Tardif et al., (2019) a montré que les meilleurs en reconnaissance de visages utilisaient l'information contenue dans les hautes fréquences spatiales pour reconnaître un visage alors que ceux qui rencontrent des difficultés ne font pas usage de cette information. Ainsi, les difficultés en reconnaissance de visages associées à l'œil amblyope pourraient aussi s'expliquer par le fait que cet œil est limité dans son utilisation des moyennes et hautes fréquences spatiales étant donné une atteinte de la sensibilité au contraste dans celles-ci (Hess & Howell, 1977; Levi et al., 1980;

Gstalder & Green, 1971; Levi & Harwerth, 1977; Howell et al., 1983). Les amblyopes pourraient donc rencontrer des difficultés à faire usage des fréquences spatiales généralement utiles en reconnaissance de visages. Des études subséquentes seront nécessaires afin de vérifier cette hypothèse.

Chez les participants contrôles, l'œil non-dominant semble faire un meilleur usage des horizontales que l'œil dominant. Ce résultat peut sembler surprenant, mais il est important de considérer comment la dominance oculaire a été évaluée. Notons qu'il existe plusieurs types de dominance oculaire (dominance visuelle ou préférence inconsciente, l'acuité visuelle et la dominance sensorielle) et que celles-ci ne corréler pas toujours entre elles chez des participants normaux (Coren & Kaplan, 1973; Garcia-Perez & Peli, 2019; Pointer, 2007), tandis que chez les participants amblyopes, les trois types de dominance devraient corréler puisque l'œil non-amblyope, comparativement à l'œil amblyope, est celui ayant la meilleure acuité visuelle, étant le plus sensible aux informations sensorielles binoculaires et est l'œil préférentiellement utilisé pour voir. Le choix de type de dominance oculaire mesurée peut donc avoir un impact sur quel œil sera considéré dominant chez les participants contrôles. Dans la littérature, la dominance oculaire a longtemps été interprétée comme une variable dichotomique (dominance de l'œil gauche ou dominance de l'œil droit). Plus récemment, certains chercheurs semblent plutôt la définir comme un continuum, soit la contribution de chaque œil dans des processus de coopération et de compétition qui surviennent pendant la vision binoculaire (Han et al., 2018; Johansson et al., 2015; Mapp et al., 2003). Considérant que la dominance oculaire est encore un concept complexe à opérationnaliser, il est difficile de déterminer avec certitude l'œil dominant de participants contrôles afin de comparer la performance des deux yeux. Ceci nous suggère que le type de dominance oculaire mesurée dans les études se doit d'être divulgué et pris en considération dans l'interprétation des résultats obtenus.

Les résultats comportementaux de la troisième expérience suggèrent donc que l'utilisation des horizontales en perception de visages semble affectée par les expériences visuelles précoces et le profil de sensibilité aux orientations jouerait un rôle dans l'information perceptive utilisée par les participants amblyopes. Toutefois, qu'en est-il au niveau neurophysiologique ? La troisième expérience visait ainsi à vérifier, de manière exploratoire, si l'amblyopie a un impact sur le lien entre les horizontales et la N170 sachant que celle-ci a précédemment été associée à la présence des horizontales dans un visage (Hashemi et al., 2019; Duncan et al., 2018).

5.2.3. L'impact des orientations spatiales sur la N170

En plus de vérifier l'impact de l'amblyopie sur l'utilisation comportementale des horizontales, la troisième expérience visait l'observation de l'impact de cette condition neurodéveloppementale sur la modulation de la N170 par cette information visuelle. Ainsi, les potentiels évoqués ont été enregistrés pendant une tâche de catégorisation de sexe où les stimuli étaient filtrés à l'aide de la méthode des bulles d'orientation (Duncan et al., 2017). Nos résultats chez les participants contrôles reproduisent ce qui a précédemment été observé : la présence des orientations horizontales a un impact sur l'amplitude de la N170. Précédemment, des chercheurs ont montré qu'une randomisation de phase dans le domaine des orientations au niveau des horizontales dans un visage mène à des changements au niveau de l'amplitude de la N170 (Jacques et al., 2014) et que l'amplitude de la N170 était plus grande et sa latence plus courte en réponse à des visages dont la structure horizontale était présente tandis que l'inverse était observé quand la structure verticale d'un visage était présentée (Hashemi et al., 2019). Ce patron de réponse a d'ailleurs été observé dans la présente étude chez les participants contrôles où les horizontales favorisent une N170 plus négative alors que les verticales menaient à une N170 plus positive. Cela étant dit, chez les participants amblyopes, nos résultats suggèrent que l'amplitude

de la N170 ne semble pas affectée par la présence des horizontales, ni des verticales, tant dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope. Ainsi, malgré une utilisation comportementale adéquate des horizontales par les participants amblyopes, nos résultats montrent, de manière exploratoire, que la N170 ne réagit pas normalement à la présence des horizontales dans un visage. Ces résultats ne sont pas étonnants si on considère que le système de traitement des visages se précise jusqu'à l'âge adulte, et peut donc être influencé par les expériences perceptives pendant le développement. Une explication possible du manque de sensibilité de la N170 aux horizontales chez les participants amblyopes peut provenir des anomalies au niveau des réponses du FFA et du OFA qui ont déjà été trouvées chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales (Lerner et al., 2003; Kelly et al. 2019). Ces régions cérébrales semblent être l'origine corticale de la N170 (Yovel et al., 2008; Sadeh et al., 2010; Dalrymple et al., 2011) et sont normalement sensibles à la présence des horizontales dans un visage (Goffaux et al., 2012; Goffaux et al., 2016; Jacques et al., 2014). Ainsi, pris ensemble, nos résultats suggèrent que les expériences visuelles précoces sont importantes dans le développement normal des réponses neuronales associées à l'information dans la structure horizontale d'un visage à l'âge adulte.

5.3. Limites de la présente étude

La présente étude n'est toutefois pas sans limites. D'ailleurs, une première limite importante du présent projet concerne la taille et le manque d'hétérogénéité de l'échantillon d'amblyopes. Le recrutement de participants s'est avéré particulièrement difficile et les critères d'inclusion et d'exclusion étant sévères, cela a limité la participation de plusieurs volontaires. Le petit nombre de participants et le fait que l'ensemble des participantes amblyopes étaient des femmes limitent la généralisation des résultats, qui sont à interpréter avec prudence. Malgré cette limite, la présente étude est la première, à notre connaissance, à vérifier l'impact comportemental

de l'amblyopie unilatérale en reconnaissance et en détection de visages en plus de faire le lien avec les orientations spatiales. L'échantillon se devait donc d'être le plus homogène possible afin d'assurer que les résultats s'expliquent bel et bien par l'amblyopie et non pas d'autres variables possibles associées à l'échantillon (p. ex. ethnique, trouble de santé mentale, etc.). Ainsi, des études subséquentes avec des échantillons plus grands et variés devront être menées afin de reproduire les présents résultats et de vérifier leur généralisation à l'ensemble des amblyopes. Par exemple, il serait intéressant de séparer les amblyopes selon leur facteur amblyogène et d'observer si les résultats sont constants ou si un groupe est plus affecté que l'autre, sachant que les amblyopes anisométriques et strabiques n'ont pas toujours les mêmes patrons de déficits visuels (McKee et al., 2003). Malheureusement, notre petit échantillon ne nous permettait pas de faire cette observation.

Une seconde limite concerne la mesure de dominance oculaire utilisée. Comme mentionné plus haut, il existe différents types de dominance oculaire, soit la dominance sensorielle, la dominance visuelle (œil utilisé pour voir) et la dominance associée à l'acuité visuelle (Porac & Coren, 1976; Gronwall & Sampson, 1971). Ces trois types de dominance oculaire se mesurent d'ailleurs toutes différemment et ne corrélaient pas toujours entre elles (Garcia-Perez et al., 2019). Un participant contrôle pourrait, par exemple, utiliser davantage son œil gauche pour voir, mais avoir une meilleure acuité visuelle dans son œil droit. Différentes études se sont penchées sur les types de mesure de dominance oculaire et à ce jour, aucun consensus n'existe à savoir si les tests étudiés isolent différents aspects d'un construit à multiples facettes ou, plutôt, s'ils mesurent la dominance oculaire en combinaison avec les caractéristiques propres à la tâche que chaque test met de l'avant (Pointer, 2007). Comme les études ne s'entendent pas sur les différentes mesures de dominance oculaire, nous avons utilisé la mesure la plus répandue et cliniquement simple à administrer. Elle semble d'ailleurs être un bon indicateur

de la préférence oculaire (Garcia-Perez et al., 2019), phénomène étant retrouvé chez les participants amblyopes qui ont tendance à préférer un œil (non-amblyope) à l'autre (amblyope) pour voir.

Une troisième limite concerne plus particulièrement la deuxième expérience. L'objectif étant de comparer l'amplitude et la latence de la N170 dans l'œil non-amblyope et l'œil amblyope, il était important que l'information présentée aux deux yeux soit équivalente. Ceci assurait donc que les résultats associés à la N170 ne pouvaient pas s'expliquer par la présentation de différents stimuli aux deux yeux, mais limitait cependant les analyses comportementales et aurait pu rendre la tâche trop difficile avec l'œil amblyope. Toutefois, en conservant le même niveau de difficulté dans les deux yeux, la possibilité que la différence de N170 entre l'œil amblyope et l'œil non-amblyope s'explique par la présentation d'informations différentes, tel que précédemment nommé comme limite dans l'étude de Banko et al. (2013), est nulle.

