

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

L'ORIENTATION DE L'INFORMATION VISUELLE ET SON RÔLE DANS LE
TRAITEMENT DES VISAGES HUMAINS

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN PSYCHOLOGIE

PAR
JUSTIN DUNCAN

AOÛT 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Bien qu'un seul nom apparaisse sur la page titre de ce travail, le projet représente la culmination d'un sinueux parcours universitaire de plus de dix années sur les banquettes. Et personne ne survit à une décennie de solitude. C'est pourquoi je tiens à remercier les nombreuses personnes sans qui l'accomplissement du plus gros projet de cette jeune vie et l'accomplissement d'un rêve auraient été beaucoup plus difficiles.

Naturellement, je suis d'une grande reconnaissance envers mon superviseur Daniel Fiset (et ma superviseure spirituelle, Caroline Blais). Merci à vous qui avez su canaliser mon potentiel et ma personnalité afin de faire de moi un chercheur digne de ce nom et merci pour les compétences que vous m'avez transmises et l'autonomie que vous avez promue. Je garde avant tout d'heureux souvenirs de nos multiples interactions, de nos discussions sur la science (ou sur tout et rien), et de nos nombreux fous rires en congrès. Cela est évident que vos étudiants sont pour vous une ressource précieuse et je vous en suis reconnaissant. Votre générosité, votre chaleur, votre accueil, votre enthousiasme, votre énergie et votre rigueur sont pour moi des sources d'inspiration sans fin et votre amitié est chérie.

Je tiens également à témoigner de ma reconnaissance envers les nombreux collègues (que je ne nommerai pas, par peur d'en oublier) du Laboratoire de Perception Visuelle et Sociale de l'UQO (LPVS-UQO), que j'ai vu naître et grandir. Vous avez été des partenaires de travail fabuleux et parmi les plus allumés que j'aie eu le bonheur de côtoyer. Nous avons ensemble partagé les euphories et les déprimés de ce

long processus au cours duquel votre présence, votre humour, votre écoute, votre soutien moral et votre aide ont été autant de bouées sur lesquelles m'appuyer.

Je tiens aussi à remercier mes collaborateurs ponctuels, Benoit Brisson et Frédéric Gosselin d'avoir su agrémenter la formation dont j'ai bénéficié au LPVS-UQO. Les connaissances que vous m'avez transmises sont autant d'outils sur lesquels je peux compter pour continuer mon exploration des mécanismes perceptifs de manière inusitée.

Merci à mes parents, ma sœur et la famille plus étendue. Merci pour le soutien moral, financier et alimentaire. Merci, maman, pour les appels impromptus où tu nous offres d'apporter le soir même une lasagne, du poisson ou du jambon, parce que tu en as trop fait; c'est toujours très apprécié. Merci, papa, pour toutes les fois où tu as fait un détour à Ottawa après une longue journée de travail.

Merci aussi à mes amis, qui m'ont enduré alors que je leur racontais des trucs insipides qui l'étaient d'autant plus lorsque, dans mon plus jeune temps, la vulgarisation n'était pas une force. À cet effet, je suis particulièrement reconnaissant envers mes deux meilleurs amis, Nico (et Sarah et bébé Eva qui accepte de partager la chambre avec son parrain) et Alex, qui m'auront au cours des dernières années hébergé plusieurs semaines, voire plusieurs mois, sans ne jamais rien attendre en retour. La bière, la nourriture partagée, les jeux et les fous rires ont été de précieux îlots de répit pendant les moments les plus difficiles. Simplement, vous êtes la raison pour laquelle j'aimais venir à Montréal.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ma complice de tous les instants et partenaire extraordinaire, Alex (Dre Alibaba). Tu auras été à mes côtés depuis les (presque) tout débuts et donc, témoin de tous les moments, meilleurs et pires. Merci

d'avoir été là, merci de m'avoir écouté, merci de m'avoir encouragé, merci de m'avoir enduré, merci d'avoir parfois fait un peu plus pour que je puisse terminer ce long travail, merci de m'avoir admiré, merci d'avoir célébré mes succès (et pleuré mes revers), merci de ta générosité sans borne, merci de tes nombreuses attentions (petites et grandes), merci de m'aimer comme je t'aime; merci d'être la femme de ma vie, parce que tout est plus facile avec toi.

DÉDICACE

À mon idole et mon héros
Qui m'a toujours encouragé à chercher
J'aimerais croire qu'il y a un nuage
Sur lequel perché, tu regardes ici-bas

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE.....	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
AVANT-PROPOS	x
LISTE DES FIGURES.....	xii
RÉSUMÉ.....	xiv
ABSTRACT	xvii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Préambule.....	1
1.2 Les propriétés de bas niveau	2
1.3 Les orientations spatiales et la perception des visages.....	5
1.3.1 L'orientation spatiale et les expressions faciales	8
1.3.2 L'orientation spatiale et les traits faciaux	10
1.3.3 L'orientation spatiale, l'identification et les différences individuelles	11
1.3.4 L'orientation spatiale, l'asymétrie cérébrale et la perception faciale .	13
1.4 Objectifs	17
1.4.1 L'orientation spatiale et les expressions faciales	17
1.4.2 L'orientation spatiale et les traits faciaux	18
1.4.3 L'orientation spatiale, l'identification et les différences individuelles	18
1.4.4 L'orientation spatiale, l'asymétrie cérébrale et la perception faciale .	19

CHAPITRE II	
ARTICLE 1	20
RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 1	21
ABSTRACT	27
ORIENTATIONS FOR THE SUCCESSFUL CATEGORIZATION OF FACIAL EXPRESSIONS AND THEIR LINK WITH FACIAL FEATURES	28
2.1 Introduction	28
2.2 Experiment 1	33
2.2.1 Methods	33
2.2.1.1 Participants	33
2.2.1.2 Apparatus	34
2.2.1.3 Procedure	34
2.2.1.4 Orientation bubbles	35
2.2.2 Results and Discussion	38
2.3 Experiment 2—Orientation bubbles	40
2.3.1 Methods	40
2.3.1.1 Participants	40
2.3.1.2 Apparatus	41
2.3.1.3 Stimuli	41
2.3.1.4 Procedure	42
2.3.2 Results and Discussion	45
2.4 Experiment 3—Location bubbles	53
2.4.1 Methods	53
2.4.1.1 Participants, Apparatus, and Stimuli	53
2.4.1.2 Procedure	53
2.4.2 Results and Discussion	54
2.5 General Discussion	59

CHAPITRE III	
ARTICLE 2	64
RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 2	65
ABSTRACT	69
REVISITING THE LINK BETWEEN HORIZONTAL TUNING AND FACE PROCESSING ABILITY WITH INDEPENDENT MEASURES	70
3.1 Introduction	70
3.2 Methods	72
3.2.1 Participants	72
3.2.2 Apparatus	73
3.2.3 Face processing ability	73
3.2.4 Orientation Bubbles Task	73
3.3 Results and Discussion	76
3.4 Conclusion	82
SUPPLEMENTAL MATERIALS	83
3.S.1 Sensitivity to horizontal gratings	83
3.S.2 Object processing and horizontal tuning for cars	84
3.S.3 Analyses and Results	84
CHAPITRE IV	
ARTICLE 3	86
RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 3	87
ABSTRACT	92
HORIZONTAL TUNING OF THE RIGHT HEMISPHERE FOR FACE PERCEPTION	93
4.1 Introduction	93
4.2 Methods	97
4.2.1 Experiment 1	97

4.2.1.1	Participants.....	97
4.2.1.2	Apparatus	98
4.2.1.3	Stimuli.....	98
4.2.1.4	Procedure.....	99
4.2.2	Experiment 2	102
4.2.2.1	Participants, Apparatus, and Stimuli.....	102
4.2.2.2	Procedure.....	102
4.3	Analyses and Results.....	105
4.3.1	Experiment 1	105
4.3.2	Experiment 2	107
4.4	Discussion	111
CHAPITRE V		
CONCLUSION.....		116
5.1	Introduction.....	116
5.2	Retour sur les études présentées.....	116
5.2.1	Le traitement des expressions faciales	116
5.2.2	La reconnaissance faciale et les différences individuelles.....	121
5.2.3	L'asymétrie hémisphérique	125
5.3	Limites des études présentées	126
5.3.1	Limites générales	127
5.3.2	Limites spécifiques.....	130
5.4	Suggestions pour la recherche à venir.....	133
5.4.1	Suggestions générales	133
5.4.2	Suggestions particulières.....	137
5.5	Conclusion.....	140
RÉFÉRENCES.....		141

AVANT-PROPOS

Le texte du Chapitre II Article 1 est une reproduction de l'article « Orientations for the successful categorization of facial expressions and their link with facial features » publié en 2017 dans *Journal of Vision*, 17(14): 7, doi : 10.1167/17.14.7, dont je suis le premier auteur.

Le texte du Chapitre III Article 2 est une reproduction de l'article « Revisiting the link between horizontal tuning and face processing ability with independent measures », en prépublication à *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, doi : 10.1037/xhp0000684, dont je suis le premier auteur.

Le texte du Chapitre IV Article 3 est une version modifiée de l'article « Horizontal tuning of the right hemisphere for face processing », soumis le 20 décembre 2018 et en révision à *Perception*, dont je suis le premier auteur.

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1. Illustration of orientation bubbles filtering. A plaid (A) is converted to its Fourier spectrum with the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm, and its quadrants are shifted (B). An orientation sampling vector (C) is created by summing ten pairs of Von Mises orientation samples (orientation bubbles). Then, the orientation sampling matrix (D) is created by applying the orientation sampling vector to an orientation matrix. Orientation filtering is carried by dot multiplying (.) the orientation sampling matrix and the shifted plaid Fourier spectrum. The experimental stimulus is then reconstructed by Inverse-FFT (IFFT), and Gaussian white noise is added (E).	36
2.2. Experiment 1 group classification vector. Orientation bubbles accurately revealed the diagnostic information of the plaid, with significant peaks emerging at -0.628° (vertical axis) and -88.148° (horizontal axis), $Z_{crit} = 2.49, p < 0.05$.	39
2.3. Examples of orientation bubbles filtered stimuli (left column), along with the corresponding orientation sampling matrices (right column), as applied in Experiment 2. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.	44
2.4. Experiment 2 group classification vectors. Each graph plots the z-scored coefficients that resulted from regressing orientation sampling vectors on performance scores (correct/incorrect), for human observers (black line) and the model observer (red line), along with the statistical threshold (dotted gray line), $Z_{crit} = 2.49, p < 0.05$. For the expression of fear (top-rightmost graph), the z-scored coefficients that resulted from regressing orientation sampling vectors on hits and false alarms are also plotted (green line). In the top left corner of each graph, a face depicting the appropriate expression is revealed through the diagnostic (bottom) and antidiagnostic (top) orientation band for this expression. In the top right corner of each graph, the Pearson correlation between observer and model orientation profiles can be seen. Images [BF01AFS - BF01ANS -	

BF01DIS - BF01HAS - BF01NES - BF01SAS - BF01SUS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.	49
2.5. The association between Experiment 2 image contrast sensitivity and horizontal tuning, $r = .64$, $p < .001$	52
2.6. Examples of location bubbles filtered stimuli (left column), along with the corresponding bubbles mask (right column), as applied in Experiment 3. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.....	54
2.7. Experiment 3 group classification images. Areas depicted in color significantly correlated with task performance, $Z_{crit} = 3.4$, $p < 0.05$. Images [BF01AFS - BF01ANS - BF01DIS - BF01HAS - BF01NES - BF01SAS - BF01SUS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.....	56
2.8. The association between image contrast sensitivity (Experiment 2) and the number of bubbles (Experiment 3), $r = -0.71$, $p < 0.001$	58
2.9. Color coded regions of interest (ROI) used in the multiple linear regression analysis—comparing orientation and local diagnostic profiles—are overlaid on a grayscale picture of a face. Red = eyes; orange = eyebrows; yellow = eyebrow junction; green = nose; blue = nasolabial folds; purple = mouth. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.....	59
3.1. Orientation bubbles procedure. See text for description. The face shown is that of author D.F.	75
3.2. Classification vector from the orientation bubbles task. Illustrates the correlation (z-score) between orientations and accuracy for face identification. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold.	78
3.3. Scatterplot of the correlation between horizontal tuning and signal to noise ratio (SNR), $r = -0.59$, $p < 0.001$	79
3.4. Scatterplot of the correlation between horizontal tuning and the face processing ability score, $r = 0.41$, $p < 0.05$	81
3.S.1. Group classification vector from the orientation bubbles car matching task. Illustrates the correlation (z-score) between orientations and	

accuracy for car recognition. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold.	85
4.1. Orientation bubbles filtering procedure. For this example, the orientation sampling vector (and matrix) contains 33 symmetrical pairs of orientation bubbles. The face is that of author D.F.	101
4.2. Trial sequence for Experiment 2. The black dotted line surrounding the left/right half of the experimental stimulus is only there for an indicative purpose and outlines the part that contains identity information; the other half is an average face mask. In this example, a "Different" trial is displayed. The top face half is that of author C.B. Permission was obtained by the concerned party to use the bottom face displayed in this illustration.	104
4.3. (Left) Classification vector from Experiment 1 illustrating the correlation (z-score) between orientations and accuracy for face identification. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold, $Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$. (Right) Images filtered with diagnostic (top) and anti-diagnostic (bottom) orientations. The face is that of author D.F.	107
4.4. (Left) Classification vectors from Experiment 2 illustrating the correlation (z-score) between orientations and accuracy in the left visual field/right hemisphere (LVF/RH; black), in the right visual field/left hemisphere (RVF/LH; dark gray), and the difference between the LVF/RH and RVF/LH orientation profiles (light gray). Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold, $Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$. (Right) Images filtered with diagnostic (top) and anti-diagnostic (bottom) orientations for the LVF/RH. The face is that of author D.F.	110
5.1. Exemple de stimuli présentés dans l'expérience d'identification et de différences individuelles (Chapitre III). L'image de gauche présente un stimulus qui aurait pu être présenté au participant avec la meilleure performance dans cette tâche (contraste RMS du visage = 0,0004; contraste RMS du bruit = 0,001). L'image de droite présente un stimulus qui aurait pu être présenté au participant avec la moins bonne performance dans cette tâche (contraste RMS du visage = 0,0005; contraste RMS du bruit = 0,0006). La différence entre ces deux stimuli est marquante et pourtant, dans les deux cas, le lecteur pourrait trouver difficile d'identifier ce visage comme celui de D.F. (pour une comparaison, voir la Figure 2.1a).	128

RÉSUMÉ

Le visage humain est une source précieuse d'information sociale et le succès de l'espèce dépend en partie de la capacité de traiter efficacement cette information. Durant la dernière décennie, les travaux de différents chercheurs ont montré que plusieurs facettes du traitement perceptif des visages reposent sur les orientations spatiales horizontales du visage. Dans cette optique, plusieurs questions sont soulevées concernant le traitement de cette information : quel est son rôle dans la reconnaissance des expressions faciales? Quel est son lien avec le traitement des régions faciales? Quel est son lien avec la reconnaissance faciale/des expressions faciales? L'asymétrie cérébrale observée dans la perception des visages concorde-t-elle avec une différence hémisphérique dans le traitement de l'information faciale horizontale? Voilà autant de questions auxquelles je tente de répondre dans cette thèse à l'aide de la méthode paramétrique des bulles d'orientation, développée afin de permettre une étude indépendante et sans contraintes du rôle de toutes les orientations spatiales dans les tâches visuelles. Au Chapitre II, je présente les données d'expériences démontrant i) que la reconnaissance des expressions faciales repose largement sur le traitement de l'information horizontale, ii) que les meilleurs dans cette tâche utilisent plus sélectivement l'information horizontale et iii) que le traitement de l'information horizontale dans cette tâche est mieux prédit par le traitement de la région des yeux. Au Chapitre III, je présente les données d'une expérience i) reproduisant le fait que la reconnaissance faciale repose sur le traitement de l'information horizontale et ii) démontrant de façon convaincante que les meilleurs dans les tâches d'identification faciale utilisent davantage l'information faciale horizontale (ce, indépendamment de l'aptitude plus générale en reconnaissance d'objet, de l'utilisation de l'information horizontale dans une tâche de reconnaissance de voitures et de la sensibilité à l'information horizontale de bas niveau). Enfin, je présente au Chapitre IV les données d'expériences démontrant que la supériorité du champ visuel gauche (c.-à-d. le fait que les visages présentés au champ visuel gauche soient traités avec une plus grande efficacité que ceux présentés au champ visuel droit) concorde avec une meilleure utilisation de l'information horizontale (comparativement au champ visuel droit) et donc, qu'elle pourrait être attribuable à l'implémentation d'une stratégie visuelle plus optimale par l'hémisphère cérébral droit (comparativement à l'hémisphère gauche), ce dernier étant réputé spécialisé dans le traitement facial. Ensemble, ces expériences servent à renforcer l'hypothèse selon laquelle la capacité du système visuel à traiter de manière sélective l'information faciale diagnostique comprise dans les orientations horizontales joue un rôle crucial dans de nombreux aspects du traitement facial. Spécifiquement, les

données présentées ici nous indiquent un mécanisme psychophysique clair par lequel pourrait émerger l'expertise visuelle impliquée dans la perception faciale et, par la bande, une cause visuelle plausible des déficits observés chez certains individus.