Cela étant dit, la présente étude possède aussi des forces. La force la plus importante provient de l'utilisation d'un groupe contrôle. Plusieurs études en amblyopie utilisent l'œil non-amblyope comme condition contrôle, ce qui peut expliquer les différences de résultats avec la présente étude. L'amblyopie unilatérale peut nous mener à croire que l'œil non-amblyope s'est développé normalement et ne possède aucun déficit. Toutefois, nos résultats et ceux précédemment obtenus démontrent que d'utiliser l'œil non-amblyope comme comparaison à l'œil amblyope n'est pas toujours adéquat (Meier et al., 2016). Dans notre étude, des difficultés en détection de visages et d'objets ainsi que des difficultés en reconnaissance de visages ont été retrouvées dans l'œil non-amblyope. Sachant que l'une des méthodes de correction de l'amblyopie les plus courantes utilise la privation de l'œil non-amblyope avec une cache oculaire afin de favoriser l'utilisation de l'œil amblyope pour voir, il est possible de stipuler que l'œil non-amblyope ne connaît pas un développement visuel typique. D'ailleurs, la littérature

scientifique n'est pas concluante en ce qui a trait aux effets de la privation monoculaire sur l'œil "normal". Il est souvent assumé que l'œil non-amblyope agit comme un œil normal, mais la littérature scientifique suggère plutôt la présence d'anomalies visuelles (Birch et al., 2019a; Birch et al., 2019b; Meier & Giaschi, 2017; Ho et al., 2005). Ainsi, la présence d'un groupe contrôle dans les études portant sur l'amblyopie est d'une grande importance, car le fait de ne pas trouver de différence entre les deux yeux des participants amblyopes ne veut pas nécessairement dire que l'œil amblyope s'avère normal. Il est possible, comme démontré dans la présente étude, que les deux yeux des participants amblyopes soient déficitaires dans certaines tâches.

5.4. Pistes futures

Plusieurs études subséquentes seront nécessaires pour mieux comprendre comment les expériences visuelles précoces ont un impact sur le fonctionnement du système de traitement des visages à l'âge adulte. Premièrement, les études futures se penchant sur la N170 des amblyopes devraient inclure des tâches avec des objets afin de vérifier si les expériences visuelles précoces anormales vécues par ces participants ont un impact sur la sélectivité de la N170 aux visages. Dans une étude antérieure, Mondloch et al. (2013) ont montré que l'amplitude et la latence de la N170 étaient plus grandes pour des visages Mooney que pour des visages Mooney mélangés chez des participants étant nés avec des cataractes congénitales. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude menée chez des amblyopes n'a comparé la sélectivité de la N170 à des visages et à d'autres catégories d'objets. Deuxièmement, il serait intéressant de vérifier si les difficultés observées en reconnaissance de visages chez les amblyopes sont associées à une mauvaise utilisation des fréquences spatiales moyennes précédemment suggérées comme étant importantes en identification de visages (Gaspar et al., 2008; Näsänen, 1999; Royer et al., 2017; Tardif et al., 2017; Willenbockel et al., 2010). Sachant que le biais visuel pour les fréquences spatiales

moyennes en identification de visages se développe graduellement pendant l'enfance et avec l'expertise (Leonard et al., 2010) et que l'amblyopie affecte le développement normal du traitement des fréquences spatiales (Chen et al., 2021; Kwon et al., 2015; Elleberg et al., 1999), il est possible de croire que cette condition neurodéveloppementale aura un impact sur les fréquences spatiales utilisées en reconnaissance de visages. L'utilisation de méthodes électrophysiologiques combinées à des tâches psychophysiques dans les études futures permettra de mieux définir les origines perceptives et neuronales des déficits observés chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales. L'utilisation de méthodes combinées favorise la compréhension du développement de la reconnaissance des visages et des objets en plus de mieux cibler quels mécanismes prennent en charge un traitement efficace au fil du développement.

5.5. Sommaire des résultats

En somme, la présente étude, malgré sa nature exploratoire, a permis de révéler :

- Une réduction de la sensibilité de l'œil amblyope lorsqu'il doit détecter des visages, mais aussi des objets. L'œil non-amblyope est lui aussi moins sensible en détection de visages, mais le type de stimuli a eu un impact sur les résultats obtenus en détection d'objets dans cet œil.
- Un impact négatif de l'amblyopie sur les habiletés en reconnaissance de visages. Ces difficultés semblent être présentes dans l'œil amblyope ainsi que dans l'œil non-amblyope.
- Une N170 marginalement plus négative, donc plus ample, dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope et ce dans l'hémisphère droit seulement, tandis qu'aucune différence n'a été observée entre l'œil dominant et non-dominant des participants contrôles.

- Un traitement préférentiel aux orientations horizontales, et ce dans les deux yeux malgré une moins bonne utilisation de ces orientations par l'œil amblyope que par l'œil non-amblyope.
- Un manque de sensibilité de la N170 à la présence des horizontales et des verticales dans le stimulus, tant dans l'œil amblyope que dans l'œil non-amblyope.

CHAPITRE VI : CONCLUSION

En conclusion, nos résultats suggèrent que l'expertise acquise au fil du développement visuel chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont anormales semble suffisante pour atteindre des niveaux normaux dans certains aspects de la perception des visages dont la catégorisation de sexe et l'utilisation des horizontales, mais des déficits resteraient présents dans d'autres aspects dont la sensibilité en détection de visages et d'objets ainsi que la reconnaissance de visages. Des anomalies sont aussi présentes au niveau des processus neurophysiologiques associés à la perception des visages. On retrouve une N170 marginalement plus ample dans l'hémisphère droit quand la tâche est effectuée avec l'œil amblyope, résultat reflétant possiblement une plus grande mobilisation cérébrale. Ce résultat, à interpréter avec prudence, met tout de même en lumière la présence d'anomalies du développement des processus neurophysiologiques associés à la perception des visages chez des participants dont les expériences visuelles précoces sont atypiques. Nos résultats montrent aussi que les expériences visuelles précoces sont nécessaires pour le développement de la sensibilité de la N170 aux orientations horizontales. D'ailleurs, l'ensemble des résultats basés sur les potentiels évoqués soulignent l'importance d'études combinant différentes méthodes comportementales et neurophysiologiques pour mieux comprendre le développement du système de reconnaissance de visages et étudier comment les expériences visuelles précoces ont un impact sur la mise en place des processus associés.

RÉFÉRENCES

- Andrews, S., Burton, A. M., Schweinberger, S. R., & Wiese, H. (2017). Event-related potentials reveal the development of stable face representations from natural variability. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(8), 1620–1632. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1195851>
- Atkinson, J. (1984). Human visual development over the first 6 months of life. A review and a hypothesis. *Human neurobiology*, *3*(2), 61-74.
- Bach, M. (1996). The Freiburg Visual Acuity Test-automatic measurement of visual acuity. *Optometry and Vision Science*, *73*(1), 49-53.
- Bach, M. (2006). The Freiburg Visual Acuity Test-variability unchanged by post-hoc re-analysis. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, *245*(7), 965-971.
- Bankó, É. M., Körtvélyes, J., Németh, J., Weiss, B., & Vidnyánszky, Z. (2013). Amblyopic deficits in the timing and strength of visual cortical responses to faces. *Cortex*, *49*(4), 1013-1024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.03.021>
- Balas, B. J., Schmidt, J., & Saville, A. (2015a). A face detection bias for horizontal orientations develops in middle childhood. *Frontiers in psychology*, *6*, 772. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00772>
- Balas, B., Huynh, C., Saville, A., & Schmidt, J. (2015b). Orientation biases for facial emotion recognition during childhood and adulthood. *Journal of experimental child psychology*, *140*, 171-183.
- Barragan-Jason, G., Besson, G., Ceccaldi, M., & Barbeau, E. (2013, 2013-March-04). Fast and Famous: Looking for the Fastest Speed at Which a Face Can be Recognized [Original Research]. *Frontiers in Psychology*, *4*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00100>

- Bate, S., Parris, B., Haslam, C., & Kay, J. (2010). Socio-emotional functioning and face recognition ability in the normal population. *Personality and Individual Differences*, 48(2), 239-242.
- Bedell, H. E., & Flom, M. C. (1985). Bilateral oculomotor abnormalities in strabismic amblyopes: evidence for a common central mechanism. *Documenta Ophthalmologica*, 59, 309-321.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., & McCarthy, G. (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of cognitive neuroscience*, 8(6), 551-565.
- Bentin, S., & Deouell, L. Y. (2000). Structural encoding and identification in face processing: ERP evidence for separate mechanisms. *Cognitive neuropsychology*, 17(1-3), 35-55.
<https://doi.org/10.1080/026432900380472>
- Behrmann, M., & Avidan, G. (2005). Congenital prosopagnosia: face-blind from birth. *Trends in cognitive sciences*, 9(4), 180-187.
- Bi, H., Zhang, B., Tao, X., Harwerth, R. S., Smith, E. L., III, & Chino, Y. M. (2011). Neuronal Responses in Visual Area V2 (V2) of Macaque Monkeys with Strabismic Amblyopia. *Cerebral Cortex*, 21(9), 2033-2045. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq272>
- Bindemann, M., & Lewis, M. B. (2013). Face detection differs from categorization: Evidence from visual search in natural scenes. *Psychonomic bulletin & review*, 20(6), 1140-1145.
- Birch, E. E., Kelly, K. R., & Giaschi, D. E. (2019a). Fellow eye deficits in amblyopia. *Journal of binocular vision and ocular motility*, 69(3), 116-125.
- Birch, E. E., Jost, R. M., Wang, Y. Z., Kelly, K. R., & Giaschi, D. E. (2019b). Impaired fellow eye motion perception and abnormal binocular function. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 60(10), 3374-3380.

- Bobak, A. K., Hancock, P. J., & Bate, S. (2016). Super-recognisers in action: Evidence from face-matching and face memory tasks. *Applied Cognitive Psychology, 30*(1), 81-91.
- Bonneh, Y. S., Sagi, D., & Polat, U. (2004). Local and non-local deficits in amblyopia: acuity and spatial interactions. *Vision research, 44*(27), 3099-3110.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.07.031>
- Boothe, R. G., Dobson, V., & Teller, D. Y. (1985). Postnatal development of vision in human and nonhuman primates. *Annual review of neuroscience, 8*(1), 495-545.
- Brainard, D. H., & Vision, S. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial vision, 10*(4), 433-436.
doi : [10.1163/156856897x00357](https://doi.org/10.1163/156856897x00357)
- Brown, E., & Perrett, D. I. (1993). What gives a face its gender?. *Perception, 22*(7), 829-840.
- Burns, V. (2019). *Les différences individuelles en identification de visages corrèlent avec l'habileté de détection de visages*, [Université du Québec en Outaouais].
- Bukach, C. M., Gauthier, I., & Tarr, M. J. (2006). Beyond faces and modularity: the power of an expertise framework. *Trends in cognitive sciences, 10*(4), 159-166.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.02.004>
- Butler, S., Blais, C., Gosselin, F., Bub, D., & Fiset, D. (2010). Recognizing famous people. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(6), 1444-1449.
- Caharel, S., Fiori, N., Bernard, C., Lalonde, R., & Rebaï, M. (2006). The effects of inversion and eye displacements of familiar and unknown faces on early and late-stage ERPs. *International Journal of Psychophysiology, 62*(1), 141-151.
- Caharel, S., d'Arripe, O., Ramon, M., Jacques, C., & Rossion, B. (2009). Early adaptation to repeated unfamiliar faces across viewpoint changes in the right hemisphere: evidence from the N170 ERP component. *Neuropsychologia, 47*(3), 639-643.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.016>

- Calder, A. J., & Young, A. W. (2005). Understanding the recognition of facial identity and facial expression. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(8), 641-651.
- Cantlon, J. F., Pined, P., Dehaene, S., & Pelphrey, K. A. (2010). Cortical Representations of Symbols, Objects, and Faces Are Pruned Back during Early Childhood. *Cerebral Cortex*, 21(1), 191-199. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq078>
- Cassia VM, Turati C, Simion F. Can a nonspecific bias toward top-heavy patterns explain newborns' face preference? *Psychological Science*. 2004 Jun;15(6):379-383. DOI: 10.1111/j.0956-7976.2004.00688.x. PMID: 15147490.
- Cellerino, A., Borghetti, D., & Sartucci, F. (2004). Sex differences in face gender recognition in humans. *Brain research bulletin*, 63(6), 443-449.
- Cerf, M., Harel, J., Einhäuser, W., & Koch, C. (2007). Predicting human gaze using low-level saliency combined with face detection. *Advances in neural information processing systems*, 20.
- Chauvin, A., Worsley, K. J., Schyns, P. G., Arguin, M., & Gosselin, F. (2005). Accurate statistical tests for smooth classification images. *Journal of vision*, 5(9), 1-1.
- Chen, S., Min, S. H., Cheng, Z., Xiong, Y., Yu, X., Wei, L., ... & Zhou, J. (2021). Binocular visual deficits at mid to high spatial frequency in treated amblyopes. *Iscience*, 24(7), 102727.
- Chronicle, E. P., Chan, M., Hawkings, C., Mason, K., Smethurst, K., Stallybrass, K., Westrope, K., & Wright, K. (1995). You can tell by the nose—Judging sex from an isolated facial feature. *Perception*, 24, 969-973.
- Chung, S. T. L., Kumar, G., Li, R. W., & Levi, D. M. (2015). Characteristics of fixational eye movements in amblyopia: Limitations on fixation stability and acuity? *Vision Res*, 114, 87-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.016>

- Ciuffreda, K.J.; Levi, D.M.; Selenow, A. (1991). *Amblyopia: Basic and Clinical Aspects*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Cohen Kadosh, K., Cohen Kadosh, R., Dick, F., & Johnson, M. H. (2011). Developmental Changes in Effective Connectivity in the Emerging Core Face Network. *Cerebral Cortex*, 21(6), 1389-1394. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq215>
- Coren, S., & Kaplan, C. P. (1973). Patterns of ocular dominance. *American journal of optometry and archives of American Academy of Optometry*, 50(4), 283-292.
- Corrow, S. L., Dalrymple, K. A., & Barton, J. J. (2016). Prosopagnosia: current perspectives. *Eye and brain*, 8, 165.
- Crouzet, S. M., & Thorpe, S. J. (2011). Low-level cues and ultra-fast face detection. *Frontiers in Psychology*, 2, 342.
- Dakin, S., Hess, R., Ledgeway, T., & Achtman, R. (2002). What causes non-monotonic tuning of fMRI response to noisy images? *Current Biology*, 12(14), R476-R477.
- Dakin, S. C., & Watt, R. J. (2009). Biological “bar codes” in human faces. *Journal of vision*, 9(4), 2-2.
- Davies, S., Bishop, D., Manstead, A. S., & Tantam, D. (1994). Face perception in children with autism and Asperger's syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 35(6), 1033-1057.
- de Haan, M., & Nelson, C. A. (1999). Brain activity differentiates face and object processing in 6-month-old infants. *Developmental Psychology*, 35(4), 1113–1121. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.35.4.1113>
- de Haan, M., Pascalis, O., & Johnson, M. H. (2002). Specialization of neural mechanisms underlying face recognition in human infants. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(2), 199-209. <https://doi.org/10.1162/089892902317236849>

- de Haan, M. (2011). The neurodevelopment of face perception. In A. Calder, G. Rhodes, M. Johnson, & J. Haxby (Eds.), *Oxford Handbook of Face Perception*. Oxford University Press.
- De Heering, A., & Maurer, D. (2014). Face memory deficits in patients deprived of early visual input by bilateral congenital cataracts. *Developmental psychobiology*, *56*(1), 96-108.
- De Heering, A., Goffaux, V., Dollion, N., Godard, O., Durand, K., & Baudouin, J. Y. (2016). Three-month-old infants' sensitivity to horizontal information within faces. *Developmental Psychobiology*, *58*(4), 536-542.
- De Renzi, E., Perani, D., Carlesimo, G. A., Silveri, M., & Fazio, F. (1994). Prosopagnosia can be associated with damage confined to the right hemisphere—an MRI and PET study and a review of the literature. *Neuropsychologia*, *32*(8), 893-902.
- DeSantis, D. (2014). Amblyopia. *Pediatric Clinics of North America*, *61*(3), 505–518.
doi:10.1016/j.pcl.2014.03.006
- Diamond, R., Carey, S., & Back, K. J. (1983). Genetic influences on the development of spatial skills during early adolescence. *Cognition*, *13*(2), 167-185.
- Donahue, S. P. (2005). The relationship between anisometropia, patient age, and the development of amblyopia. *Transactions of the American Ophthalmological Society*, *103*, 313-336.
- Duchaine, B. C., & Nakayama, K. (2006). Developmental prosopagnosia: a window to content-specific face processing. *Current opinion in neurobiology*, *16*(2), 166-173.
- Duchaine, B., & Yovel, G. (2015). A revised neural framework for face processing. *Annual review of vision science*, *1*, 393-416.
- Duncan, J., Gosselin, F., Cobarro, C., Dugas, G., Blais, C., & Fiset, D. (2017). Orientations for the successful categorization of facial expressions and their link with facial features. *Journal of vision*, *17*(14), 7-7. <https://doi.org/10.1167/17.14.7>

- Duncan, J., Gosselin, F., Blais, C., & Fiset, D. (2018). N170 sensitivity to the horizontal information of facial expressions. *Journal of Vision, 18*(10), 909-909.
- Duncan, J., Royer, J., Dugas, G., Blais, C., & Fiset, D. (2019). Revisiting the link between horizontal tuning and face processing ability with independent measures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 45*(11), 1429-1435. <https://doi.org/10.1037/xhp0000684>.
- Eckstein, M. P., & Ahumada, A. J. (2002). Classification images: A tool to analyze visual strategies. *Journal of vision, 2*(1), i-i. doi:<https://doi.org/10.1167/2.1.i>
- Eimer, M. (2000). The face-specific N170 component reflects late stages in the structural encoding of faces. *Neuroreport, 11*(10), 2319-2324.
- Ellemborg, D., Lewis, T. L., Liu, C. H., & Maurer, D. (1999). Development of spatial and temporal vision during childhood. *Vision research, 39*(14), 2325-2333.
- Epstein, R., & Kanwisher, N. (1998). A cortical representation of the local visual environment. *Nature, 392*(6676), 598-601. <https://doi.org/10.1038/33402>
- Eschweiler, G. W., & Rauschecker, J. P. (1993). Temporal integration in visual cortex of cats with surgically induced strabismus. *European Journal of Neuroscience, 5*(11), 1501-1509.
- Farah, M. J., Tanaka, J. W., & Drain, H. M. (1995). What causes the face inversion effect? *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance, 21*(3), 628.
- Farzin, F., & Norcia, A. M. (2011). Impaired visual decision-making in individuals with amblyopia. *Journal of vision, 11*(14), 6-6. <https://doi.org/10.1167/11.14.6>
- Flevaris, A. V., Robertson, L. C., & Bentin, S. (2008). Using spatial frequency scales for processing face features and face configuration: An ERP analysis. *Brain Research, 1194*, 100-109.