Mots clés : Orientation spatiale, perception faciale, psychophysique

ABSTRACT

Title: The orientation of visual information and its role in human face processing

The human face is rich with socially relevant information and the specie's thriving partially depends on an ability to efficiently process this information. In the last decade, work carried by various researchers has uncovered the reliance of various aspects of human face perception on horizontal spatial orientations. In this optic, many questions are raised concerning processing of this information: what role does it play in facial expression recognition? How does it relate to individual facial regions? How does it relate to face identification or expression recognition at an individual level? Does cerebral asymmetry in face perception correspond to cerebral asymmetry in horizontal facial information? These are the questions I aim to answer with the present thesis, relying on the parametric method of orientation bubbles that I have developed in order to study how spatial orientations relate to face perception in an independent and unconstrained manner. Chapter 1 presents experimental data demonstrating i) that facial expression recognition is largely dependent on horizontal facial information, ii) that those with better expression recognition ability are more selectively tuned to horizontal facial information, and iii) that horizontal facial information processing is best predicted by processing of the eye region. Then, in Chapter 2, I present experimental data i) that replicates reliance of facial recognition on horizontal facial information, and ii) that makes a clear demonstration that those with better face recognition ability are more selectively tuned to horizontal facial information (independently from general object recognition ability, horizontal tuning for cars, and also from low-level sensitivity to horizontal gratings). Finally, Chapter 3 presents experimental data showing that left visual field superiority (i.e., the finding that faces presented to the left visual field are recognized faster, and more accurately than when presented to the right visual field) is accompanied by better horizontal facial information processing in the left (vs. right) visual field, suggesting that this effect might be attributed to the deployment of a more optimal visual strategy by the right (vs. left) cerebral hemisphere, which exhibits increased specialization for faces. Together, these experiments provide additional support to the hypothesis according to which the visual system ability to selective process horizontal facial information plays a fundamental role in numerous aspects of face processing.

Keywords: Spatial orientations, face perception, psychophysics

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Préambule

Le visage humain possède une importance socioévolutive considérable pour la vaste quantité d'information qu'il contient. Ainsi, un simple regard suffit à extraire des indices permettant de déduire par exemple l'identité d'une personne, son genre, son état émotionnel, son âge, son ethnie, et même porter un jugement sur sa personne (tempérament, apparence de dignité de confiance, etc.). Grâce à cette richesse informationnelle, le visage humain peut être considéré comme un outil crucial pour la communication non verbale (p.ex., Haxby, Hauffman et Gobbini, 2000; Jack et Schyns, 2015). Il est donc attendu que l'aptitude à traiter et comprendre cette information joue un rôle fondamental en facilitant l'adoption de comportements sociaux adaptés aux différentes exigences des contextes rencontrés. Bien que l'on s'intéresse depuis déjà plus de cent ans aux mécanismes impliqués dans le traitement visuel des visages (p.ex., Galton, 1883, Dunlap, 1927), ce n'est que récemment qu'est apparu chez les chercheurs du domaine un intérêt pour les propriétés visuelles dites de bas niveau sous-tendant cette habileté, nommément les fréquences et orientations spatiales.

1.2 Les propriétés de bas niveau

Avant que le cerveau ne parvienne à catégoriser un objet capté par l'œil, le cortex visuel primaire traite d'abord les variations cycliques de luminance (c.-à-d. l'intensité lumineuse) qui le composent (voir, pour une revue de la littérature scientifique, De Valois et De Valois, 1990). Ce traitement visuel est qualifié de bas niveau, car il s'attarde aux propriétés physiques (concrètes) de l'image telle qu'elle est projetée sur la rétine, plutôt qu'à son contenu sémantique (abstrait; p.ex., Sowden et Schyns, 2006). Il est accompli par un ensemble de canaux psychophysiques dont la sensibilité et la sélectivité sont optimisées pour différentes combinaisons de fréquences et d'orientations spatiales, qui correspondent respectivement à la concentration (exprimée en cycles) et à la direction (exprimée en degrés) des variations de luminance dans l'espace visuel. Si les fréquences spatiales déterminent la finesse ou la grossièreté des contours de l'objet, ce sont les orientations qui lui donnent sa forme. Ensemble, les différentes combinaisons de fréquences et orientations spatiales permettent donc une description physique complète de tous les objets que nous percevons avec les yeux (De Valois et De Valois, 1990). Ce n'est qu'une fois le traitement de bas niveau complété par les cellules simples et complexes du cortex visuel primaire (De Valois, Albrecht et Thorell, 1982) que les aires visuelles de plus haut niveau peuvent s'attarder à la catégorisation sémantique et à la reconnaissance des formes. Une compréhension approfondie des mécanismes impliqués dans la reconnaissance visuelle des visages (ou de tout autre objet visuel) passe donc nécessairement par la compréhension du traitement des propriétés de bas niveau que sont les fréquences et orientations spatiales.

Le rôle des fréquences spatiales dans le traitement perceptif des visages est étudié depuis déjà plusieurs décennies. De nombreuses expériences ont par exemple permis de démontrer que le traitement optimal des visages repose en grande partie sur une

bande de fréquences situées approximativement entre 8 et 20 cycles par visage (Costen, Parker et Craw, 1996; Gaspar, Bennet et Sekuler, 2008; Gold, Bennett et Sekuler, 1999; Näsänen, 1999; Ojanpää et Näsänen, 2003; Royer *et al.*, 2017; Tardif *et al.*, 2017; Willenbockel *et al.*, 2010a; voir aussi, pour une revue de la littérature scientifique, Fiset et Gosselin, 2009). Par ailleurs, des données suggèrent que le meilleur prédicteur de l'utilisation des fréquences spatiales dans une tâche de traitement facial soit la courbe humaine de sensibilité aux contrastes, qui affiche une sensibilité maximale à une valeur équivalente à environ 12 cycles par visage (pour des visages d'une taille approximative de 4 à 6 degrés d'angle visuel, Owsley et Sloane, 1987; et, similairement pour la reconnaissance de lettres isolées, Chung, Legge et Tjan, 2002). Ceci signifie qu'une fréquence spatiale équivalente à environ 12 cycles sera plus facile à détecter dans une condition de faible contraste, comparativement à toute fréquence plus élevée ou plus faible.

À cet effet, les résultats d'analyses effectuées sur des centaines de visages sont particulièrement éloquentes. Dans les images naturelles, la répartition de l'information dans le spectre fréquentiel est hautement asymétrique. Pour les visages par exemple, l'amplitude spectrale est approximativement répartie selon la réciproque du carré de la fréquence spatiale ($y = 1/f^2$). Il en résulte donc une importante surreprésentation des basses fréquences spatiales, associées à l'information plus grossière ou globale de l'image. Selon l'hypothèse du blanchiment, le système visuel corrigerait cette distribution spectrale par une augmentation du gain des cellules ganglionnaires P, et celle-ci serait inversement proportionnelle à la taille du champ récepteur (ex., Graham, Chandler et Field, 2006). Cet aplanissement (blanchiment) spectral servirait ainsi à faciliter la transmission et le traitement de l'information. En appliquant un blanchiment spectral à un vaste ensemble de stimuli, des chercheurs ont pu vérifier la réponse de différents filtres fréquentiels (« *Gabors* ») dans une simulation informatique de tâche d'identification faciale. Leurs données suggèrent que

l'information la plus utile à la reconnaissance faciale se situe entre 8 et 16 cycles par visage, corroborant ainsi les données comportementales (Keil, 2009; voir aussi Keil, Lapedriza, Masip et Vitria, 2008).

On note donc le chevauchement entre la courbe de sensibilité aux contrastes, dont le pic se situe à environ 12 cycles par visage (Owsley et Sloane, 1987), et la répartition de l'information faciale utile à l'identification, entre 8 et 16 cycles (Keil *et al.*, 2008). Conséquemment, certains proposent que la courbe humaine de sensibilité aux contrastes puisse, du moins en partie, être le résultat d'un ajustement du système visuel afin d'optimiser son traitement de l'information utile à l'identification faciale (Keil, 2009; Keil *et al.*, 2008; voir aussi, pour un argument similaire, Sowden et Schyns, 2006).

En outre, il semble que les traits faciaux internes (yeux, sourcils, nez et bouche) soient majoritairement responsables de la richesse informationnelle retrouvée dans la bande fréquentielle de 8-16 cycles susmentionnée (Keil, 2009). Il n'est donc pas surprenant de constater que le masquage de cette information fréquentielle nuise à l'identification en empêchant l'utilisation de l'information véhiculée par les traits faciaux (Butler, Blais, Gosselin, Bub et Fiset, 2010; Gosselin et Schyns, 2001; Royer *et al.*, 2018; Schyns, Bonnar et Gosselin, 2002). De manière similaire, la catégorisation du genre (Gosselin et Schyns, 2001; Schyns, Bonnar et Gosselin, 2002) ou de l'expression faciale (Smith, Cottrell, Gosselin et Schyns, 2005; Smith et Merlusca, 2014; Wang, Friel, Gosselin et Schyns, 2011) et même les jugements sociaux, comme la dignité de confiance et la dominance d'un individu (Robinson, Blais, Duncan, Forget et Fiset, 2014) nécessitent que soit disponible cette information. Il existe donc un lien fondamental entre le contenu fréquentiel et le traitement visuel des visages.

1.3 Les orientations spatiales et la perception des visages

Comparativement aux fréquences spatiales, l'étude de l'orientation spatiale et de son lien avec le traitement perceptif des visages est beaucoup plus récente, n'ayant émergé qu'au cours de la dernière décennie (Dakin et Watt, 2009). Les données existantes leur confèrent cependant un rôle tout aussi, voire encore plus fondamental que celui joué par les fréquences spatiales. En effet, tout comme pour les fréquences spatiales, il semble que certaines orientations aient une plus grande importance que d'autres en ce qui concerne la perception des visages. En l'occurrence, l'information visuelle à l'intérieur d'une bande de 14 à 20 degrés centrée sur l'axe horizontal serait essentielle pour la détection (Balas, Schmidt et Saville, 2015) et l'identification faciale (Dakin et Watt, 2009; Goffaux et Dakin, 2010; Goffaux et Greenwood, 2016; Pachai, Sekuler et Bennett, 2013a; Pachai, Sekuler et Bennett, 2013b; Pachai, Bennett et Sekuler, 2018). En outre, des données montrent que l'aptitude pour la reconnaissance faciale corrèle fortement avec la sélectivité pour l'information horizontale (Pachai *et al.*, 2013a); et il semble que plus un visage est familier, plus l'information horizontale de ce visage est traitée de manière sélective (Pachai, Sekuler, Bennett, Schyns et Ramon, 2017).

En plus de ces études, deux ensembles de données contribuent à renforcer la notion selon laquelle l'information faciale horizontale a une importance particulière pour le traitement perceptif des visages. Le premier concerne l'effet d'inversion du visage, conséquence bien connue d'une inversion planaire sur le traitement perceptif des visages. Cet effet réfère à ce que l'inversion nuit démesurément au traitement perceptif des visages, comparativement à d'autres types d'objets (Robbins et McKone, 2007; Yin, 1969; voir aussi, pour une revue de la littérature scientifique, Rossion et Gauthier, 2002; Valentine, 1988). Or, une des premières études à s'être intéressé au rôle des orientations spatiales dans la perception des visages montre que

l'effet d'inversion est maximal si l'information verticale est masquée (information horizontale présente); et qu'il disparaît presque complètement lorsque l'information horizontale est masquée (Goffaux et Dakin, 2010). L'effet d'inversion du visage s'expliquerait donc surtout par une forte baisse de l'efficacité avec laquelle est traitée l'information horizontale lorsque le visage est présenté à l'envers; alors que l'inversion affecterait le traitement des autres orientations de façon plus modeste (Pachai *et al.*, 2013a; Goffaux et Greenwood, 2016). En comparaison, l'inversion ne semble pas avoir d'effet notable sur le traitement des fréquences spatiales (Gaspar *et al.*, 2008; Royer *et al.*, 2017; Willenbockel *et al.*, 2010a).

Le second ensemble de données renforçant l'importance accordée à l'information horizontale concerne des données en neuroimagerie. L'aire faciale fusiforme (Kanwisher, McDermott et Chun, 1997; Sergent, Ohta et MacDonald, 1992), par exemple, est une région fonctionnelle de plus haut niveau d'abstraction¹ faisant partie du gyrus fusiforme médian. Comme son nom l'indique, l'aire faciale fusiforme est caractérisée par une activité neuronale distincte en réponse aux visages, comparativement aux autres objets visuels (cependant, voir pour une hypothèse alternative, Gauthier, Skudlarski, Gore et Anderson, 2000). De manière très intéressante, cette région fonctionnelle montre aussi une sensibilité accrue pour l'information faciale horizontale (Goffaux, Duecker, Hausfeld, Schiltz et Goebel, 2016), comparativement aux orientations cardinales verticale et oblique. Il en serait

¹ À plusieurs reprises, il sera proposé que le traitement des visages et autres catégories complexes est déterminé par le traitement des propriétés analysées à des niveaux plus bas de traitement (aires visuelles primaires). Parallèlement, il sera aussi proposé que certains résultats en ce qui a trait à l'orientation spatiale reflètent l'opérations de régions de plus haut niveau comme l'aire faciale fusiforme. Bien que cela puisse initialement sembler contradictoire, le présent ouvrage admet certains modèles, notamment celui du traitement réentrant, c.-à-d. l'interaction entre les mécanismes de bas et de haut niveau à travers le traitement ascendant et descendant. Ainsi, l'information disponible peut, via le traitement ascendant, influencer la probabilité qu'entrent en opération certains mécanismes de plus haut niveau; à terme, la mise en opération de certains mécanismes de haut niveau peut, via le traitement descendant, influencer la sensibilité des mécanismes de bas niveau à certains types d'information. Les mécanismes de bas et haut niveau sont donc non seulement interdépendants, mais ils s'influencent mutuellement.