- Fox, C. J., Iaria, G., & Barton, J. J. (2008). Disconnection in prosopagnosia and face processing. *Cortex*, *44*(8), 996-1009.
- Friedman, D. S., Repka, M. X., Katz, J., Giordano, L., Ibrionke, J., Hawse, P., & Tielsch, J. M. (2009). Prevalence of amblyopia and strabismus in white and African American children aged 6 through 71 months the Baltimore Pediatric Eye Disease Study. *Ophthalmology*, *116*(11), 2128-2134.e2342. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2009.04.034>
- Fuhrmann, D., Knoll, L., Sakhardande, A., Speekenbrink, M., Kadosh, K. C., & Blakemore, S.-J. (2016). Perception and recognition of faces in adolescence. *Scientific Reports*, *6*(1), 1-8.
- Furl, N., Garrido, L., Dolan, R. J., Driver, J., & Duchaine, B. (2011). Fusiform Gyrus Face Selectivity Relates to Individual Differences in Facial Recognition Ability. *Journal of cognitive neuroscience*, *23*(7), 1723-1740. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21545>
- Fysh, M. C. (2018). Individual differences in the detection, matching and memory of faces. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *3*(1), 1-12.
- Gandhi, T. K., Singh, A. K., Swami, P., Ganesh, S., & Sinha, P. (2017). Emergence of categorical face perception after extended early-onset blindness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(23), 6139-6143.
- Ganis, G., Smith, D., & Schendan, H. E. (2012). The N170, not the P1, indexes the earliest time for categorical perception of faces, regardless of interstimulus variance. *Neuroimage*, *62*(3), 1563-1574. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.043>
- García-Pérez, M. A., & Peli, E. (2019). Psychophysical tests do not identify ocular dominance consistently. *i-Perception*, *10*(2), 1-40. DOI: 10.1177/2041669519841397.
- Garrido, L., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2008). Face detection in normal and prosopagnosic individuals. *Journal of Neuropsychology*, *2*(1), 119-140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1348/174866407X246843>

- Gauthier, I., Tarr, M. J., Anderson, A. W., Skudlarski, P., & Gore, J. C. (1999). Activation of the middle fusiform 'face area' increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature neuroscience*, 2(6), 568-573. <https://doi.org/10.1038/9224>
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000a). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature neuroscience*, 3(2), 191-197.
- Gauthier, I., Tarr, M. J., Moylan, J., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000b). The fusiform “face area” is part of a network that processes faces at the individual level. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(3), 495-504.
- Geldart, S., Mondloch, C. J., Maurer, D., De Schonen, S., & Brent, H. P. (2002). The effect of early visual deprivation on the development of face processing. *Developmental science*, 5(4), 490-501.
- Gerling, J., & Spillmann, L. (1987). Duration of visual afterimages on modulated backgrounds: post receptor processes. *Vision Res*, 27(4), 521-527.
- Germine, L. T., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2011). Where cognitive development and aging meet: Face learning ability peaks after age 30. *Cognition*, 118(2), 201-210.
- Ghasia F. F., Otero-Millan J., Shaikh A. G. (2018). Abnormal fixational eye movements in strabismus. *British Journal of Ophthalmology*, 102, 253–259. doi:10.1136/bjophthalmol-2017-310346
- Goffaux, V., Gauthier, I., & Rossion, B. (2003). Spatial scale contribution to early visual differences between face and object processing. *Cognitive Brain Research*, 16(3), 416- 424. doi : 10.1016/s0926-6410(03)00056-9
- Goffaux, V., & Dakin, S. C. (2010). Horizontal information drives the behavioral signatures of face processing. *Frontiers in psychology*, 1, 143. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00143>

- Goffaux, V., van Zon, J., & Schiltz, C. (2011). The horizontal tuning of face perception relies on the processing of intermediate and high spatial frequencies. *Journal of Vision*, *11*(10), 1-1.
- Goffaux, V., Duecker, F., Schiltz, C., & Goebel, R. (2012). Orientation tuning for faces in the Fusiform Face Area and Primary Visual Cortex. *Journal of Vision*, *12*(9), 27-27.
- Goffaux V., Poncin A., Schiltz C. (2015). Selectivity of Face Perception to Horizontal Information over Lifespan (from 6 to 74 Year Old). *PLoS ONE* *10*(9): e0138812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138812>
- Goffaux, V., Duecker, F., Hausfeld, L., Schiltz, C., & Goebel, R. (2016). Horizontal tuning for faces originates in high-level Fusiform Face Area. *Neuropsychologia*, *81*, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.12.004>
- Goffaux, V., & Greenwood, J. A. (2016). The orientation selectivity of face identification. *Scientific reports*, *6*(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep34204>
- Golarai, G., Ghahremani, D. G., Whitfield-Gabrieli, S., Reiss, A., Eberhardt, J. L., Gabrieli, J. D. E., & Grill-Spector, K. (2007). Differential development of high-level visual cortex correlates with category-specific recognition memory. *Nature neuroscience*, *10*(4), 512-522. <https://doi.org/10.1038/nn1865>
- Golarai, G., Liberman, A., Yoon, J., & Grill-Spector, K. (2010). Differential development of the ventral visual cortex extends through adolescence [Original Research]. *Frontiers in Human Neuroscience*, *3*. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.080.2009>
- Gold, J. M., Mundy, P. J., & Tjan, B. S. (2012). The perception of a face is no more than the sum of its parts. *Psychological science*, *23*(4), 427-434.
- González, E. G., Wong, A. M. F., Niechwiej-Szwedo, E., Tarita-Nistor, L., & Steinbach, M. J. (2012). Eye Position Stability in Amblyopia and in Normal Binocular Vision. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, *53*(9), 5386-5394. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-9941>

- Gosling, A., & Eimer, M. (2011). An event-related brain potential study of explicit face recognition. *Neuropsychologia*, *49*(9), 2736-2745.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.05.025>
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2003). Superstitious Perceptions Reveal Properties of Internal Representations. *Psychological Science*, *14*(5), 505–509. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.03452>
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2004). A picture is worth thousands of trials: Rendering the use of visual information from spiking neurons to recognition. *Cognitive Science*, *28*(2), 141-146.
- Grady, C. L., Mondloch, C. J., Lewis, T. L., & Maurer, D. (2014). Early visual deprivation from congenital cataracts disrupts activity and functional connectivity in the face network. *Neuropsychologia*, *57*, 122-139.
- Grand, R. L., Mondloch, C. J., Maurer, D., & Brent, H. P. (2003). Expert face processing requires visual input to the right hemisphere during infancy. *Nature neuroscience*, *6*(10), 1108-1112.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). Signal detection theory and psychophysics (Vol. 1). Wiley New York.
- Gronwall, D. M. A., & Sampson, H. (1971). Ocular dominance: a test of two hypotheses. *British Journal of Psychology*, *62*(2), 175-185.
- Group, M.-e. P. E. D. S. (2008). Prevalence of amblyopia and strabismus in African American and Hispanic children ages 6 to 72 months: the Multi-ethnic Pediatric Eye Disease Study. *Ophthalmology*, *115*(7), 1229-1236. e1221.
- Gstalder, R. J., & Green, D. G. (1971). Laser interferometric acuity in amblyopia. *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, *8*(4), 251-256.
- Gunton, K. B. (2013). Advances in amblyopia: what have we learned from PEDIG trials? *Pediatrics*, *131*(3), 540-547.