également de même pour le corrélat électrophysiologique de l'aire faciale fusiforme, la N170 (Sadeh, Podlipsky, Zhdanov et Yovel, 2010). La N170 est un potentiel évoqué visuel observé aux électrodes pariéto-occipitales entre 150 et 220 ms suivant la perception d'un stimulus visuel et, comme l'aire faciale fusiforme, la N170 est particulièrement sensible aux visages (p.ex., Bentin, Allison, Puce, Perez et McCarthy, 1996; voir aussi, pour une revue de la littérature scientifique, Eimer, 2011; Rossion, 2014). Et comme il existe un effet d'inversion du visage, il existe aussi un effet N170 d'inversion faciale. En effet, lorsqu'un visage est présenté à l'envers, le pic de la N170 surgit avec un délai de quelques millisecondes et une plus grande amplitude (Rossion *et al.*, 2000). Or, cet effet N170 d'inversion faciale dépendrait, encore une fois, de l'information faciale horizontale. En effet, celui-ci serait maximal lorsque l'information verticale est masquée (horizontale présente) et minimal lorsque l'information horizontale est masquée (Jacques, Schiltz et Goffaux, 2014). Ainsi, ce sont non seulement les mesures comportementales du traitement facial qui démontrent l'importance de l'information horizontale, mais également les mesures en neuroimagerie.

Ensemble, ces différentes observations suggèrent que la perception des visages repose largement sur l'utilisation de l'information horizontale du visage. Les sections qui suivent introduisent différents contextes dans lesquels les orientations spatiales risquent d'influencer le traitement perceptif des visages, soit : i) la question de la reconnaissance des expressions faciales, ii) la question du lien avec les traits faciaux, iii) la question de l'identification faciale et des différences individuelles en ce qui concerne l'aptitude à reconnaître les visages et enfin, iv) la question de l'asymétrie cérébrale observée dans le traitement des visages.

1.3.1 L'orientation spatiale et les expressions faciales

Si les études sur le rôle des orientations spatiales dans l'identification faciale de visages familiers et non familiers deviennent de plus en plus abondantes, il n'y a à ce jour que très peu de données sur leur implication dans la reconnaissance des expressions faciales. Les données existantes suggèrent cependant que l'information horizontale joue, encore une fois, un rôle central dans ce type de traitement perceptif. En effet, il a été démontré que la discrimination entre la joie et la peur est largement facilitée par la disponibilité de l'information horizontale dans le visage (Balas et Huynh, 2015; Huynh et Balas, 2014).

La généralisation de ces résultats à la reconnaissance des expressions faciales est cependant limitée de deux manières importantes. D'abord, seulement deux types d'expressions faciales ont été comparées, bien qu'on reconnaisse généralement six émotions de base, soit : la colère, le dégoût, la joie, la peur, la surprise et la tristesse (Ekman et Friesen, 1975; Izard, 1971; voir cependant, pour un contre-argument, Jack, Sun, Delis, Garrod et Schyns, 2016). Cette différence est importante, car les traits faciaux utilisés dans une tâche de reconnaissance des expressions faciales diffèrent entre les émotions (Eisenbarth et Alpers, 2011; Jack, Garrod et Schyns, 2014; Smith, Cottrell, Gosselin et Schyns, 2005; Smith et Schyns, 2009; Smith et Merlusca, 2014; Wang, Friel, Gosselin et Schyns, 2011).

Il est établi que l'information permettant d'accomplir une tâche varie en fonction des demandes de celle-ci (p.ex., Schyns et Oliva, 1999). En effet, l'information utile peut être différente selon qu'on tente d'identifier une personne ou de détecter la présence d'une expression faciale, et ce, même si le stimulus présenté est le même. Dans le premier cas par exemple, on utilisera surtout la région des yeux, alors qu'on utilisera davantage la région de la bouche dans le second (p.ex., Gosselin et Schyns, 2001;

Schyns, Bonnar et Gosselin, 2002). Puis, comme mentionné, l'information utilisée diffère selon l'émotion qui doit être reconnue. Le portrait se complexifie d'un cran lorsqu'on considère que l'information utile pour reconnaître une émotion est également susceptible aux expressions présentes (donc aux réponses possibles) dans la tâche (Smith et Merlusca, 2014). Cela signifie que l'information permettant de reconnaître la peur lorsque l'alternative est la joie ne sera pas la même que lorsque l'alternative est la colère. De la même manière, l'information permettant de reconnaître la peur ne sera pas non plus exactement la même s'il y a une (ex., joie), deux (ex., colère et joie) ou six émotions possibles (ex., colère, dégoût, joie, neutralité, surprise et tristesse). Tout cela signifie que l'importance de l'information horizontale pour la discrimination entre la joie et la tristesse (Balas et Huynh, 2015; Huynh et Balas, 2014) pourrait, justement, être limitée à ces deux émotions, à cette combinaison d'émotions, ou à la tâche de discrimination administrée.

La seconde limite importante des résultats de Huynh et Balas (2014; 2015), qui s'applique d'ailleurs à une proportion importante des études dans le domaine (une exception est cependant l'étude de Pachai *et al.*, 2013a), porte sur le fait de comparer exclusivement l'impact de filtres horizontaux et verticaux sur la performance. Comparativement aux visages d'expression neutre généralement présentés dans les tâches d'identification faciale, les traits internes des visages expressifs comportent une plus grande variabilité dans leurs formes et configurations. La bouche, par exemple, est typiquement ouverte et arrondie pour exprimer la surprise, alors qu'elle est fermée et comparativement aplanie sur un visage neutre. Similairement, la prééminence des plis naso-labiaux est particulièrement accentuée pour exprimer le dégoût, comparativement à d'autres émotions comme la surprise. Cette variabilité dans la forme ou la saillance de certains traits faciaux pourrait donc causer un changement dans la distribution de l'information à travers les orientations. Les résultats de Huynh et Balas (2014) viennent conforter cette idée, eux qui ont

démontré que l'ouverture de la bouche pouvait diminuer l'importance relative de l'information horizontale et augmenter celle de l'information verticale. Or, il serait difficile, voire impossible, de tenir compte de toutes les configurations possibles des traits faciaux à travers les expressions faciales en se concentrant uniquement sur l'information horizontale et verticale. On n'a par exemple qu'à penser, encore une fois, aux plis naso-labiaux, dont l'orientation prédominante est oblique. Il est donc pertinent d'aborder ces deux limites importantes (c.-à-d., le nombre limité d'expressions et d'orientations étudiées) si on désire mieux comprendre comment les mécanismes perceptifs de bas niveau interagissent avec ceux de plus haut niveau, impliqués dans la reconnaissance des expressions faciales.

1.3.2 L'orientation spatiale et les traits faciaux

Le champ d'investigation étant nouveau, peu de liens ont été établis entre le spectre de l'orientation et l'information locale (traits faciaux) ou fréquentielle. À cet effet, une étude précédemment mentionnée (Keil, 2009) portant sur la réponse de filtres fréquentiels dans une simulation informatique est hautement informative : non seulement les traits faciaux internes sont-ils riches en information fréquentielle dans la bande comprise entre environ 8 et 16 cycles par visage, mais cette information est de surcroît essentiellement comprise à l'intérieur d'une bande d'environ 20 degrés centrée sur l'axe spatial horizontal. Ces résultats sont donc particulièrement intéressants dans la mesure où il a été démontré que l'information horizontale utilisée se situe largement dans la bande fréquentielle susmentionnée (Goffaux, Van Zon et Schiltz, 2011). On peut donc logiquement postuler un lien entre les traits faciaux internes et l'information horizontale, au même titre que celui révélé entre les traits faciaux et les fréquences spatiales. Par ailleurs, des données présentées en conférence à la Vision Sciences Society corroborent effectivement cette hypothèse, suggérant

que l'information horizontale contenue dans la région des yeux ait une importance particulière pour la reconnaissance faciale (Pachai *et al.*, 2013b).

La question du lien entre les traits faciaux internes et les orientations spatiales est d'autant plus intéressante lorsqu'on considère deux facteurs. Le premier est la variabilité en ce qui a trait à l'utilisation des différentes régions faciales pour chacune des expressions faciales de base (colère, dégoût, joie, peur, surprise et tristesse). En effet, si la reconnaissance de certaines expressions comme la colère est plutôt associée au traitement de la région des yeux et des sourcils, la reconnaissance d'autres expressions comme la joie est davantage associée au traitement de la région de la bouche (p.ex., Smith *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2011).

Le second facteur découle d'une différence critique entre le processus d'identification, lequel repose principalement sur l'utilisation de la région des yeux (p.ex., Buttler *et al.*, 2010; Royer *et al.*, 2018); et le processus de catégorisation des expressions faciales, lequel repose principalement sur la région de la bouche (Blais *et al.*, 2012; Blais *et al.*, 2017; Calvo, Fernández-Martín et Nummenmaa, 2014; Peterson et Eckstein, 2012). Il apparaît donc de la plus haute pertinence de mieux comprendre comment l'utilisation des orientations spatiales de bas niveau se traduit en une utilisation de l'information faciale locale de plus haut niveau durant la reconnaissance d'expressions faciales.

1.3.3 L'orientation spatiale, l'identification et les différences individuelles

Comme précédemment mentionné, l'identification faciale demeure le processus le plus étudié en ce qui concerne le traitement des orientations spatiales. À cet effet, les chercheurs ont pu démontrer que les visages sont mieux reconnus lorsque l'information horizontale peut être traitée (Dakin et Watt, 2009; Pachai *et al.*, 2018)

et que l'effet classique d'inversion du visage (Yin, 1969) s'explique par une baisse d'efficacité du traitement de l'information faciale horizontale (Goffaux et Dakin, 2010; Goffaux et Greenwood, 2016; Pachai *et al.*, 2013a). De plus, les données suggèrent que le traitement de l'information faciale horizontale s'accroît en fonction de la familiarité du visage traité (Pachai *et al.*, 2017) et que les marqueurs électrophysiologiques sensibles à l'identité faciale comme la N170 et la N250 démontrent une sélectivité pour l'information horizontale (Hashemi, Pachai, Bennett et Sekuler, 2018; Jacques *et al.*, 2014). Il semble donc de plus en plus évident que l'information faciale horizontale joue un rôle prépondérant dans le processus d'identification.

Or, les études répertoriées ont largement favorisé une approche de comparaison de groupes, au détriment d'une exploration des différences individuelles. À ce compte, une seule étude ayant employé une approche de différences individuelles a été répertoriée dans la littérature scientifique (Pachai *et al.*, 2013a). Dans celle-ci, les chercheurs ont mesuré l'efficacité du processus d'identification faciale dans neuf différentes bandes d'orientation, incluant l'horizontale et la verticale, en ajoutant du bruit orienté. Dans une dixième condition, contrôle, du bruit blanc gaussien (avec la même énergie dans toutes les orientations) était ajouté. Le seuil de tolérance au bruit était ensuite pris comme indice d'efficacité du traitement visuel dans chacune des orientations. Ce faisant, ils ont pu obtenir, pour chacun de leurs sujets, une mesure de l'utilisation sélective de l'information horizontale en calculant la différence entre les seuils de bruit dans les axes horizontal et vertical; ainsi qu'une mesure absolue de performance en calculant le seuil de bruit mesuré dans la condition contrôle. Une corrélation a été observée entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et la performance, celle-ci expliquant environ 27% de la variance observée.

La tâche et les stimuli utilisés pour mesurer le niveau d'aptitude et la sélectivité pour l'information horizontale étaient cependant essentiellement les mêmes. Le lecteur diligent ne peut donc s'empêcher de remarquer une certaine circularité dans ces résultats. En effet, il est attendu que les participants qui sont meilleurs pour reconnaître un ensemble de visages partiellement masqués par du bruit blanc avec la même énergie dans toutes les orientations sont aussi ceux qui utilisent le plus systématiquement l'information diagnostique horizontale (c.-à-d., l'information utile à la tâche) de ces visages. Il serait donc pertinent de vérifier la robustesse de ce lien en obtenant des mesures d'utilisation sélective de l'information horizontale et d'aptitude en reconnaissance faciale de façon indépendante.

1.3.4 L'orientation spatiale, l'asymétrie cérébrale et la perception faciale

L'idée répandue et persistante selon laquelle certaines personnalités sont plutôt de type cerveau gauche (p.ex., analytiques, logiques) et d'autres sont plutôt de type cerveau droit (p.ex., créatives, spontanées) est largement infondée (p.ex., Nielsen, Zielinski, Ferguson, Lainhart et Anderson, 2013). Reste que, si rien n'est absolu, le cerveau humain est fonctionnellement asymétrique et divers processus cognitifs, comme les mécanismes attentionnels (voir, pour une revue de la littérature scientifique, Parton, Malhotra et Husain, 2004) et le traitement perceptif des visages, sont davantage associés à l'activité de l'un ou l'autre hémisphère cérébral.

L'asymétrie du traitement perceptif des visages est d'ailleurs bien documentée (voir, pour une revue de la littérature scientifique, Rhodes, 1985; Sergent et Bindra, 1981).

Les premières données en ce sens sont issues d'études cliniques. Spécifiquement, on a remarqué l'apparition d'un déficit sélectif en reconnaissance faciale, la prosopagnosie (Bodamer, 1947; Ellis et Florence, 1990), suite à des lésions bilatérales (Barton, 2008a; Damasio, Tranel et Damasio, 1990) ou de l'hémisphère

droit (p.ex., Barton, 2008a; De Renzi et Pellegrino, 1998; Landis, Cummings, Christen, Bogen et Imhof, 1986). Lorsqu'une atteinte entraînant une prosopagnosie est unilatérale, celle-ci semble systématiquement toucher l'hémisphère cérébral droit chez les droitiers (voir, pour une revue de la littérature scientifique, Mayer et Rossion, 2006). De manière intéressante, il semble que ces symptômes puissent être causés par une lésion unilatérale de l'hémisphère gauche, chez les gauchers (Barton, 2008b; Mattson, Levin et Graftman, 2000).

Les données en neuroimagerie corroborent également l'implication asymétrique de différentes régions bilatérales dans le traitement des visages. L'aire faciale fusiforme, par exemple, est généralement plus importante dans le gyrus fusiforme médian de l'hémisphère droit comparativement à celui de l'hémisphère gauche (Kanwisher *et al.*, 1997; Rossion, Hanseeuw et Dricot, 2012; Sergent *et al.*, 1992). De manière similaire, la sensibilité aux visages du potentiel évoqué visuel N170 est plus apparente aux électrodes de l'hémisphère droit qu'à ceux de l'hémisphère gauche (p.ex., Bentin *et al.*, 1996; Yovel, Levy, Grabowecy et Paller, 2003; voir aussi, pour une revue de la littérature scientifique, Eimer, 2011; Rossion, 2014), ce qui n'est pas surprenant vu le lien étroit entre le FFA et la N170 (Sadeh *et al.*, 2010).

Un corollaire direct de cet avantage de l'hémisphère droit est le phénomène de supériorité du champ visuel gauche (voir, pour une revue de la littérature scientifique, Rhodes, 1985; Sergent et Bindra, 1981). Le champ visuel peut être divisé en deux par une ligne verticale qui traverse la fovéa (Shillcock, Ellison et Monaghan, 2000), c.-à-d. la région rétinienne dotée de la meilleure acuité visuelle et avec laquelle nous fixons les objets. À cause de la décussation neurale, toute information présentée à un hémichamp est directement acheminée vers le cortex visuel primaire de l'hémisphère controlatéral (Shillcock *et al.*, 2000). La supériorité du champ visuel gauche réfère à ce que les visages présentés à l'hémichamp visuel gauche (et donc à l'hémisphère

droit) sont reconnus avec une plus grande précision et rapidité que ceux présentés à l'hémichamp visuel droit.