- Halit, H., De Haan, M., & Johnson, M. H. (2003). Cortical specialisation for face processing: face-sensitive event-related potential components in 3-and 12-month-old infants. *Neuroimage*, *19*(3), 1180-1193. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00076-4)
- Han, C., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2018). On sensory eye dominance revealed by binocular integrative and binocular competitive stimuli. *Investigative ophthalmology & visual science*, *59*(12), 5140-5148.
- Harrad, R. A., & Hess, R. F. (1992). Binocular integration of contrast information in amblyopia. *Vision Res*, *32*(11), 2135-2150. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989\(92\)90075-T](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989(92)90075-T)
- Harrad, R. (1996). Psychophysics of suppression. *Eye*, *10*(2), 270-273.
- Hashemi, A., Pachai, M. V., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2019). The role of horizontal facial structure on the N170 and N250. *Vision research*, *157*, 12-23.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in cognitive sciences*, *4*(6), 223-233.
- Hemond, C. C., Kanwisher, N. G., & Op de Beeck, H. P. (2007). A preference for contralateral stimuli in human object-and face-selective cortex. *PLoS one*, *2*(6), e574.
- Herrmann, M. J., Ellgring, H., & Fallgatter, A. J. (2004). Early-stage face processing dysfunction in patients with schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, *161*(5), 915-917.
- Hershler, O., & Hochstein, S. (2005). At first sight: A high-level pop out effect for faces. *Vision Res*, *45*(13), 1707-1724.
- Hess, R. F., & Howell, E. R. (1977). The threshold contrast sensitivity function in strabismic amblyopia: Evidence for a two type classification. *Vision Res*, *17*(9), 1049-1055. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989\(77\)90009-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989(77)90009-8)

- Hess, R. F., & Holliday, I. E. (1992). The spatial localization deficit in amblyopia. *Vision Res*, 32(7), 1319-1339. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989\(92\)90225-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0042-6989(92)90225-8)
- Hess, R. F., & Demanins, R. (1998). Contour integration in anisometropic amblyopia. *Vision Res*, 38(6), 889-894. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00233-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00233-2)
- Hillairet de Boisferon, A., Dupierrix, E., Uttley, L., DeBruine, L. M., Jones, B. C., & Pascalis, O. (2019). Sex categorization of faces: The effects of age and experience. *i-Perception*, 10(1), 2041669519830414.
- Ho, C. S., Giaschi, D. E., Boden, C., Dougherty, R., Cline, R., & Lyons, C. (2005). Deficient motion perception in the fellow eye of amblyopic children. *Vision Res*, 45(12), 1615-1627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.12.009>
- Ho, C. S., Paul, P. S., Asirvatham, A., Cavanagh, P., Cline, R., & Giaschi, D. E. (2006). Abnormal spatial selection and tracking in children with amblyopia. *Vision research*, 46(19), 3274-3283.
- Hole, G., & Bourne, V. (2010). *Face processing: Psychological, neuropsychological, and applied perspectives*. Oxford University Press.
- Howell, E. R., Mitchell, D. E., & Keith, C. G. (1983). Contrast thresholds for sine gratings of children with amblyopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 24(6), 782-787.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1965). Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint. *Journal of neurophysiology*, 28(6), 1041-1059.
- Hubel, D. H., Wiesel, T. N., LeVay, S., Barlow, H. B., & Gaze, R. M. (1977). Plasticity of ocular dominance columns in monkey striate cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 278(961), 377-409. <https://doi.org/doi:10.1098/rstb.1977.0050>

- Hugenberg, K., Young, S. G., Bernstein, M. J., & Sacco, D. F. (2010). The categorization-individuation model: an integrative account of the other-race recognition deficit. *Psychological review*, *117*(4), 1168.
- Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*, *28*(6), 517-527. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0028-3932\(90\)90031-I](https://doi.org/10.1016/0028-3932(90)90031-I)
- Huynh, C. M., & Balas, B. (2014). Emotion recognition (sometimes) depends on horizontal orientations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *76*, 1381-1392.
- Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2004). N170 or N1? Spatiotemporal differences between object and face processing using ERPs. *Cerebral cortex*, *14*(2), 132-142.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhg111>
- Itier, R. J., Alain, C., Sedore, K., & McIntosh, A. R. (2007). Early face processing specificity: it's in the eyes!. *Journal of cognitive neuroscience*, *19*(11), 1815-1826.
- Jacques, C., & Rossion, B. (2006). The speed of individual face categorization. *Psychological science*, *17*(6), 485-492. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01733.x>
- Jacques, C., Schiltz, C., & Goffaux, V. (2014). Face perception is tuned to horizontal orientation in the N170 time window. *Journal of vision*, *14*(2), 5-5. <https://doi.org/10.1167/14.2.5>
- Johansson, J., Seimyr, G. Ö., & Pansell, T. (2015). Eye dominance in binocular viewing conditions. *Journal of vision*, *15*(9), 21-21.
- Johnson, M. H., Dziurawiec, S., Ellis, H., & Morton, J. (1991). Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline. *Cognition*, *40*(1-2), 1-19.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*, *17*(11), 4302-4311.

- Kanwisher, N. (2000). Domain specificity in face perception. *Nature neuroscience*, 3(8), 759-763.
- Kaufmann, J. M., Schweinberger, S. R., & Burton, A. M. (2009). N250 ERP correlates of the acquisition of face representations across different images. *Journal of cognitive neuroscience*, 21(4), 625-641.
- Kelly, D. J., Liu, S., Ge, L., Quinn, P. C., Slater, A. M., Lee, K., Liu, Q., & Pascalis, O. (2007a). Cross-race preferences for same-race faces extend beyond the African versus Caucasian contrast in 3-month-old infants. *Infancy*, 11(1), 87-95.
- Kelly, D. J., Quinn, P. C., Slater, A. M., Lee, K., Ge, L., & Pascalis, O. (2007b). The other-race effect develops during infancy: Evidence of perceptual narrowing. *Psychological science*, 18(12), 1084-1089.
- Kelly, K. R., Gallie, B. L., & Steeves, J. K. (2012). Impaired face processing in early monocular deprivation from enucleation. *Optometry and Vision Science*, 89(2), 137-147.
- Kelly, K. R., Gallie, B. L., & Steeves, J. K. (2019). Early monocular enucleation selectively disrupts neural development of face perception in the occipital face area. *Experimental Eye Research*, 183, 57-61.
- Kiorpes, L., & Movshon, J. A. (1996). Amblyopia: A developmental disorder of the central visual pathways. In *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology* (Vol. 61, pp. 39-48). Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Kiorpes, L., Kiper, D. C., O'Keefe, L. P., Cavanaugh, J. R., & Movshon, J. A. (1998). Neuronal Correlates of Amblyopia in the Visual Cortex of Macaque Monkeys with Experimental Strabismus and Anisometropia. *The Journal of Neuroscience*, 18(16), 6411-6424.
<https://doi.org/10.1523/jneurosci.18-16-06411.1998>

- Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in psychtoolbox-3. *Perception, 36*(14), 1-16.
- Knox, P. J., Ledgeway, T., & Simmers, A. J. (2013). The effects of spatial offset, temporal offset and image speed on sensitivity to global motion in human amblyopia. *Vision Research, 86*, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.04.003>
- Kozma, P., & Kiorpes, L. (2003). Contour integration in amblyopic monkeys. *Visual neuroscience, 20*(5), 577-588. doi:10.1017/S0952523803205113
- Kovács, I., Polat, U., Pennefather, P. M., Chandna, A., & Norcia, A. M. (2000). A new test of contour integration deficits in patients with a history of disrupted binocular experience during visual development. *Vision research, 40*(13), 1775-1783. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00008-0)
- Kriegeskorte, N., Formisano, E., Sorger, B., & Goebel, R. (2007). Individual faces elicit distinct response patterns in human anterior temporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 104*(51), 20600-20605.
- Kwon, M., Wiecek, E., Dakin, S. C., & Bex, P. J. (2015). Spatial-frequency dependent binocular imbalance in amblyopia. *Scientific reports, 5*(1), 17181.
- Leonard, H. C., Karmiloff-Smith, A., & Johnson, M. H. (2010). The development of spatial frequency biases in face recognition. *Journal of Experimental Child Psychology, 106*(4), 193-207.
- Lerner, Y., Pianka, P., Azmon, B., Leiba, H., Stolovitch, C., Loewenstein, A., Harel, M., Hendler, T., & Malach, R. (2003). Area-specific amblyopic effects in human occipitotemporal object representations. *Neuron, 40*(5), 1023-1029.
- Levi, D., & Harwerth, R. S. (1977). Spatio-temporal interactions in anisometric and strabismic amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci, 16*(1), 90-95.

- Levi, D. M., Harwerth, R. S., & Manny, R. E. (1979). Suprathreshold spatial frequency detection and binocular interaction in strabismic and anisometric amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 18(7), 714-725.
- Levi, D. M., Harwerth, R. S., & Smith, E. (1980). Binocular interactions in normal and anomalous binocular vision. *Documenta Ophthalmologica*, 49, 303-324.
- Levi, D. M., & Klein, S. (1982). Hyperacuity and amblyopia. *Nature*, 298(5871), 268-270.
<https://doi.org/10.1038/298268a0>
- Levi, D. M., & Klein, S. A. (1986). Sampling in spatial vision. *Nature*, 320(6060), 360-362.
<https://doi.org/10.1038/320360a0>
- Levi, D. M., & Klein, S. A. (2003). Noise provides some new signals about the spatial vision of amblyopes. *Journal of Neuroscience*, 23(7), 2522-2526.
- Levi, D. M. (2006). Visual Processing in Amblyopia: Human Studies. *Strabismus*, 14(1), 11-19.
<https://doi.org/10.1080/09273970500536243>
- Levi, D. M., Yu, C., Kuai, S.-G., & Rislove, E. (2007). Global contour processing in amblyopia. *Vision Res*, 47(4), 512-524. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.10.014>
- Levi, D. M., Knill, D. C., & Bavelier, D. (2015). Stereopsis and amblyopia: A mini-review. *Vision Res*, 114, 17-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.002>
- Levi, D. M. (2020). Rethinking amblyopia 2020 [Research Support, N.I.H., Extramural]. *Vision Res*, 176, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.07.014>
- Levin, D. T. (2000). Race as a visual feature: using visual search and perceptual discrimination tasks to understand face categories and the cross-race recognition deficit. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(4), 559.