Cet effet de supériorité du champ visuel gauche a été reproduit par une équipe de chercheurs ayant combiné des observations comportementales à des mesures électrophysiologiques (Yovel *et al.*, 2003). De manière intéressante, c'est au niveau de la N170 que semble émerger l'effet de supériorité du champ visuel gauche. En effet, les potentiels évoqués visuels précoces mesurés entre 100 et 150 ms post-stimulus indiquent un traitement préférentiel de l'information contralatérale; à ce stade, l'hémisphère gauche traite donc en priorité l'information du champ visuel droit, et inversement. En revanche, la N170 des deux hémisphères indique un traitement préférentiel de l'information présentée au champ visuel gauche (Yovel *et al.*, 2003; voir cependant Rousselet *et al.*, 2014). Les potentiels évoqués tardifs (p.ex., entre 220 et 280 ms; et entre 400 et 600 ms) associés à la reconnaissance consciente (Eimer, Gosling et Duchaine, 2012) montrent aussi un traitement préférentiel de l'information du champ visuel gauche (Yovel *et al.*, 2003). De manière intéressante, l'asymétrie hémisphérique de la N170 est un fort prédicteur de l'ampleur du traitement préférentiel du champ visuel gauche aux stades tardifs. Autrement dit, plus l'amplitude de la N170 de l'hémisphère droit (et moins celle de l'hémisphère gauche) est élevée, plus le traitement tardif favorisera l'information présentée au champ visuel gauche (Yovel *et al.*, 2003). Cela suggère donc l'émergence de la supériorité du champ visuel gauche à un stade perceptif marqué par la N170 et ayant possiblement sa source dans un transfert d'information de l'hémisphère droit vers l'hémisphère gauche. On pourrait donc véritablement parler d'une dominance perceptive de l'hémisphère droit dans le traitement facial.

C'est précisément ce qu'a démontré une expérience utilisant la présentation de visage chimères, c.-à-d. des visages dont la moitié gauche et droite proviennent d'identités

différentes (Levy, Heller, Banich et Burton, 1983a; Schwartz et Smith, 1980; voir aussi la Figure 3.2 du présent ouvrage). Dans cette étude, les participants percevaient presque systématiquement l'identité présentée à leur champ visuel gauche, même si celle présentée au champ visuel droit était tout aussi visible (Yovel, Tambini, et Brandman, 2008). Cette dominance de l'hémisphère droit est d'autant plus marquante lorsqu'on considère que les participants n'avaient même pas conscience de la présentation de visages chimères; ils avaient en effet l'impression de n'avoir perçu qu'une seule identité. Cela corrobore les observations effectuées sur les potentiels évoqués tardifs démontrant un traitement préférentiel du contenu du champ visuel gauche (Yovel *et al.*, 2003) et signifiant que l'information présentée au champ visuel droit a moins de chances d'atteindre la conscience (Eimer *et al.*, 2012). Les chercheurs ont aussi mesuré, pour chacun de leurs participants, le volume de l'aire faciale fusiforme des deux hémisphères. De manière intéressante, l'asymétrie de ce volume est un fort prédicteur du degré de dominance perceptive de l'hémichamp gauche. En effet, il semble que plus l'aire faciale fusiforme de l'hémisphère droit (et moins celle de l'hémisphère gauche) est volumineuse, plus la probabilité que soit perçue l'identité présentée à l'hémichamp gauche est élevée (Yovel *et al.*, 2008).

Le traitement asymétrique des visages pourrait être lié au fait qu'on observe également des différences hémisphériques en ce qui a trait au traitement des fréquences spatiales. En effet, l'hémisphère droit semble traiter plus efficacement les fréquences spatiales plutôt basses associées aux détails grossiers (comme l'aspect global du visage), alors que l'hémisphère gauche semble traiter plus efficacement les fréquences spatiales plutôt élevées associées aux détails fins (comme les traits faciaux); et ceci, tant pour les visages (Keenan, Whitman et Pepe 1989; Sergent, 1985) que pour d'autres objets (Sergent, 1982; voir aussi, pour une revue de la littérature scientifique, Kauffmann, Ramanoël et Peyrin, 2014). Une étude récente montre d'ailleurs que les lésions latéralisées entraînent une diminution sélective de la

sensibilité aux contrastes dans les basses fréquences ou dans les hautes fréquences, selon que l'hémisphère droit ou gauche soit touché, respectivement (dos Santos, Andrade et Fernandez Calvo, 2013). Ceci implique que l'asymétrie observée dans le traitement des visages et autres objets visuels puisse trouver sa source en amont, au niveau des canaux impliqués dans le traitement des propriétés de bas niveau des objets visuels. En effet, des résultats en neuroimagerie montrent également un traitement préférentiel des visages complets dans l'hémisphère droit et un traitement préférentiel des traits faciaux isolés dans l'hémisphère gauche (Rossion *et al.*, 2000). Et puisque l'information n'est pas répartie de manière égale à travers toutes les fréquences spatiales (p.ex., Keil *et al.*, 2008), ce sont les propriétés des hémisphères cérébraux qui détermineraient, du moins en partie, la latéralisation du traitement visuel des visages. Considérant d'une part l'asymétrie observée au niveau du traitement des visages et des fréquences spatiales et, d'autre part, le rôle prépondérant du traitement de l'information horizontale dans la perception faciale, il serait particulièrement intéressant de vérifier si la différence hémisphérique s'étend également au traitement des orientations spatiales.

1.4 Objectifs

1.4.1 L'orientation spatiale et les expressions faciales

Le premier objectif de la présente thèse vise à pallier les problèmes susmentionnés quant au petit nombre d'expressions étudiées et à l'étude incomplète des orientations spatiales. Ainsi, un nouvel examen du rôle de toutes les orientations spatiales dans la catégorisation de toutes les émotions de base et la neutralité est proposé. Le premier article de la présente thèse (Chapitre II), intitulé « Orientations for the successful categorization of facial expressions and their link with facial features », vise justement l'atteinte de cet objectif. À cet effet, les bulles d'orientation (méthode

validée dans la première expérience de cette étude; voir, pour une illustration, les Figures 1.1, 2.1 et 3.1) sont utilisées dans la deuxième expérience afin de mesurer la contribution de toutes les orientations spatiales au processus de reconnaissance des expressions faciales de base et de la neutralité.

1.4.2 L'orientation spatiale et les traits faciaux

Le deuxième objectif de la présente thèse vise à fournir une première exploration empirique du lien entre le traitement des orientations spatiales et l'utilisation des traits faciaux dans une tâche de catégorisation des expressions faciales. Le premier article de la présente thèse (Chapitre II) permet également de répondre à ce second objectif. En effet, la troisième expérience de cette étude présente les données d'une tâche de catégorisation des expressions faciales de base et de la neutralité dans laquelle ce sont plutôt les bulles de localisation (Gosselin et Schyns, 2001) qui sont employées afin de mesurer de manière indépendante l'utilisation des différents traits faciaux. Puis, parce que les mêmes participants complètent en parallèle les deuxième (orientation) et troisième (localisation) expériences de cette étude, un modèle de régression peut être testé afin de révéler le lien entre l'utilisation des traits faciaux et le traitement des orientations spatiales.

1.4.3 L'orientation spatiale, l'identification et les différences individuelles

À cause des limites inhérentes aux procédures mentionnées plus haut, notamment en ce qui concerne l'interdépendance entre les mesures de sélectivité pour les horizontales et d'aptitude en reconnaissance faciale, le troisième objectif de cette thèse vise à fournir une nouvelle exploration du lien entre ces deux indices à l'aide de mesures indépendantes. Le second article de la présente thèse (Chapitre III), intitulé

« Revisiting the link between horizontal tuning and face processing ability with independent measures », vise justement à répondre à cet objectif. Dans cette étude, en plus d'une tâche expérimentale d'identification de visages filtrés avec les bulles d'orientations, trois tâches supplémentaires de traitement facial sont administrées. À partir de ces dernières, un score unique d'aptitude en traitement facial est généré. Les bulles d'orientations permettant de mesurer l'utilisation sélective des horizontales, le lien entre la sélectivité pour l'information horizontale et le score d'aptitude pour le traitement facial est ensuite vérifié à l'aide d'une analyse corrélacionnelle basée sur les différences individuelles.

1.4.4 L'orientation spatiale, l'asymétrie cérébrale et la perception faciale

Le quatrième et dernier objectif de la présente thèse est l'exploration de l'asymétrie cérébrale en reconnaissance faciale selon la perspective du traitement des orientations spatiales. Le troisième article (Chapitre IV), intitulé « Horizontal tuning of the right hemisphere for face processing », vise l'atteinte de cet objectif. Dans celui-ci, deux tâches expérimentales impliquant le traitement de l'identité faciale et les bulles d'orientation sont administrées. La première est une simple tâche de reconnaissance faciale et sert de référence à laquelle comparer l'utilisation des orientations spatiales par les deux hémisphères cérébraux. La seconde expérimentation sert justement à mesurer, à l'aide d'un protocole de présentation latéralisée et de l'application des bulles d'orientations, le lien entre les orientations spatiales et la performance de façon indépendante pour chaque hémisphère cérébral (voir la Figure 3.2), ce afin de i) les comparer l'un à l'autre, ainsi que ii) les comparer à la référence établie par la première tâche.

CHAPITRE II

ARTICLE 1

Orientations for the successful categorization of facial expressions and their link with facial features

Justin Duncan^{1,2}, Frédéric Gosselin³, Charlene Cobarro², Gabrielle Dugas², Caroline Blais² et Daniel Fiset²

¹Université du Québec à Montréal

²Université du Québec en Outaouais

³Université de Montréal

Article publié dans *Journal of Vision*, Volume 17 (Issue 14): 7; doi : 10.1167/17.14.7

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 1

Les chercheurs s'intéressent déjà depuis près d'un centenaire aux mécanismes perceptifs impliqués dans la reconnaissance des expressions faciales (p.ex., Dunlap, 1927). Bien que la recherche axée sur le traitement visuel des propriétés de bas niveau soit comparativement récente, une certaine compréhension de son rôle semble émerger. Ainsi, nous savons que l'identification faciale repose sur certaines fréquences spatiales critiques (p.ex., Gaspar *et al.*, 2008; Gold *et al.*, 1999; Näsänen, 1999; Willenbockel *et al.*, 2010a). Récemment, les chercheurs se sont intéressés aux orientations spatiales et ont démontré l'importance particulière de l'information près de l'axe horizontal pour la détection (Balas *et al.*, 2015) et l'identification faciale (Dakin et Watt, 2009; Goffaux et Dakin, 2010; Pachai *et al.*, 2013a). De façon intéressante, l'utilisation de l'information horizontale corrèle positivement avec le degré de familiarité d'un visage (Pachai *et al.*, 2017) et avec les aptitudes en reconnaissance faciale (Pachai *et al.*, 2013a). En ce qui a trait à la reconnaissance des expressions faciales, les données sont peu nombreuses, mais elles indiquent tout de même que l'information horizontale pourrait, ici aussi, jouer un rôle crucial (Huynh et Balas, 2014; Balas et Huynh, 2015). Ces données comportent cependant deux limites importantes. D'une part, elles concernent uniquement la discrimination entre la joie et la tristesse, bien qu'on reconnaisse généralement six émotions de base, soit : la colère, le dégoût, la joie, la peur, la surprise et la tristesse (Ekman et Friesen, 1975; Izard, 1971). D'autre part, seul l'apport de l'information horizontale et verticale a été vérifié. On sait pourtant que la reconnaissance des émotions de base repose sur différentes informations faciales (p.ex., Smith *et al.*, 2005), notamment sur les yeux et la bouche (Blais *et al.*, 2012). Considérant cette importante variation dans les stratégies visuelles liées à la reconnaissance des différentes émotions, on pourrait s'attendre à ce que d'autres orientations soient impliquées. À cet effet, le lien entre l'utilisation de l'information horizontale et les traits faciaux n'a encore jamais été exploré. Cet article comporte deux objectifs. Il vise d'abord à évaluer le rôle de l'ensemble du spectre des orientations spatiales dans la reconnaissance des six émotions faciales de base et la neutralité. Il vise de plus à établir un lien entre l'utilisation de l'information horizontale et l'utilisation des différents traits faciaux.

Trois études empiriques ont été réalisées. La première étude visait à valider la méthode psychophysique des bulles d'orientation, une procédure d'échantillonnage aléatoire du spectre de l'orientation. La seconde étude visait à répondre au premier objectif du présent article en mesurant, à l'aide des bulles d'orientation, l'utilisation des orientations spatiales pour les six émotions de base et la neutralité. La troisième

étude visait à répondre au second objectif du présent article en mesurant, à l'aide de la méthode des bulles de localisation (voir expérience 1, dans Gosselin et Schyns, 2001), l'utilisation des différents traits faciaux pour les six émotions de base et la neutralité afin d'établir le lien avec l'utilisation des orientations spatiales.

La première étude avait pour but de valider la méthode des bulles d'orientation, qui permet un échantillonnage aléatoire et systématique des orientations d'une image afin d'en présenter un sous-ensemble. Afin de vérifier la validité de cette méthode, une tâche de détection d'un tissu écossais (superposition de deux grilles sinusoïdales d'orientation horizontale et verticale) filtré avec des bulles d'orientation a été administrée. Il était attendu que la probabilité de détecter ce signal serait plus grande lorsque l'information horizontale ou verticale était révélée par les bulles.

Dix participants recrutés à l'Université du Québec en Outaouais ont accompli une tâche informatique comportant trois blocs de 100 essais chacun dans laquelle un tissu écossais (« *plaid* ») était filtré avec un masque composé de 10 bulles d'orientation. Afin que les participants ne répondent pas toujours « signal présent », 50% des essais ne comportaient aucun signal. Le masque était déterminé de manière aléatoire au début de chaque essai. 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). Le masque de bulles d'orientation est ensuite appliqué au spectre Fourier du tissu écossais, obtenu en appliquant une transformée rapide de Fourier, avant d'être reconverti en image (filtrée) avec une transformée inverse. 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 a été déterminée avec l'algorithme QUEST (Watson et Pelli, 1983).

Afin de révéler les orientations corrélant avec la détection du tissu écossais, une technique d'analyse d'images de classification (Eckstein et Ahumada, 2002; Gosselin et Schyns, 2004), analogue à une régression linéaire multiple, a été employée. Ici, les orientations sont traitées comme variable indépendante et la détection est traitée comme variable dépendante. L'analyse a été effectuée sur les essais lors desquels le signal était présent. Spécifiquement, une somme pondérée des masques d'orientation a été calculée en attribuant un poids positif aux masques présentés lors d'essais réussis et un poids négatif aux masques présentés lors d'essais échoués. Ces poids étaient les scores de précision standardisés (afin d'octroyer un poids total égal aux essais réussis et échoués dans la somme pondérée). Il en résulte dix vecteurs de classification, quantifiant la corrélation entre les orientations et la précision. Chaque vecteur de classification a ensuite été standardisé avec les paramètres de l'hypothèse nulle. Celle-ci a été estimée en simulant 100 vecteurs de classification générés avec autant de permutations aléatoires des scores de précision. Les vecteurs de classification standardisés individuels ont ensuite été additionnés et la somme, divisée

par $\sqrt{n}$, où n est égal au nombre de sujets. Le seuil statistique ($Z_{crit} = 2.49$, $p < 0,05$; bicaudé) a été déterminé avec la Stat4CI toolbox (Chauvin *et al.*, 2005), laquelle applique une correction pour observations multiples tenant compte de la corrélation entre les orientations contigües résultant des bulles.

Les analyses ont révélé deux corrélations significatives entre l'orientation et la précision : un pic à -180 degrés (axe vertical; $Z_{max} = 13,26$) et un pic à -90 degrés (axe horizontal; $Z_{max} = 11,15$). Afin de vérifier que ces pics étaient bien centrés sur l'orientation pure du tissu écossais, une mesure analogue à la technique d'aire fractionnelle (*fractional area technique*) utilisée en électroencéphalographie a été employée. Celle-ci a révélé un pic vertical à $-0,62$ degré (avec une largeur de bande de $20,4$ degrés) et un pic horizontal à $-88,64$ degrés (largeur de bande de $18,3$ degrés). Ni le pic vertical ($I_C 95\% = [-3,66, 1,83]$), $t(9) = 0,75$, ni le pic horizontal ($I_C 95\% = [-4,04, 3,9]$), $t(9) = 0,04$, n'avaient une valeur significativement différente de leur axe de référence, $p > 0,05$. Ainsi, la méthode des bulles d'orientation est valide, car elle permet de révéler l'information utile à la tâche; dans le cas présent, il s'agit de l'information horizontale et verticale.

La seconde étude avait pour but de mesurer l'utilisation des orientations pour chacune des six émotions de base (colère, dégoût, joie, peur, surprise et tristesse) et la neutralité. La troisième étude avait pour but d'établir un lien entre l'utilisation des orientations et l'utilisation des traits faciaux dans la reconnaissance des émotions de base et la neutralité. À cet effet, les blocs de ces deux études ont été administrés de manière intercalée, avec les mêmes participants, en alternant entre un bloc de la seconde étude et un bloc de la troisième étude. Cinquante pour cent des participants entamaient le protocole avec un bloc de la deuxième étude et les cinquante autres entamaient le protocole avec un bloc de la troisième étude. Dans les deux cas, les participants accomplissaient une tâche de reconnaissance des expressions faciales. Dans la deuxième étude, les visages étaient aléatoirement filtrés avec les bulles d'orientation; alors que dans la troisième étude, les visages étaient aléatoirement filtrés avec des fenêtres gaussiennes (c.-à-d., des bulles; voir expérience 1, dans Gosselin et Schyns, 2001). Afin de répondre au premier objectif de l'article, les données de la deuxième étude ont été analysées.

Quarante participants, recrutés à l'Université du Québec en Outaouais, ont accepté de participer aux tâches informatisées des deuxième et troisième études. Les stimuli étaient soixante-dix images de dix individus exprimant chacun les six émotions de base et la neutralité. Avant le début des tâches, vingt minutes étaient accordées aux participants afin qu'ils puissent se familiariser avec les images. Ils amorçaient ensuite une tâche de pratique dans laquelle ils devaient réussir à correctement catégoriser 95% des stimuli (non filtrés) qui leur étaient présentés à l'intérieur d'un bloc (140 essais). Un essai débutait avec la présentation d'une croix centrale de fixation (500

ms) et était suivi par la présentation d'un visage, qui demeurait visible jusqu'à l'émission de la bonne réponse. Les participants entraient leur réponse à l'aide du clavier d'ordinateur. Une clé différente était assignée à chaque expression. Lorsque la réponse était incorrecte, une rétroaction était affichée à l'écran et les participants avaient la chance de corriger leur réponse (celle-ci était tout de même comptabilisée comme une erreur). Une fois la bonne réponse entrée, l'essai suivant démarrait. Autant de blocs que nécessaire ($M = 3,46$, $S = 2,01$) étaient complétés afin d'atteindre le critère de performance. Les participants pouvaient ensuite amorcer le premier bloc de la deuxième ou troisième étude, selon la condition qui leur était assignée. Chaque étude comportait 12 blocs de 140 essais chacun (1680 essais au total), dont 240 essais par expression faciale. Un essai expérimental débutait avec la présentation d'une croix centrale de fixation (500 ms) et était suivi d'un visage filtré (150 ms) avec les bulles d'orientation. Les participants pouvaient entrer leur réponse et aucune rétroaction n'était offerte. Afin de moduler la performance et la maintenir entre un niveau plancher (14,3%) et plafond (100%), le niveau de contraste de l'image était modulé avec l'algorithme QUEST.

Pour l'analyse, les deux premiers blocs (280 essais) de la tâche ont été laissés de côté. Afin de révéler les orientations utiles à la reconnaissance des différentes émotions, les données des bulles d'orientation ont été analysées avec une procédure presque identique à celle décrite plus haut. Ainsi, une somme pondérée des masques d'orientation a été calculée pour chaque sujet ($n = 40$) et pour chaque émotion ($e = 7$). Chacun des vecteurs de classification résultants a ensuite été standardisé avec les paramètres de l'hypothèse nulle, estimés à l'aide de 100 simulations. Des vecteurs de groupe (un par expression) ont été créés en additionnant les vecteurs individuels intraexpression, puis en divisant la somme par $\sqrt{n}$. Un vecteur pour les expressions regroupées a ensuite été créé en additionnant les vecteurs de groupe de chaque expression, puis en divisant la somme par $\sqrt{e}$. Le seuil statistique ($Z_{crit} = 2,49$, $p < 0,05$; bicaudé) a été déterminé avec la Stat4CI toolbox (Chauvin *et al.*, 2005).

Lorsqu'on considère les expressions regroupées, l'information à -90 degrés (horizontale) corrèle significativement avec les scores de précision ($Z_{max} = 11,67$, $p < 0,05$). Lorsqu'on considère chaque expression de manière isolée, l'information horizontale corrèle significativement avec la précision pour toutes sauf une : colère ($Z_{max} = 4,72$), dégoût ($Z_{max} = 6,59$), joie ($Z_{max} = 2,85$), peur ($Z_{max} = 3,9$), tristesse ($Z_{max} = 6,41$). La surprise fait figure d'exception, puisque sa reconnaissance dépend davantage de l'information à $-157,5$ degrés (verticale-oblique), $Z_{max} = 3,17$, $p < 0,05$. Un observateur modèle effectuant de l'appariement au gabarit (corrélateur matriciel, ou *template-matcher*; voir Smith *et al.*, 2005) a été généré afin de mesurer l'information disponible. Celui-ci a révélé que l'information se situe autour de l'axe de -90 degrés pour toutes les expressions, incluant la surprise. Les stratégies humaines sont donc largement harmonisées à l'information disponible, sauf pour la

surprise. Des analyses secondaires ont cependant été effectuées afin d'explorer le contraste entre le modèle et les humains en ce qui concerne la surprise. Celles-ci révèlent que l'information oblique est particulièrement utile pour différencier la surprise et la peur. En effet, un contrôle statistique pour la peur fait disparaître la corrélation avec l'information à $-157,5$ degrés ($Z_{max} = 1,16, p > 0,1$) et apparaît une corrélation marginalement significative avec l'information à -90 degrés ($Z_{max} = 1,43, p < 0,1$). Enfin, il a été vérifié si l'aptitude générale en reconnaissance d'expressions faciales (sensibilité au contraste, ou 1/seuil de contraste) pouvait être prédite par l'utilisation sélective de l'information horizontale (Pachai *et al.*, 2013a). Un score d'utilisation sélective de l'information horizontale a été calculé pour chaque sujet en appliquant un filtre gaussien (avec une bande passante de 20 degrés) centré sur l'axe de -90 degrés. Une corrélation hautement significative a été observée avec la sensibilité au contraste, $r = 0,64, p < 0,001$, signifiant que les meilleurs sujets dans cette tâche étaient ceux qui utilisaient le plus systématiquement l'information horizontale diagnostique.

La troisième étude a été menée parallèlement à la deuxième, avec les 40 mêmes participants qui alternaient entre un bloc de l'une et un bloc de l'autre tâche. Dans la troisième étude cependant, les visages étaient aléatoirement filtrés avec des fenêtres gaussiennes (c.-à-d., des bulles locales; voir expérience 1, dans Gosselin et Schyns, 2001). Le nombre de bulles était manipulé afin de maintenir la performance entre un niveau plancher et plafond. Ce nombre était déterminé avec QUEST.

Afin de révéler les régions faciales utiles à la tâche, une analyse d'image de classification a été effectuée suivant la même procédure que celle décrite dans la deuxième étude. Cependant, plutôt que des vecteurs de classification, des matrices de classification ont été créées. Le seuil statistique ($Z_{crit} = 3,4, p = 0,05$; bicaudé) a été déterminé avec la Stat4CI toolbox (Chauvin *et al.*, 2005).

Comme attendu, différents traits faciaux étaient utiles selon les expressions. À travers toutes les expressions, la bouche ($Z_{max} = 10,9$) et les yeux ($Z_{max} = 6,39$) sont les régions les plus importantes. Ces résultats reproduisent largement ceux de la littérature scientifique (Blais *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2005). La performance dans les deux tâches (études deux et trois) corrèle fortement, $r = 0,71, p < 0,001$, suggérant le partage d'un mécanisme perceptif. Afin d'explorer le lien entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et l'utilisation des régions faciales, une analyse de régression linéaire multiple de la valeur diagnostique des régions faciales (variable indépendante) sur la sélectivité aux horizontales (variable dépendante) a été effectuée. Pour la variable indépendante, la valeur diagnostique a été définie comme coefficient maximal de corrélation (score z) entre un pixel et les scores de précision à l'intérieur de chacune de six régions d'intérêt, pour chacun des sujets. Celles-ci étaient : les sourcils, les yeux, la jonction entre les yeux et les sourcils, le nez, les plis nasolabiaux et la bouche. Une équation significative a été obtenue, $F(6, 33) = 3,36, p <$

0,05, avec un $R^2 = 0,38$. La région des yeux était le seul prédicteur significatif dans cette équation, $t(39) = 3,8$, $p < 0,01$ (pour tous les autres traits faciaux, $p > 0,2$). Spécifiquement, l'utilisation des yeux corrèle significativement avec l'utilisation sélective de l'information horizontale, $r = 0,54$, $p < 0,001$.

Globalement, les résultats de ce premier article viennent renforcer de façon considérable l'idée selon laquelle l'information faciale horizontale a une importance capitale pour la reconnaissance des expressions faciales. En effet, toutes les expressions sauf une sont principalement reconnues à l'aide de l'information horizontale. Le second objectif était d'établir, pour la première fois, un lien empirique entre l'utilisation de l'information horizontale et l'utilisation des différentes régions faciales. Comme anticipé, l'utilisation de la région des yeux corrèle avec l'utilisation de l'information horizontale. Or, aucune autre région faciale ne corrèle avec cette information; pas même la bouche, soit le trait facial le plus important pour la reconnaissance des expressions faciales (Blais *et al.*, 2012). Bien que cela puisse initialement surprendre le lecteur, il est proposé que cela s'explique par le fait que l'utilisation de la bouche est très systématique à travers l'échantillon, alors que celle des yeux l'est moins. Ce qui distinguerait les participants qui utilisent davantage l'information horizontale serait donc une utilisation accrue des yeux. Cela pourrait être lié au fait que les yeux contiennent beaucoup plus d'information dans les hautes fréquences spatiales, comparativement à la bouche. À cet effet, il a été démontré que l'utilisation des horizontales en reconnaissance faciale est plus importante dans les hautes fréquences spatiales que dans les fréquences basses ou intermédiaires (Goffaux *et al.*, 2011) et que les yeux contiennent plus d'information dans les hautes fréquences spatiales horizontales (Keil, 2009). Les résultats de la première étude démontrent aussi un lien intime entre l'aptitude en reconnaissance d'expressions faciales et la sélectivité à l'information horizontale; cela est également le cas pour l'identification faciale (Pachai *et al.*, 2013a). Ainsi, il semble que des stratégies perceptives communes soient impliquées dans au moins une partie du traitement des expressions et de l'identité faciales.

ABSTRACT

Horizontal information was recently suggested to be crucial for face identification. In the present paper, we expand on this finding and investigate the role of orientations for all the basic facial expressions and neutrality. To this end, we developed orientation bubbles to quantify utilization of the orientation spectrum by the visual system in a facial expression categorization task. We first validated the procedure in Experiment 1 with a simple plaid-detection task. In Experiment 2, we used orientation bubbles to reveal the diagnostic—i.e., task relevant—orientations for the basic facial expressions and neutrality. Overall, we found that horizontal information was highly diagnostic for expressions—surprise excepted. We also found that utilization of horizontal information strongly predicted performance level in this task. Despite the recent surge of research on horizontals, the link with local features remains unexplored. We were thus also interested in investigating this link. In Experiment 3, location bubbles were used to reveal the diagnostic features for the basic facial expressions. Crucially, Experiments 2 and 3 were run in parallel on the same participants, in an interleaved fashion. This way, we were able to correlate individual orientation and local diagnostic profiles. Our results indicate that individual differences in horizontal tuning are best predicted by utilization of the eyes.

Keywords: Bubbles, Facial expressions, Face perception, Orientation tuning, Individual differences

ORIENTATIONS FOR THE SUCCESSFUL CATEGORIZATION OF FACIAL EXPRESSIONS AND THEIR LINK WITH FACIAL FEATURES

2.1 Introduction

Complex states of mind such as emotions can be inferred simply by looking at other people's faces. Thus, the human face can be seen as a tool for nonverbal communication (e.g., Haxby et al., 2000; Jack & Schyns, 2015), and the skill to competently process this visual information is likely an important one for successful social interactions. The mechanisms underlying this task have been studied for almost a century already (e.g., Dunlap, 1927). However, it is only recently that the low-level visual properties underlying this skill have started to garner attention.

In human early visual cortices, the variations in luminance that make up complex visual stimuli are processed by discrete channels, sensitive to specific spatial frequency and orientation values (see for review De Valois & De Valois, 1990). Their various combinations play the crucial role of giving visual signals their form and shape—which can then be interpreted by higher visual cortices as features, faces, and expressions. Specific features, for instance, need to be revealed in distinct spatial frequency bands for optimal face identification (e.g., Gosselin & Schyns, 2001; Schyns, Bonnar, & Gosselin, 2002; Butler et al., 2010) and expression categorization (e.g., Smith et al., 2005). Face identification has also been shown to rely on a specific range of spatial frequencies (e.g., Gold, Bennett, & Sekuler, 1999; Näsänen, 1999; Gaspar, Bennett, & Sekuler, 2008; Willenbockel, Fiset, et al., 2010; Royer et al., 2017). Relatedly, it has been shown that the spatial frequency spectrum is a good

predictor of the distance at which facial expressions are better recognized (Smith & Schyns, 2009).

More recently, studies in the field of face perception have begun to investigate the orientation spectrum of visual signals and revealed its high importance for the visual system. More specifically, research has demonstrated that horizontal information is especially critical for accurate face detection (Balas, Schmidt, & Saville, 2015) and identification (Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013). They have also shown that sensitivity to horizontal information increases with familiarity (Pachai, Sekuler, Bennett, Schyns, & Ramon, 2017), and strongly correlates with face identification ability (Pachai et al., 2013).

The case for horizontal information was also made stronger by the fact that the face inversion effect—that is, a disproportionate decline in face identification accuracy when faces are presented upside-down (Yin, 1969)—is mainly associated with a reduction in sensitivity to horizontal information (Goffaux & Dakin, 2010; Pachai et al., 2013; Goffaux & Greenwood, 2016). It is also reinforced by findings that have linked this information with face-selective neuroimaging markers. The electrophysiological N170 face-selective component (see for review Eimer, 2011; Rossion, 2014), for instance, appears to be linked with the processing of horizontal information in faces. Indeed, this component typically shows a distinct increase in amplitude upon perception of inverted faces, and this “N170 face inversion effect” is dampened when the phase of horizontal information is randomized (Jacques, Schiltz, & Goffaux, 2014). In addition, the functionally-defined “fusiform face area” (FFA; Kanwisher et al., 1997), suggested to be the cortical source of the N170 (Sadeh et al., 2010), was also reported to exhibit horizontal selectivity for faces (Goffaux et al., 2016).