- Lewis, T. L., Maurer, D., & Brent, H. P. (1995). Development of grating acuity in children treated for unilateral or bilateral congenital cataract. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 36(10), 2080-2095.
- Liu, J., Harris, A., & Kanwisher, N. (2002). Stages of processing in face perception: an MEG study. *Nature neuroscience*, 5(9), 910-916.
- Liu, J., Harris, A., & Kanwisher, N. (2010). Perception of face parts and face configurations: an fMRI study. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(1), 203-211.
- Lundqvist, D., Flykt, A., & Öhman, A. (1998). Karolinska directed emotional faces. *Cognition and Emotion*.
- Mansouri, H. (1999). Aligned rank transform tests in linear models. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 79(1), 141-155.
- Mapp, A. P., Ono, H., & Barbeito, R. (2003). What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review. *Perception & Psychophysics*, 65(2), 310-317.
- Marzi, T., & Viggiano, M. P. (2007). Interplay between familiarity and orientation in face processing: An ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 65(3), 182-192.
- Maurer, D., & Lewis, T. L. (2001). Visual acuity: the role of visual input in inducing postnatal change. *Clinical Neuroscience Research*, 1(4), 239-247.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1566-2772\(01\)00010-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1566-2772(01)00010-X)
- Maurer, D., Le Grand, R., & Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 255-260.
- Maurer, D., & Mondloch, C. (2011). Sensitive periods in face perception. In A. Calder, G. Rhodes, M. Johnson, & J. Haxby (Eds.), *Oxford Handbook of Face Perception*. Oxford University Press.

- Maurer, D., & Lewis, T. L. (2018). Visual systems. In *The Neurobiology of Brain and Behavioral Development* (pp. 213-233). Elsevier.
- Maylor, E. A., & Valentine, T. (1992). Linear and nonlinear effects of aging on categorizing and naming faces. *Psychology and Aging, 7*(2), 317.
- McGivern, R. F., Andersen, J., Byrd, D., Mutter, K. L., & Reilly, J. (2002). Cognitive efficiency on a match to sample task decreases at the onset of puberty in children. *Brain and cognition, 50*(1), 73-89.
- McGugin, R. W., Tanaka, J. W., Lebrecht, S., Tarr, M. J., & Gauthier, I. (2011). Race-specific perceptual discrimination improvement following short individuation training with faces. *Cognitive science, 35*(2), 330-347.
- McGugin, R. W., Richler, J. J., Herzmann, G., Speegle, M., & Gauthier, I. (2012). The Vanderbilt Expertise Test reveals domain-general and domain-specific sex effects in object recognition. *Vision Res, 69*, 10-22.
- McKee, S. P., Levi, D. M., & Movshon, J. A. (2003). The pattern of visual deficits in amblyopia. *Journal of vision, 3*(5), 5-5.
- McKone, E., Crookes, K., & Kanwisher, N. (2009). The cognitive and neural development of face recognition in humans.
- McKone, E., Hall, A., Pidcock, M., Palermo, R., Wilkinson, R. B., Rivolta, D., Yovel, G., Davis, J. M., & O'Connor, K. B. (2011). Face ethnicity and measurement reliability affect face recognition performance in developmental prosopagnosia: Evidence from the Cambridge Face Memory Test–Australian. *Cognitive neuropsychology, 28*(2), 109-146.
- Meier, K., Sum, B., & Giaschi, D. (2016). Global motion perception in children with amblyopia as a function of spatial and temporal stimulus parameters. *Vision Research, 127*, 18-27.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.06.011>

- Meier, K., & Giaschi, D. (2017). Unilateral amblyopia affects two eyes: fellow eye deficits in amblyopia. *Investigative ophthalmology & visual science*, 58(3), 1779-1800.
- Miles, W. R. (1929). Ocular dominance demonstrated by unconscious sighting. *Journal of experimental psychology*, 12(2), 113.
- Miles, W. R. (1930). Ocular dominance in human adults. *The journal of general psychology*, 3(3), 412-430.
- Mondloch, C. J., Le Grand, R., & Maurer, D. (2002). Configural Face Processing Develops more Slowly than Featural Face Processing. *Perception*, 31(5), 553-566.
<https://doi.org/10.1068/p3339>
- Mondloch, C. J., Le Grand, R., & Maurer, D. (2003). Early visual experience is necessary for the development of some—but not all—aspects of face processing. *The development of face processing in infancy and early childhood: Current perspectives*, 99-117.
- Mondloch, C. J., Maurer, D., & Ahola, S. (2006). Becoming a Face Expert. *Psychological science*, 17(11), 930-934. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01806.x>
- Mondloch, C. J., Segalowitz, S. J., Lewis, T. L., Dywan, J., Le Grand, R., & Maurer, D. (2013). The effect of early visual deprivation on the development of face detection. *Developmental science*, 16(5), 728-742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/desc.12065>
- Mooney, C. M. (1957). Age in the development of closure ability in children. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 11(4), 219.
- Moscovitch, M., Winocur, G., & Behrmann, M. (1997). What is special about face recognition? Nineteen experiments on a person with visual object agnosia and dyslexia but normal face recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, 9(5), 555-604.
<https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.5.555>

- Motta-Mena, N. V., & Scherf, K. S. (2017). Pubertal development shapes perception of complex facial expressions. *Developmental science*, 20(4), e12451.
- Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M. H., Bentin, S., Aguera, P. E., & Pernier, J. (2000). Neurophysiological correlates of face gender processing in humans. *European Journal of Neuroscience*, 12(1), 303-310.
- Movshon, J., Eggers, H., Gizzi, M., Hendrickson, A., Kiorpes, L., & Boothe, R. (1987). Effects of early unilateral blur on the macaque's visual system. III. Physiological observations. *The Journal of Neuroscience*, 7(5), 1340-1351. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.07-05-01340.1987>
- Muckli, L., Kieß, S., Tonhausen, N., Singer, W., Goebel, R., & Sireteanu, R. (2006, 2006/02/01/). Cerebral correlates of impaired grating perception in individual, psychophysically assessed human amblyopes. *Vision Res*, 46(4), 506-526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.10.014>
- Mussap, A. J., & Levi, D. M. (2000). Amblyopic deficits in detecting a dotted line in noise. *Vision research*, 40(23), 3297-3307. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00154-1](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00154-1)
- Näsänen, R. (1999). Spatial frequency bandwidth used in the recognition of facial images. *Vision research*, 39(23), 3824-3833. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00096-6)
- Niechwiej-Szwedo, E., Goltz, H. C., Chandrakumar, M., Hirji, Z. A., & Wong, A. M. F. (2010). Effects of Anisometric Amblyopia on Visuomotor Behavior, I: Saccadic Eye Movements. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 51(12), 6348-6354. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5882>
- Obermeyer, S., Kolling, T., Schaich, A., & Knopf, M. (2012). Differences between old and young adults' ability to recognize human faces underlie processing of horizontal information. *Frontiers in aging neuroscience*, 4, 3.

- Pachai, M. V., Sekuler, A. B., & Bennett, P. J. (2013). Sensitivity to information conveyed by horizontal contours is correlated with face identification accuracy. *Frontiers in psychology*, 4, 74.
- Pachai, M. V., Corrow, S., Bennett, P. J., Barton, J., & Sekuler, A. B. (2015). Sensitivity to horizontal structure and face identification in developmental prosopagnosia and healthy aging. *Perception*, 44, 97-98.
- Pachai, M. V., Sekuler, A. B., Bennett, P. J., Schyns, P. G., & Ramon, M. (2017). Personal familiarity enhances sensitivity to horizontal structure during processing of face identity. *Journal of vision*, 17(6), 5-5. <https://doi.org/10.1167/17.6.5>
- Pachai, M. V., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2018). The bandwidth of diagnostic horizontal structure for face identification. *Perception*, 47(4), 397-413.
- Parpia, R., Hashemi, A., Bennett, P., & Sekuler, A. (2015). Effects of aging on the horizontal selectivity of behavioural and ERP measures of face identification. *Journal of vision*, 15(12), 681-681.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10(4), 437-442.
- Pelphrey, K., Lopez, J., & Morris, J. (2009). Developmental continuity and change in responses to social and nonsocial categories in human extrastriate visual cortex [Original Research]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.025.2009>
- Pierce, L. J., Scott, L. S., Boddington, S., Droucker, D., Curran, T., & Tanaka, J. W. (2011). The n250 brain potential to personally familiar and newly learned faces and objects. *Frontiers in human neuroscience*, 5, 111.
- Pitcher, D., Walsh, V., & Duchaine, B. (2011). The role of the occipital face area in the cortical face perception network. *Experimental brain research*, 209(4), 481-493.

- Pointer, J. S. (2007). The absence of lateral congruency between sighting dominance and the eye with better visual acuity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 27(1), 106-110.
- Popple, A. V., & Levi, D. M. (2008). The attentional blink in amblyopia. *Journal of vision*, 8(13), 12-12. <https://doi.org/10.1167/8.13.12>
- Porac, C., & Coren, S. (1976). The dominant eye. *Psychological bulletin*, 83(5), 880.
- Powell, C., & Hatt, S. R. (2009). Vision screening for amblyopia in childhood. *Cochrane Database of Systematic Reviews*(3).
- Putzar, L., Hötting, K., & Röder, B. (2010). Early visual deprivation affects the development of face recognition and of audio-visual speech perception. *Restorative neurology and neuroscience*, 28(2), 251-257.
- Ramon, M., Bobak, A. K., & White, D. (2019). Super-recognizers: From the lab to the world and back again. *British journal of psychology*, 110(3), 461-479.
- Rayner, J. C. W., & Best, D. J. (2013). Extended ANOVA and rank transform procedures. *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 55(3), 305-319.
- Righart, R., & de Gelder, B. (2007). Impaired face and body perception in developmental prosopagnosia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(43), 17234-17238.
- Robertson, D. J., Jenkins, R., & Burton, A. M. (2017). Face detection dissociates from face identification. *Visual Cognition*, 25(7-8), 740-748.
- Robbins, R. A., Nishimura, M., Mondloch, C. J., Lewis, T. L., & Maurer, D. (2010). Deficits in sensitivity to spacing after early visual deprivation in humans: A comparison of human faces, monkey faces, and houses. *Developmental psychobiology*, 52(8), 775-781.
- Röder, B., Ley, P., Shenoy, B. H., Kekunnaya, R., & Bottari, D. (2013). Sensitive periods for the functional specialization of the neural system for human face processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(42), 16760-16765.

- Rossion, B., Delvenne, J. F., Debatisse, D., Goffaux, V., Bruyer, R., Crommelinck, M., & Guérit, J. M. (1999). Spatio-temporal localization of the face inversion effect: an event-related potentials study. *Biological psychology*, *50*(3), 173-189.
- Rossion, B., Gauthier, I., Tarr, M. J., Despland, P., Bruyer, R., Linotte, S., & Crommelinck, M. (2000). The N170 occipito-temporal component is delayed and enhanced to inverted faces but not to inverted objects: an electrophysiological account of face-specific processes in the human brain. *Neuroreport*, *11*(1), 69-72.
- Rossion, B., & Jacques, C. (2008). Does physical interstimulus variance account for early electrophysiological face sensitive responses in the human brain? Ten lessons on the N170. *NeuroImage*, *39*(4), 1959-1979.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.10.011>
- Rossion, B., & Caharel, S. (2011). ERP evidence for the speed of face categorization in the human brain: Disentangling the contribution of low-level visual cues from face perception. *Vision research*, *51*(12), 1297-1311. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.003>
- Rousselet, G. A., Macé, M. J.-M., & Fabre-Thorpe, M. (2003). Is it an animal? Is it a human face? Fast processing in upright and inverted natural scenes. *Journal of vision*, *3*(6), 5-5.
- Rousselet, G. A., Pernet, C. R., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2008a). Parametric study of EEG sensitivity to phase noise during face processing. *BMC neuroscience*, *9*(1), 1-22.
- Rousselet, G. A., Husk, J. S., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2008b). Time course and robustness of ERP object and face differences. *Journal of vision*, *8*(12), 3-3.
<https://doi.org/10.1167/8.12.3>.
- Royer, J., Blais, C., Gosselin, F., Duncan, J., & Fiset, D. (2015). When less is more: Impact of face processing ability on recognition of visually degraded faces. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *41*(5), 1179.

- Royer, J., Blais, C., Barnabé-Lortie, V., Carré, M., Leclerc, J., & Fiset, D. (2016). Efficient visual information for unfamiliar face matching despite viewpoint variations: It's not in the eyes! *Vision Res*, *123*, 33-40. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.04.004)
- Royer, J., Willenbockel, V., Blais, C., Gosselin, F., Lafortune, S., Leclerc, J., & Fiset, D. (2017). The influence of natural contour and face size on the spatial frequency tuning for identifying upright and inverted faces. *Psychological research*, *81*, 13-23. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0740-3>
- Royer, J., Blais, C., Charbonneau, I., Déry, K., Tardif, J., Duchaine, B., Gosselin, F., & Fiset, D. (2018). Greater reliance on the eye region predicts better face recognition ability. *Cognition*, *181*, 12-20. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.08.004](https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.08.004)
- Russell, R., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2009). Super-recognizers: People with extraordinary face recognition ability. *Psychonomic bulletin & review*, *16*(2), 252-257.
- Sadeh, B., Podlipsky, I., Zhdanov, A., & Yovel, G. (2010). Event-related potential and functional MRI measures of face-selectivity are highly correlated: A simultaneous ERP-fMRI investigation. *Human Brain Mapping*, *31*(10), 1490-1501. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hbm.20952](https://doi.org/10.1002/hbm.20952)
- Sadeh, B., & Yovel, G. (2010). Why is the N170 enhanced for inverted faces? An ERP competition experiment. *Neuroimage*, *53*(2), 782-789.
- Sangrigoli, S., Pallier, C., Argenti, A. M., Ventureyra, V. A., & de Schonen, S. (2005). Reversibility of the other-race effect in face recognition during childhood. *Psychological Science*, *16*(6), 440-444.
- Scherf, K. S., Behrmann, M., Humphreys, K., & Luna, B. (2007). Visual category-selectivity for faces, places and objects emerges along different developmental trajectories.

Developmental science, 10(4), F15-F30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00595.x>

Schmidt, K. E., Singer, W., & Galuske, R. A. W. (2004). Processing Deficits in Primary Visual Cortex of Amblyopic Cats. *Journal of neurophysiology*, 91(4), 1661-1671.
<https://doi.org/10.1152/jn.00878.2003>

Schor, C., & Hallmark, W. (1978). Slow control of eye position in strabismic amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 17(6), 577-581.

Schweinberger, S. R., Pickering, E. C., Jentzsch, I., Burton, A. M., & Kaufmann, J. M. (2002). Event-related brain potential evidence for a response of inferior temporal cortex to familiar face repetitions. *Cognitive Brain Research*, 14(3), 398-409. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00142-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00142-8)

Sekuler, A. B., Gaspar, C. M., Gold, J. M., & Bennett, P. J. (2004). Inversion leads to quantitative, not qualitative, changes in face processing. *Current Biology*, 14(5), 391-396.

Shah, P., Gaule, A., Sowden, S., Bird, G., & Cook, R. (2015). The 20-item prosopagnosia index (PI20): a self-report instrument for identifying developmental prosopagnosia. *Royal Society open science*, 2(6), 140343.

Shaikh, A. G., Otero-Millan, J., Kumar, P., & Ghasia, F. F. (2016). Abnormal Fixational Eye Movements in Amblyopia. *PLoS one*, 11(3), e0149953.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149953>

Sharma, V., Levi, D. M., & Klein, S. A. (2000). Undercounting features and missing features: evidence for a high-level deficit in strabismic amblyopia. *Nature neuroscience*, 3(5), 496-501. <https://doi.org/10.1038/74872>

Shooner, C., Hallum, L. E., Kumbhani, R. D., García-Marín, V., Kelly, J. G., Majaj, N. J., Movshon, J. A., & Kiorpes, L. (2017). Asymmetric Dichoptic Masking in Visual Cortex of

Amblyopic Macaque Monkeys. *The Journal of Neuroscience*, 37(36), 8734-8741.

<https://doi.org/10.1523/jneurosci.1760-17.2017>

Silverstein, S. M., Thompson, J. L., Gold, J. M., Schiffman, J., Waltz, J. A., Williams, T. F., ... & Corlett, P. R. (2021). Increased face detection responses on the mooney faces test in people at clinical high risk for psychosis. *npj Schizophrenia*, 7(1), 26.

<https://doi.org/10.1038/s41537-021-00156-1>

Simmers, A. J., Ledgeway, T., & Hess, R. F. (2005). The influences of visibility and anomalous integration processes on the perception of global spatial form versus motion in human amblyopia. *Vision research*, 45(4), 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.08.026>

Simmers, A. J., Ledgeway, T., Hess, R. F., & McGraw, P. V. (2003). Deficits to global motion processing in human amblyopia. *Vision research*, 43(6), 729-738.

[https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00684-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00684-3)

Simmers, A. J., Ledgeway, T., Mansouri, B., Hutchinson, C. V., & Hess, R. F. (2006). The extent of the dorsal extra-striate deficit in amblyopia. *Vision research*, 46(16), 2571-2580.

<https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.01.009>

Sinha, P., Balas, B., Ostrovsky, Y., & Russell, R. (2006). Face recognition by humans: Nineteen results all computer vision researchers should know about. *Proceedings of the IEEE*, 94(11), 1948-1962.

Sinha, P., Balas, B., & Ostrovsky, Y. (2007). Discovering faces in infancy. *Journal of Vision*, 7(9):569. doi: <https://doi.org/10.1167/7.9.569>.

Shapiro, P. N., & Penrod, S. (1986). Meta-analysis of facial identification studies. *Psychological Bulletin*, 100(2), 139.

Smith, M. L., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2012). Measuring internal representations from behavioral and brain data. *Current Biology*, 22(3), 191-196.