At the moment, very little is known about the visual system's reliance on the orientation spectrum during facial expression recognition. As is the case for face identification however, the discrimination between happy and sad facial expressions has been shown to rely disproportionately on horizontal information (Huynh & Balas, 2014; Balas & Huynh, 2015). Interestingly, vertical information was also shown to be useful for this task, but only when emotions are expressed with an open mouth. These crucial findings by Balas and Huynh (2014; 2015) are the first to suggest that horizontal information play an important role in the categorization of facial expressions, but they are also limited in two ways. First, it has been established that diagnostic information varies as a factor of task demand (e.g., Gosselin & Schyns, 2001; Schyns, Bonnar, & Gosselin, 2002). It has also been shown that diagnostic information for a given expression changes as a function of the expression against which it is compared (e.g., afraid vs. happy, or afraid vs. angry), and of the number of expressions (e.g., 2, 3, or 7) against which it is compared (Smith & Merlusca, 2014). It is therefore possible that these results pertaining to horizontal—and vertical—information are specific to the “happy vs. sad” discrimination paradigm and not indicative of the processes underlying the categorization of other facial expressions. The second limitation is linked with the fact that performance was only compared for horizontal and vertical information. Unlike facial identity, expressions are more heterogeneous and dynamic by nature, and thus involve considerable feature shape differences at their apex. This could have an effect on the distribution of energy along the orientation spectrum which is not accounted for by the measured orientations subset. In our opinion, these limitations warrant an unconstrained investigation of the entire orientation spectrum all the facial expressions.

It is generally proposed that there are six basic emotion categories: Anger, disgust, fear, happiness, sadness, and surprise (Izard, 1971; Ekman & Friesen, 1975; but see however Jack et al., 2016). The distribution of diagnostic cues—that is, task-relevant

information—varies considerably across facial expressions (Smith et al., 2005; Smith & Schyns, 2009; Eisenbarth & Alpers, 2011; Fiset et al., 2017; Wang et al., 2011; Smith & Merlusca, 2014; Jack, Garrod, & Schyns, 2014). Upper facial features, for instance, are particularly diagnostic of the expressions of fear, sadness and anger, whereas lower features are more diagnostic of the expressions of surprise, disgust, happiness, and of neutrality. Despite these differences however, evidence suggests that the mouth is used to a greater extent than the eyes when categorizing facial expressions (Blais et al., 2012; Calvo, Fernández-Martín, & Nummenmaa, 2014; see also Peterson & Eckstein, 2012; Blais et al., 2017).

To the best of our knowledge, the link between facial features and orientations has never been investigated before. Because orientation is a global image property, it is impossible to know with certainty which facial features are used in a given orientation band. There are however some informative clues in this regard. Face identification, for instance, is usually explained in terms of utilization of the eye region (Gosselin & Schyns, 2001; Schyns, Bonnar, & Gosselin, 2002; Sekuler et al., 2004; Caldara et al., 2005; Butler et al., 2010)—a region that is particularly rich in horizontal mid-to-high spatial frequency content (Keil, 2009). This is of particular interest, given that the processing of facial horizontal information was shown to be largely supported by this range of spatial frequencies (Goffaux, van Zon, & Schiltz, 2011). Thus, we could reasonably expect that processing of horizontal information and of the eye region are intimately linked—at the very least in a face identification task. The question however was never directly investigated for any type of face processing task and thus remains the product of speculation.

The present research had two main objectives. First, we wanted to thoroughly examine the role of orientations in the processing of facial expressions, accounting for all the basic emotion categories and neutrality. Because we did not want to limit

our exploration to a subset of the orientation spectrum, we developed orientation bubbles. Like bubbles (Gosselin & Schyns, 2001; Schyns, Bonnar, & Gosselin, 2002) and spatial frequency bubbles (Willenbockel, Fiset, et al., 2010), orientation bubbles is a data-driven procedure which randomly samples the dimension of interest—here, the orientation spectrum—over a number of trials to quantify its use by the visual system.

Second, we wanted to explore the link between utilization of the orientation spectrum and of local facial cues during expression categorization. Because this bridging attempt is completely novel, we opted to investigate the question with two separate tasks which were accomplished by the same participants in an interleaved fashion: One with orientation bubbles, and the other with location bubbles. On its own, each task allowed us to replicate previous findings; and the orientation bubbles task allowed us to also expand upon the existing literature. We were then able to correlate individual orientation and local profiles to reveal the link between orientation diagnosticity and facial feature diagnosticity.

Below, we report the results of three experiments. In Experiment 1, we assessed the validity of orientation bubbles using a simple plaid detection task. In Experiment 2, we used orientation bubbles to reveal the diagnostic orientations for each of the basic facial expressions and neutrality in a categorization task. Experiment 3 was identical to Experiment 2, except that stimuli were instead randomly sampled with location bubbles (see Experiment 1 in Gosselin & Schyns, 2001). Critically, Experiments 2 and 3 were run in parallel on the same participants, in an interleaved fashion. To anticipate on the results, we found horizontal information to be highly diagnostic for neutrality and all the basic facial expressions except surprise. We also found that individual differences in horizontal tuning strongly correlate with the aptitude with

which the categorization of expressions is carried. Finally, we show that horizontal tuning is best predicted by diagnosticity of the eye region.

2.2 Experiment 1

The main purpose of this experiment was to test whether orientation bubbles can successfully reveal the precise orientation content that is diagnostic of a task. To this end, we employed a detection task similar to the one employed by Willenbockel, Fiset, and colleagues for a similar purpose (experiment 1; 2010). A plaid—the sum of two sinusoidal gratings with orthogonal orientations—was randomly filtered in the orientation domain with orientation bubbles, and subjects were asked to indicate whether the stimulus was present or absent. We then applied a classification image analysis (Eckstein & Ahumada, 2002; Gosselin & Schyns, 2004), aiming to retrieve the plaid's embedded orientation signals from orientation bubbles data.

2.2.1 Methods

2.2.1.1 Participants

Ten subjects were recruited at Université du Québec en Outaouais (UQO) and received a sum equivalent to 12\$ per hour for their participation. All had normal or corrected-to-normal visual acuity. This experiment was approved by the Research Ethics Committee at Université du Québec en Outaouais and was conducted in accordance with the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki).

2.2.1.2 Apparatus

The experiment was conducted on Apple Mac Mini computers (Intel i7 2.6GHz processor) using custom programs written in Matlab (Natick, MA), and functions from the Image Processing Toolbox and the Psychophysics toolbox (Pelli, 1997; Brainard, 1997). Stimuli were displayed on a 23-in Samsung LCD monitor with evenly distributed luminance levels. The stimulus average luminance was equal to that of the uniform grey background (107.2 cd/m^2). Screen resolution was set to 1920×1080 , and refresh rate was 100 Hz. Participants sat in a dark room and a chin rest was used to ensure that they maintained a viewing distance of 57 cm.

2.2.1.3 Procedure

Participants were instructed to perform a plaid detection task. The original plaid, a 256×256 pixels array subtending 6.8° of visual angle, was constructed by summing two sinusoidal gratings with a spatial frequency of 27.2 cycles/image or 4 cycles/ $^\circ$: one with an orientation of -90° (horizontal), and the other with an orientation of -180° (see Figure 1.1A). The phase of both gratings was randomized on each trial. On target-present trials (probability of 50%), the plaid was randomly filtered in the orientation domain with orientation bubbles (below) and embedded in Gaussian white noise. On target-absent trials, only Gaussian white noise was presented.

A trial began with the presentation of a fixation cross (450 ms), which was followed by the stimulus (850 ms). The screen then went blank and remained as such until the subject responded using the appropriate keys on the keyboard. Subjects first performed 10 practice trials, and then completed three blocks of 100 trials each.

2.2.1.4 Orientation bubbles

At the beginning of a trial, the orientation content of a stimulus—here, a plaid—was randomly sampled using custom code (available at the address <http://lpvs-uqo.ca/wp-content/uploads/2017/06/orbs.zip>) and functions from the Image Processing Toolbox in Matlab. The procedure, described below, is illustrated in Figure 1.1.

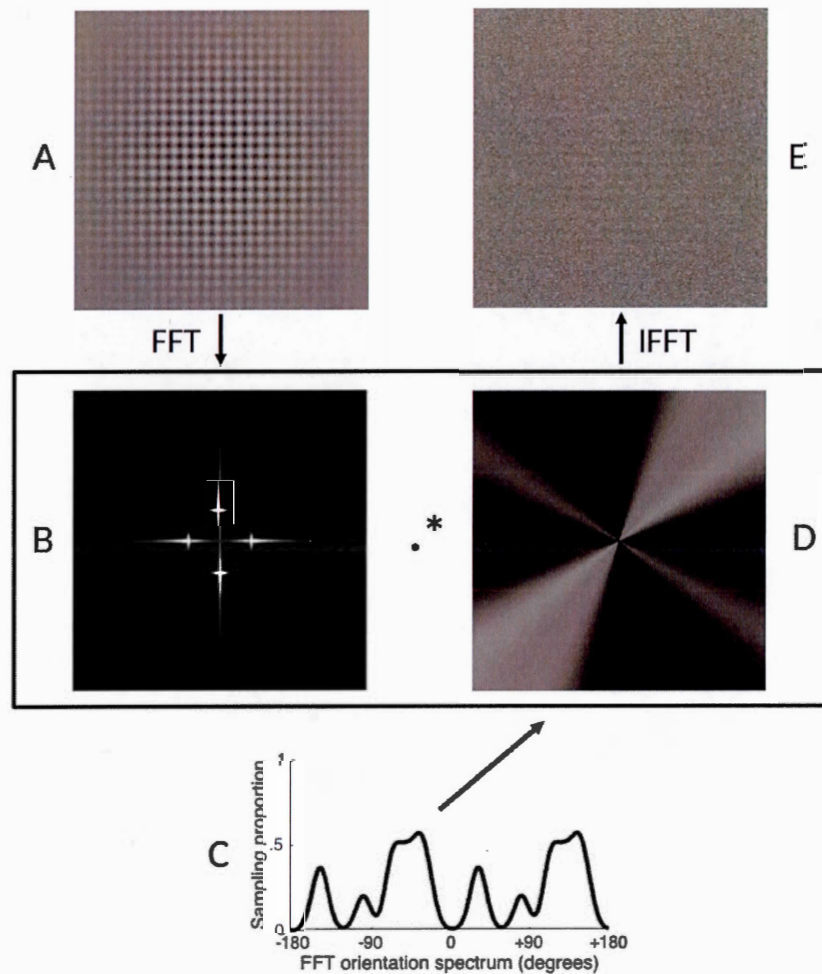


Figure 2.1. Illustration of orientation bubbles filtering. A plaid (A) is converted to its Fourier spectrum with the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm, and its quadrants are shifted (B). An orientation sampling vector (C) is created by summing ten pairs of Von Mises orientation samples (orientation bubbles). Then, the orientation sampling matrix (D) is created by applying the orientation sampling vector to an orientation matrix. Orientation filtering is carried by dot multiplying (.*) the orientation sampling matrix and the shifted plaid Fourier spectrum. The experimental stimulus is then reconstructed by Inverse-FFT (IFFT), and Gaussian white noise is added (E).

First, a target image (Fig. 2.1A) was run through the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm to generate its Fourier spectrum (Fig. 2.1B). Second, an *orientation sampling vector* was created (Fig. 2.1C). It consisted in ten pairs of “Von Mises” orientation samples, or *orientation bubbles*. The Von Mises is a circular function analogous to the Wrapped Normal distribution and ranges from -180° to $+180^\circ$. It has two parameters: μ , which designates the orientation (in degree) at which the distribution peaks, and κ , which determines the width (in degree) of the distribution. One bubble comprised two Von Mises, one with parameters μ_i and κ , and the second with parameters $\mu_i + 180^\circ$ and κ —the second Von Mises ensures identical sampling of the symmetrical FFT quadrants. The μ_i parameters, with $i = 1$ to 10, were randomly drawn with replacement from a rectangular distribution of all orientations, whereas the κ parameter was always equal to 45.51 (full width at half maximum [FWHM] = 20°), which corresponds approximately to the estimated width of the orientation channels in face identification (Dakin & Watt, 2009). The sampling proportions of the *orientation sampling vector* were capped at 1 (since they can be greater than 1 if two or more bubbles are close to each other). Third, an *orientation sampling matrix* of dimension 256×256 was created (Fig. 2.1D) by applying the *orientation sampling vector* to an *orientation matrix*. This *orientation matrix* was equal to $\tan^{-1}[(y - 127)/(x - 127)]$, with x and y corresponding, respectively, to the column and the row of the *orientation matrix*. Fourth, and finally, the *orientation sampling matrix* was dot-multiplied with the image Fourier spectrum, and the resulting Fourier spectrum was inverse Fast Fourier Transformed (Fig. 2.1E). Gaussian white noise was added to the filtered stimulus to maintain performance at 75% of correct responses. The appropriate noise level was estimated on a trial-by-trial basis using QUEST (Watson & Pelli, 1983).

2.2.2 Results and Discussion

To find out which parts of the orientation spectrum were associated with accuracy, we first performed for each subject what amounts to a multiple linear regression analysis of orientation sampling vectors (independent variable) on response accuracy scores (dependent variable). The logic here is that the more the information revealed by orientation bubbles matches observer representations, the greater the probability of a correct response. The analysis was conducted on “plaid present” trials, and carried out by calculating a weighted sum of the orientation sampling vectors, allocating positive weights to filters associated with correct responses and negative weights to filters associated with incorrect responses. To give equal weight to correct and incorrect trials, accuracy scores were transformed into z scores across the appropriate subset of trials. The outcome was a series of 10 vectors of spatially correlated regression coefficients—henceforth called classification vectors, or CVs—quantifying the strength of association between orientations and accurate detection of the plaid. Every CV was then individually z scored with the mean and standard deviation of the null hypothesis; the parameters of which were estimated by simulating 100 CVs. Each simulated CV was generated with a weighted sum of orientation sampling vectors, using instead random permutations of z -scored accuracies from the “plaid present” trials subset.

To retrieve the plaid’s diagnostic information, a group CV was created by first summing individually z -scored CVs across subjects, and then dividing the outcome by $\sqrt{n}$, where n is the sample size. A pixel test (Chauvin et al., 2005) was used to determine the statistical threshold ($Z_{crit} = 2.49$, $p < .05$; one-tailed). The pixel test applies a statistical correction for multiple observations, while also taking into account the spatial correlation that results from the 1D orientation bubble size.

Results for half of the symmetric orientation spectrum are shown in Figure 1.2, which plots the z-scored regression coefficients (black line) and the significance threshold (grey dotted line) along the orientation spectrum. These coefficients represent the strength of the correlation between orientation and performance. As expected, two significant peaks emerge near the -180° vertical axis ($Z_{max} = 13.26$) and the -90° horizontal axis ($Z_{max} = 11.15$).