- Sokol, S. (1983). Abnormal evoked potential latencies in amblyopia. *British Journal of Ophthalmology*, 67(5), 310-314.
- Subramanian, V., Jost, R. M., & Birch, E. E. (2013). A Quantitative Study of Fixation Stability in Amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 54(3), 1998-2003. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-11054>
- Sugden, N. A., & Marquis, A. R. (2017). Meta-analytic review of the development of face discrimination in infancy: Face race, face gender, infant age, and methodology moderate face discrimination. *Psychological Bulletin*, 143(11), 1201.
- Susilo, T., Germine, L., & Duchaine, B. (2013). Face recognition ability matures late: Evidence from individual differences in young adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(5), 1212–1217.
- Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1993). Parts and wholes in face recognition. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 46(2), 225-245.
- Tanaka, J. W., Curran, T., Porterfield, A. L., & Collins, D. (2006). Activation of preexisting and acquired face representations: the N250 event-related potential as an index of face familiarity. *Journal of cognitive neuroscience*, 18(9), 1488-1497. doi: 10.1162/jocn.2006.18.9.1488.
- Tanaka, J. W., Heptonstall, B., & Hagen, S. (2013). Perceptual expertise and the plasticity of other-race face recognition. *Visual Cognition*, 21(9-10), 1183-1201.
- Tardif, J., Fiset, D., Zhang, Y., Estéphan, A., Cai, Q., Luo, C., ... & Blais, C. (2017). Culture shapes spatial frequency tuning for face identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(2), 294. <https://doi.org/10.1037/xhp0000288>

- Tardif, J., Morin Duchesne, X., Cohan, S., Royer, J., Blais, C., Fiset, D., Duchaine, B., & Gosselin, F. (2019). Use of Face Information Varies Systematically From Developmental Prosopagnosics to Super-Recognizers. *Psychological science*, *30*(2), 300-308.
<https://doi.org/10.1177/0956797618811338>
- Tarr, M. J., & Gauthier, I. (2000). FFA: a flexible fusiform area for subordinate-level visual processing automatized by expertise. *Nature neuroscience*, *3*(8), 764-769.
<https://doi.org/10.1038/77666>
- Taylor, M. J., McCarthy, G., Saliba, E., & Degiovanni, E. (1999). ERP evidence of developmental changes in processing of faces. *Clinical Neurophysiology*, *110*(5), 910-915.
- Taylor, M., Batty, M., & Itier, R. (2004). The faces of development: a review of early face processing over childhood. *Journal of cognitive neuroscience*, *16*(8), 1426-1442.
- Thierry, G., Martin, C., Downing, P. (2007). Controlling for interstimulus perceptual variance abolishes N170 face selectivity. *Nature Neuroscience*, *10*, 505-511.
<https://doi.org/10.1038/nn1864>
- Thomas, C., Moya, L., Avidan, G., Humphreys, K., Jung, K. J., Peterson, M. A., & Behrmann, M. (2008). Reduction in white matter connectivity, revealed by diffusion tensor imaging, may account for age-related changes in face perception. *Journal of cognitive neuroscience*, *20*(2), 268-284.
- Toothaker, L. E., & Newman, D. (1994). Nonparametric competitors to the two-way ANOVA. *Journal of Educational Statistics*, *19*(3), 237-273.
- Tsao, D. Y., & Livingstone, M. S. (2008). Mechanisms of face perception. *Annu. Rev. Neurosci.*, *31*, 411-437.

- Valenza, E., Simion, F., Cassia, V. M., & Umiltà, C. (1996). Face preference at birth. *Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance*, 22(4), 892.
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.22.4.892>
- van Kooten, I. A., Palmen, S. J., von Cappeln, P., Steinbusch, H. W., Korr, H., Heinsen, H., Hof, P. R., van Engeland, H., & Schmitz, C. (2008). Neurons in the fusiform gyrus are fewer and smaller in autism. *Brain*, 131(4), 987-999.
- Van Sluyters, R. C., Atkinson, J., Banks, M. S., Held, R. M., Hoffmann, K.-P., & Shatz, C. J. (1990). The development of vision and visual perception. In *Visual Perception* (pp. 349-379). Elsevier.
- Volkers, A. C., Hagemans, K. H., Van Der Wildt, G. J., & Schmitz, P. I. (1987). Spatial contrast sensitivity and the diagnosis of amblyopia. *British journal of ophthalmology*, 71(1), 58-65.
- Wallace, D. K., Repka, M. X., Lee, K. A., Melia, M., Christiansen, S. P., Morse, C. L., & Sprunger, D. T. (2018). Amblyopia preferred practice pattern®. *Ophthalmology*, 125(1), P105-P142.
- Wang, J., & Ho, C. S. (2007). Deficient motion-defined and texture-defined figure-ground segregation in amblyopic children. *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 44(6).
- Watanabe, S., Kakigi, R., & Puce, A. (2003). The spatiotemporal dynamics of the face inversion effect: a magneto-and electro-encephalographic study. *Neuroscience*, 116(3), 879-895.
- Watson, A. B., & Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & psychophysics*, 33(2), 113-120.
- Webber, A. L., & Wood, J. (2005). Amblyopia: prevalence, natural history, functional effects and treatment. *Clinical and experimental optometry*, 88(6), 365-375.

- Weigelt, S., Koldewyn, K., & Kanwisher, N. (2012). Face identity recognition in autism spectrum disorders: A review of behavioral studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(3), 1060-1084.
- West, S., & Williams, C. (2011). Amblyopia. *BMJ clinical evidence*, *2011*.
- Wiese, H., & Schweinberger, S. R. (2018). Inequality between biases in face memory: Event-related potentials reveal dissociable neural correlates of own-race and own-gender biases. *Cortex*, *101*, 119-135.
- Wild, H. A., Barrett, S. E., Spence, M. J., O'Toole, A. J., Cheng, Y. D., & Brooke, J. (2000). Recognition and sex categorization of adults' and children's faces: Examining performance in the absence of sex-stereotyped cues. *Journal of experimental child psychology*, *77*(4), 269-291.
- Willenbockel, V., Sadr, J., Fiset, D., Horne, G. O., Gosselin, F., & Tanaka, J. W. (2010). Controlling low-level image properties: the SHINE toolbox. *Behavior research methods*, *42*(3), 671-684.
- Wilmer, J. B., Germine, L., Chabris, C. F., Chatterjee, G., Williams, M., Loken, E., Nakayama, K., & Duchaine, B. (2010). Human face recognition ability is specific and highly heritable. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(11), 5238-5241.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0913053107>
- Wolf, J. M., Tanaka, J. W., Klaiman, C., Cockburn, J., Herlihy, L., Brown, C., South, M., McPartland, J., Kaiser, M. D., & Phillips, R. (2008). Specific impairment of face-processing abilities in children with autism spectrum disorder using the Let's Face It! skills battery. *Autism Research*, *1*(6), 329-340.

- Xi, J., Jia, W.-L., Feng, L.-X., Lu, Z.-L., & Huang, C.-B. (2014). Perceptual Learning Improves Stereoacuity in Amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 55(4), 2384-2391.
<https://doi.org/10.1167/iovs.13-12627>
- Xu, X., & Biederman, I. (2014). Neural correlates of face detection. *Cerebral Cortex*, 24(6), 1555-1564.
- Yang, G., & Huang, T. S. (1994). Human face detection in a complex background. *Pattern recognition*, 27(1), 53-63.
- Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces. *Journal of experimental psychology*, 81(1), 141.
- Ying, G.-s., Maguire, M. G., Cyert, L. A., Ciner, E., Quinn, G. E., Kulp, M. T., Orel-Bixler, D., Moore, B., & Group, V. i. P. S. (2014). Prevalence of vision disorders by racial and ethnic group among children participating in head start. *Ophthalmology*, 121(3), 630-636.
- Young, A. W., Hay, D. C., & McWeeny, K. H. (1985). Right cerebral hemisphere superiority for constructing facial representations. *Neuropsychologia*, 23(2), 195-202.
- Young, A. W., Hellowell, D., & Hay, D. C. (2013). Configurational Information in Face Perception. *Perception*, 42(11), 1166-1178. <https://doi.org/10.1068/p160747n>
- Yovel, G., & Kanwisher, N. (2004). Face perception: domain specific, not process specific. *Neuron*, 44(5), 889-898.
- Zimmerman, D. W., & Zumbo, B. D. (1993). Relative power of the Wilcoxon test, the Friedman test, and repeated-measures ANOVA on ranks. *The Journal of Experimental Educational*, 75-86.
- Zheng, X., Mondloch, C. J., & Segalowitz, S. J. (2012). The timing of individual face recognition in the brain. *Neuropsychologia*, 50(7), 1451-1461.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.02.030>

Zhu, Q., Song, Y., Hu, S., Li, X., Tian, M., Zhen, Z., Dong, Q., Kanwisher, N., & Liu, J. (2010).
Heritability of the specific cognitive ability of face perception. *Current Biology*, 20(2), 137-
142.

ANNEXES

Annexe A : Freiburg Vision Test

Tous les participants ont complété le Freiburg Vision Test (Bach, 1996; 2006), un test informatisé permettant de mesurer le seuil d'acuité visuelle des participants en utilisant la théorie de détection de signal (Green & Swets, 1966). Pour être éligibles à l'étude, les participants devaient avoir une acuité visuelle égale ou supérieure à 0.1 LogMAR, équivalent à 20/25 sur la charte de Snellen dans l'œil non-amblyope (ou dans les deux yeux chez les participants contrôles), signifiant qu'ils doivent minimalement être aptes à percevoir à 20 pieds ce que quelqu'un avec une vision parfaite pourrait percevoir à 25 pieds. Comme une amblyopie trop importante (manque d'acuité visuelle dans l'œil amblyope) est un critère d'exclusion, celle-ci est aussi vérifiée à l'aide du Freiburg Vision Test. Les participants amblyopes devaient donc avoir une acuité visuelle supérieure à 20/100 dans leur œil amblyope pour pouvoir participer à l'étude.