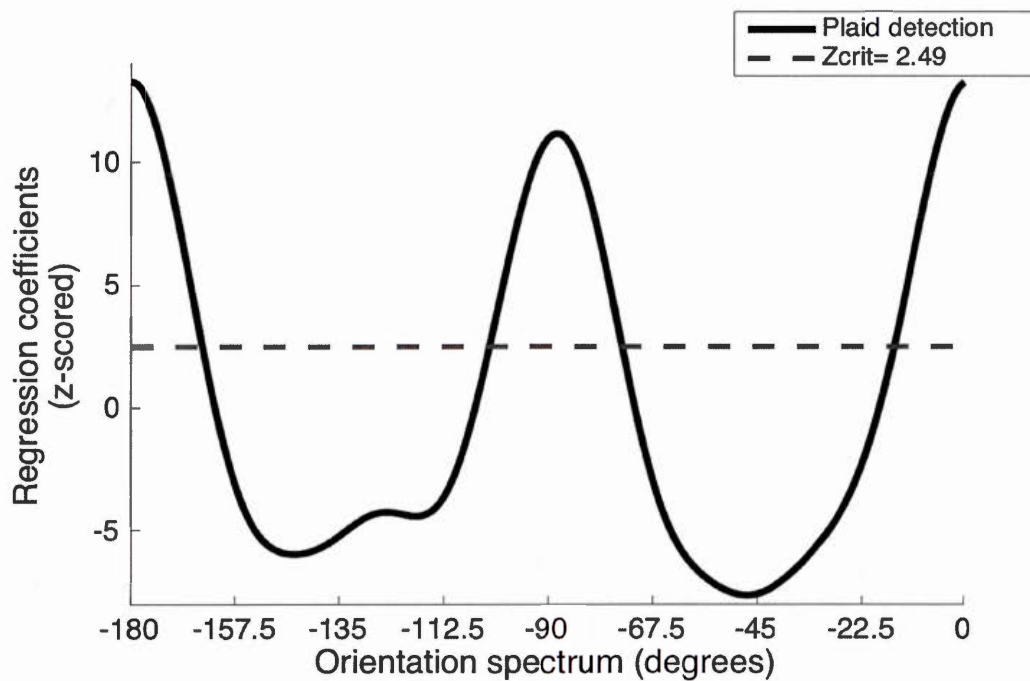


Figure 2.2. Experiment 1 group classification vector. Orientation bubbles accurately revealed the diagnostic information of the plaid, with significant peaks emerging at -0.628° (vertical axis) and -88.148° (horizontal axis), $Z_{crit} = 2.49$, $p < 0.05$.

We used a 50% “area orientation measure” (AOM; analogous to the fractional area technique used to estimate component latencies in electrophysiological studies) to estimate peak positions. This method was chosen because it is less sensitive to the

shape of tuning curves (see for a similar application of the procedure Tadros et al., 2013). The AOM estimates of the vertical and horizontal peaks were -0.62° (20.4° bandwidth) and -88.64° (18.3° bandwidth), respectively. Neither the vertical, $t(9) = 0.75$, $CI\ 95 = [-3.66^\circ, 1.83^\circ]$, $p > 0.05$, nor the horizontal, $t(9) = 0.04$, $CI\ 95 = [-4.04^\circ, 3.9^\circ]$, $p > 0.05$, peak significantly differed from its respective reference (-180° , -90°) value.

Critically, no other part of the orientation spectrum correlated with task responses. We are thus confident that orientation bubbles can effectively recover the diagnostic orientations for a task.

2.3 Experiment 2—Orientation bubbles

Experiment 2 was designed to reveal the diagnostic orientation content for the successful categorization of the basic facial expressions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise) and of neutral expressions. Importantly, the blocks of Experiment 2 and 3 were interleaved within subjects. Fifty percent of participants began with a block from Experiment 2, and the other fifty percent began with a block from Experiment 3.

2.3.1 Methods

2.3.1.1 Participants

Forty subjects participated in Experiment 2 and 3. They received a sum equivalent to 12\$ per hour for their participation. All had normal or corrected-to-normal visual acuity. This experiment was approved by the Research Ethics Committee at

Université du Québec en Outaouais and was conducted in accordance with the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki).

2.3.1.2 Apparatus

In this experiment, only the monitor and viewing distance differed from Experiment 1. The monitor was a 24-inch BenQ LCD monitor with a refresh rate of 120 Hz. Screen resolution was 1920×1080 , and display evenly distributed luminance levels. Participants sat in a dark room, and a chinrest was used to ensure that they maintained a distance of 65 cm between them and the screen.

2.3.1.3 Stimuli

Seventy grey scale pictures of faces, 10 identities (five females, five males) times seven facial expression of emotions from the Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF) database (Lundqvist, Flykt, & Öhman, 1998) were used. Each identity depicted the six basic facial expressions and neutrality. Faces were spatially aligned on the positions of the main internal facial features—eyes, nose, mouth—using translation, rotation, and scaling.

Images were downsampled to a resolution of 256×256 pixels, and a grey oval that blended with the background (66.33 cd/m^2) was applied to the face in order to hide the facial contour and external features. Faces spanned 4.3° of visual angle horizontally (6.1° vertically). The spatial frequency spectra and luminance histograms of images were equalized with the SHINE toolbox (Willenbockel, Sadr, et al., 2010) to minimize the influence of low-level variance across stimuli on observer responses, and thus better capture the contribution of internal representations.

2.3.1.4 Procedure

Before the experimental tasks started, participants were initially given a maximum of 20 min to familiarize themselves with the stimuli. Then, they completed several training blocks (140 trials each) in which they were required to reach a performance criterion of 95% correct categorization for each facial expression individually. Those training blocks were meant to prepare the participants for both the orientation bubbles (Experiment 2) and location bubbles (Experiment 3) tasks.

A training trial began with a fixation cross (500 ms) located in the middle of the screen, followed by a face stimulus that remained on the screen until the correct response was given. Participants responded by pressing one of the seven assigned keys on the computer's keyboard—that is, one key per expression category. If an error was made, the correct expression label appeared 1° of visual angle below the face, and participants were instructed to re-examine the stimulus and input the correct answer—trial response was still considered incorrect. Input of the correct answer automatically initiated the next practice trial or ended the block if all trials had been completed. Participants completed as many practice blocks as was needed to reach the performance criterion ($M = 3.46$, $SD = 2.01$), and then moved on to the experimental tasks.

Participants completed a total of twenty-four experimental blocks, each comprising 140 trials. They started with either a block of orientation bubbles (Experiment 2) or location bubbles (Experiment 3), and subsequently alternated between one block of each task. Experiments 2 and 3 thus each comprised a total of 1,680 experimental trials, with 240 trials per facial expression.

An experimental trial began with a fixation cross (500ms) in the center of the screen. It was immediately followed by a face stimulus (150ms) filtered with orientation bubbles (examples can be seen in Figure 1.3), after which, the screen went blank until participants responded using one of the seven assigned keyboard keys—i.e., one key per expression. Task difficulty was controlled by adjusting the RMS contrast of orientation-filtered faces in order to maintain the criterion performance of 57.14% correct responses—that is, halfway between 100% correct (perfect) and 14.3% correct (chance) responses. The appropriate RMS contrast level of filtered face stimuli was estimated on a trial-by-trial basis, using QUEST (Watson & Pelli, 1983), and dithering was applied to reduce aliasing (Allard & Faubert, 2008). Image contrast was modulated for overall performance—instead of independently for each expression—because all expressions are not equally easy to categorize, and we did not want the contrast level to act as a cue to the correct response.

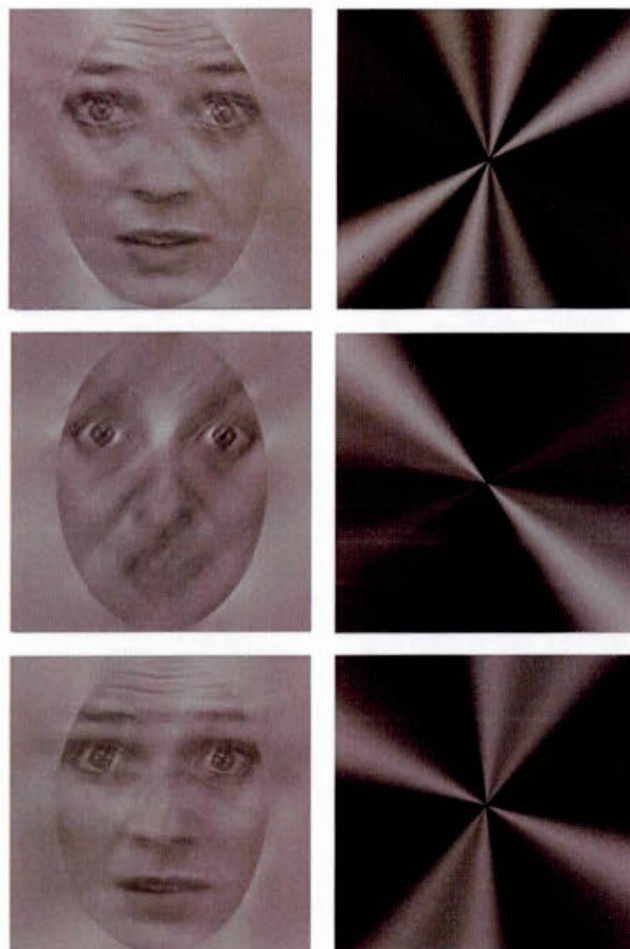


Figure 2.3. Examples of orientation bubbles filtered stimuli (left column), along with the corresponding orientation sampling matrices (right column), as applied in Experiment 2. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.

2.3.2 Results and Discussion

The first two experimental blocks were discarded for the analysis. Participants needed an average RMS contrast of 0.0134 ($SD = .009$) to respond correctly on 57.14% of trials, and the overall average response time on correct trials was 1,238 ms ($SD = 212$ ms). Performance (percent correct) varied considerably across facial expressions: anger ($M = 54.9\%$, $SD = 13.8\%$), sadness ($M = 61.9\%$, $SD = 12.7\%$), disgust ($M = 57\%$, $SD = 12.5\%$), fear ($M = 53.8\%$, $SD = 12.1\%$), happiness ($M = 91.3\%$, $SD = 4.5\%$), surprise ($M = 66.5\%$, $SD = 14.6\%$), and neutrality ($M = 62.7\%$, $SD = 15.9\%$). Response times (milliseconds) on correct trials also varied between facial expressions: anger ($M = 1,359$, $SD = 334$), sadness ($M = 1,286$, $SD = 238$), disgust ($M = 1,358$, $SD = 215$), fear ($M = 1,569$, $SD = 336$), happiness ($M = 910$, $SD = 249$), surprise ($M = 1,299$, $SD = 281$), neutrality ($M = 1,180$, $SD = 249$).

To uncover which parts of the orientation spectrum were associated with accuracy, we first performed, for each subject and expression combination, what amounts to a multiple linear regression analysis of orientation sampling vectors on response accuracy scores. The analysis was carried by calculating a weighted sum of orientation sampling vectors, allocating positive weights to filters associated with correct responses and negative weights to filters associated with incorrect responses. The weights in question were the accuracy scores from the appropriate subset of trials—angry trials for anger, and so forth—which were transformed into z scores. The outcome was thus a series of 40×7 classification vectors (CVs). That is, for every subject, seven CVs (one per expression) were created. Every CV was then individually z scored with the mean and standard deviation of the null hypothesis, the parameters of which were estimated by simulating 100 CVs with random permutations of z -scored accuracies from the appropriate subset of trials.

To retrieve the diagnostic information for individual expressions, seven group CVs (one per expression) were obtained by first summing individually z-scored CVs within expression and across subjects, and then dividing the outcome by $\sqrt{n}$, where n is the number of subjects. To retrieve the diagnostic information for combined expressions, a pooled expressions CV was created by first summing the above group CVs, and then dividing the outcome by $\sqrt{e}$, where e is the number of expressions. A two-tailed pixel test (Chauvin et al., 2005) was used to determine the statistical threshold ($Z_{crit} = 2.49$, $p < 0.05$).

Results for half of the symmetrical orientation spectrum are shown in Figure 1.4, which plots the z-scored regression coefficients (red line) and the significance thresholds (grey dotted lines) along the orientation spectrum, for each individual expression and for combined expressions. Additionally, Figure 1.4 also shows expressions revealed through their respective diagnostic filters (bottom images). As can be seen, information bundled around the -90° horizontal axis is diagnostic for anger ($Z_{max} = 4.72$), disgust ($Z_{max} = 6.59$), fear ($Z_{max} = 3.9$), happiness ($Z_{max} = 2.85$), sadness ($Z_{max} = 6.41$), neutrality ($Z_{max} = 7.83$), and pooled expressions ($Z_{max} = 11.67$, $p < 0.05$), all $ps < 0.05$. The only exception is surprise, for which information at the -157.5° oblique-vertical axis is diagnostic ($Z_{max} = 3.17$, $p < 0.05$). Furthermore, and in addition to information around the horizontal axis, information around the -180° vertical axis was also marginally diagnostic for the correct categorization of fear ($Z_{max} = 1.62$, $p < 0.1$). It thus appears that overall, facial expression categorization as a process is strongly supported by horizontal information.

Moreover, there were also emotion categories for which there was information that negatively correlated with performance. This orientation information, when revealed, tends to systematically lead to incorrect responses (i.e., anti-diagnostic information;

see for example Roy, Fiset, Taschereau-Dumouchel, Gosselin, & Rainville, 2013). We have found anti-diagnostic information for anger ($Z_{min} = -2.52$), disgust ($Z_{min} = -3.35$), fear ($Z_{min} = -2.81$), sadness ($Z_{min} = -4.28$) and neutrality ($Z_{min} = -4.75$), but not for happiness or surprise. Contrary to diagnostic information, which is largely bundled near the horizontal axis, anti-diagnostic information is scattered along the rest of the orientation spectrum. Expressions revealed through their respective anti-diagnostic filters can be observed in Figure 1.4. Anti-diagnostic disgust looks like anger, and disgust was in fact miscategorized as anger on 18.6% of trials; anti-diagnostic fear looks like surprise, and fear was in fact miscategorized as surprise on 19.3% of trials; finally, anti-diagnostic sadness looks like disgust, and sadness was in fact miscategorized as disgust on 10.3% of trials. Although it is less obvious looking at anti-diagnostic anger and neutrality, angry and neutral stimuli were both miscategorized as sadness on 11.2% and 12.2% of trials, respectively.

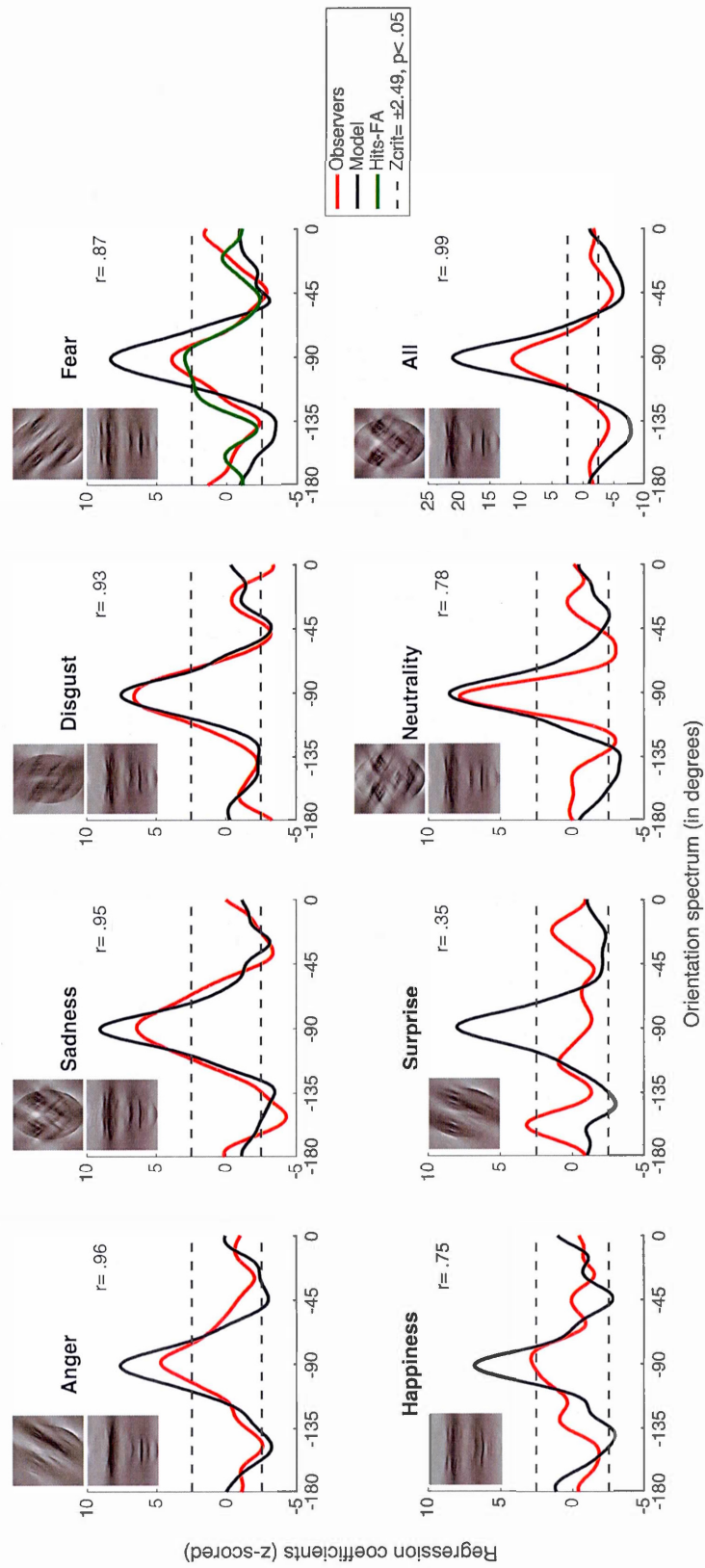


Figure 2.4. Experiment 2 group classification vectors. Each graph plots the z-scored coefficients that resulted from regressing orientation sampling vectors on performance scores (correct/incorrect), for human observers (black line) and the model observer (red line), along with the statistical threshold (dotted gray line), $Z_{crit} = 2.49$, $p < 0.05$. For the expression of fear (top-rightmost graph), the z-scored coefficients that resulted from regressing orientation sampling vectors on hits and false alarms are also plotted (green line). In the top left corner of each graph, a face depicting the appropriate expression is revealed through the diagnostic (bottom) and antidiagnostic (top) orientation band for this expression. In the top right corner of each graph, the Pearson correlation between observer and model orientation profiles can be seen. Images [BF01AFS - BF01ANS - BF01DIS - BF01HAS - BF01NES - BF01SAS - BF01SUS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.

To benchmark information across face orientation spectra, we built a model observer (for details, see Blais et al., 2012; Smith et al., 2005) that was subjected to the orientation bubbles task with essentially the same experimental constraints as our human observers. Thus, the model performed the same number of trials, with the same orientation bubbles filters, and the same performance criterion—i.e., 57.14% overall correct responses. On each trial, an orientation sampling matrix was created and it was applied to the trial stimulus and to each of the possible 70 face images. However, instead of modulating stimulus RMS contrast, we modulated the proportion of Gaussian white noise—estimated with QUEST (Watson & Pelli, 1983)—that was added to the masked stimulus. Thus, stimulus RMS contrast was constant while we varied noise RMS contrast to control the model's performance (e.g., Smith et al., 2005; Blais et al., 2012). The model calculated the Pearson correlation between the noisy filtered stimulus and each of the filtered face images. In a winner-take-all fashion, the model's categorization response was the emotion expressed by the face

image that maximally correlated with the noisy stimulus. Model CVs, which depicted the available information, were then generated and z scored using the exact same procedure as for observer CVs. Even though this model observer is very efficient, it isn't the ideal observer. We chose to implement this particular model to allow direct comparison with Blais et al. (2012) and Smith et al. (2005).

As can be seen in Figure 1.4 (black lines), useful information ($Z_{crit} = 2.49, p < 0.05$; two-tailed) was exclusively concentrated on the -90° horizontal axis for anger ($Z_{max} = 7.6$), sadness ($Z_{max} = 9.07$), disgust ($Z_{max} = 7.52$), fear ($Z_{max} = 8.31$), happiness ($Z_{max} = 6.75$), surprise ($Z_{max} = 7.98$), neutrality ($Z_{max} = 8.55$), and for pooled expressions ($Z_{max} = 21.04$). As can be seen in Figure 1.4 (top right corners of orientation profiles), human strategies on average strongly correlated with the model profile ($M = 0.74, SD = 0.44$). The only notable difference was surprise, which negatively correlates with the available information ($r = -0.34$).

This result is puzzling and we were thus interested in elucidating why participants did not align themselves with the available information. First, we found a considerable degree of confusion between surprise and fear: Indeed, of all the surprise-present trials ($M = 66.5\%$ correct responses), it was confused with fear 19.23% of the time (vs. 14.27% for the combined remaining expressions). We next verified if and how orientation influenced response patterns on surprise-present trials. To answer this question, we performed two classification vector analyses. For the first analysis, we summed orientation sampling vectors on surprise-present trials, using "surprise" (correct) and "fear" (incorrect) responses as weights. The result is that horizontal information appears to have consistently led to "fear" responses ($Z_{min} = -2.19, p < 0.1$), and oblique information led to "surprise" responses ($Z_{max} = 3.06, p < 0.05$). For the second analysis, we summed orientation sampling vectors on surprise-present trials, using "surprise" and "other" (i.e., anger, disgust, happiness, neutrality or

sadness responses) responses as weights. Strikingly, horizontal information appears to have led to “surprise” responses in this instance ($Z_{max} = 1.43, p < 0.1$), but not oblique information ($Z_{max} = 1.16, p > 0.1$). Thus, it appears that subjects were able to categorize surprise as such when using horizontal information, but they were also highly susceptible to incorrectly categorize the expression as fearful. Ultimately, this results in a null correlation between horizontal information and performance when we take into account all surprise-present trials (Figure 1.4).

The case of fear is also an interesting one because vertical information marginally correlated with performance for human observers, but not for the model observer. We performed a secondary analysis to remove from correct “fear” responses variance that can be explained by an overall greater disposition to simply respond “fear,” irrespective of the displayed facial expression. We did so by calculating a weighted sum of orientation sampling vectors, similar to the procedure described above; only this time, the weights were hits (respond “fear” on fear-present trials) and false alarms (respond “fear” on fear-absent trials), transformed into z scores across the appropriate trials subset. The resulting classification vector is illustrated in Figure 1.4 (top rightmost graph, green line). As can be seen, a single peak emerged around the -90° horizontal axis. Thus, vertical information led to a similar probability of hits and false alarms, consistent with the hypothesis that this information creates a perceptual response bias toward fear.

Finally, we verified whether expression categorization ability level could be predicted from the utilization of horizontal information. We calculated this score by applying a 1D Gaussian filter ($\text{FWHM} = 20^\circ$, sum equal to 1) centered on the -90° horizontal axis of the z-scored individual classification vectors for pooled expressions. The Gaussian was centered on the horizontal axis because our model observer revealed this to be the most information-rich orientation band, supporting findings in the face

processing literature (e.g., Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013). The sum of each resulting product vector was thus a weighted averages of horizontal information utilization; giving maximal weight to regression coefficients that fell square on the horizontal axis, and a gradually decreasing weight as coefficients fell further away from this axis. We then correlated this measure of horizontal tuning with contrast sensitivity—the reciprocal of the contrast threshold—which is a direct measure of the amount of information that was needed to maintain 57.14% correct responses in the task. As can be seen in Figure 1.5, both measures strongly correlated, $r = 0.64$, CI 95 = [0.43, 0.8], $p < 0.001$. This closely parallels previous results, which have shown that facial identification ability was linked with horizontal tuning (Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013).

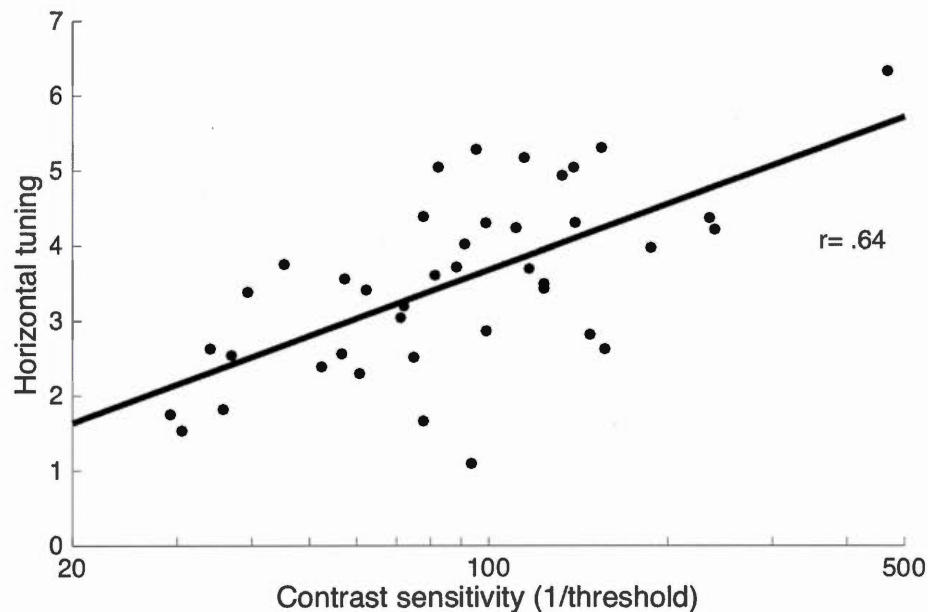


Figure 2.5. The association between Experiment 2 image contrast sensitivity and horizontal tuning, $r = .64$, $p < .001$.

2.4 Experiment 3—Location bubbles

The goal of Experiment 3 was to sample facial cues using location bubbles (experiment 1 in Gosselin & Schyns, 2001) in order to measure facial feature diagnosticity and correlate it with orientation profiles (as measured in Experiment 2). As already mentioned, the blocks of Experiments 2 and 3 were interleaved within subjects, and 50% of participants began with a block from Experiment 3 while the other 50% began with a block from Experiment 2. We first analyzed local bubbles data to reveal diagnostic face regions. We then correlated individual horizontal tuning with local diagnosticity profiles.

2.4.1 Methods

2.4.1.1 Participants, Apparatus, and Stimuli

Same as in Experiment 2.

2.4.1.2 Procedure

Same as Experiment 2 except for two elements. First, instead of orientation bubbles, face stimuli were revealed through an opaque mask punctured by a number of randomly located Gaussian apertures (henceforth called the ‘bubbles mask’) with a FWHM of 39.96 pixels, or 0.95° of visual angle (examples can be seen in Figure 1.6; for more details, see Gosselin & Schyns, 2001, experiment 1). Second, task difficulty was controlled by adjusting the number of bubbles in order to maintain the criterion performance of 57.14%. The appropriate number of bubbles was estimated on a trial-by-trial basis, using QUEST (Watson & Pelli, 1983).

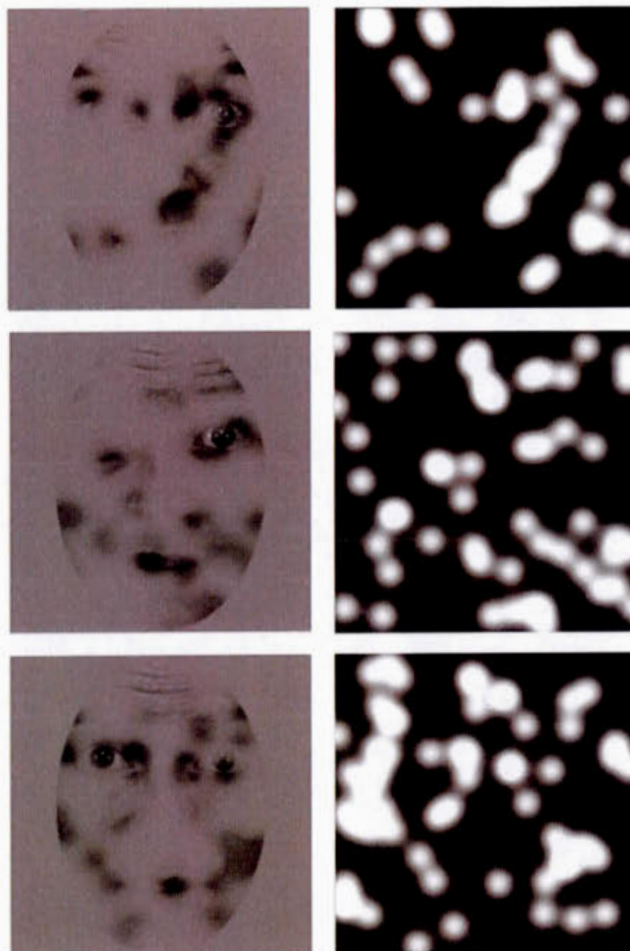


Figure 2.6. Examples of location bubbles filtered stimuli (left column), along with the corresponding bubbles mask (right column), as applied in Experiment 3. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.

2.4.2 Results and Discussion

The first two experimental blocks were discarded for the analysis. Participants needed an average of 27.16 ($SD = 13.08$) bubbles to respond correctly on 57.14% of trials,

and the average response time on correct trials was 1,238 ms ($SD = 261$ ms). Performance (percent correct) varied across expressions: anger ($M = 49.4\%$, $SD = 11.4\%$), sadness ($M = 63\%$, $SD = 10.4\%$), disgust ($M = 57.5\%$, $SD = 12.3\%$), fear ($M = 50\%$, $SD = 11.3\%$), happiness ($M = 85.5\%$, $SD = 7\%$), surprise ($M = 58.2\%$, $SD = 13.4\%$), and neutrality ($M = 62.7\%$, $SD = 16.9\%$). Response times (milliseconds) on correct trials also varied considerably between expressions: anger ($M = 1,360$, $SD = 336$), sadness ($M = 1,278$, $SD = 274$), disgust ($M = 1,353$, $SD = 281$), fear ($M = 1,586$, $SD = 416$), happiness ($M = 878$, $SD = 207$), surprise ($M = 1,336$, $SD = 356$), neutrality ($M = 1,172$, $SD = 292$).

To uncover which facial cues more often led to accurate responses, we performed for each subject and each expression, the same procedure as for Experiment 2, but for bubbles masks instead of orientation sampling vectors. The outcome of this procedure was 40×7 planes of 256 by 256 spatially correlated regression coefficients (henceforth called the classification image; Eckstein & Ahumada, 2002; Gosselin & Schyns, 2004). These reveal the association between image pixels and accurate categorization of the corresponding facial expression. Classification images were then individually z scored with the mean and standard deviation of the null hypothesis (100 simulated classification images).

To retrieve the diagnostic local information for individual expressions, seven group classification images were obtained by first summing individually z -scored classification images within expression and across subjects, and then dividing the outcome by $\sqrt{n}$. For combined expressions, a pooled expressions classification image was created by summing the above group classification images and dividing the outcome by $\sqrt{e}$. A pixel test (Chauvin et al., 2005) was used to determine the statistical threshold ($Z_{crit} = 3.4$, $p < 0.05$; two-tailed).

Results are shown in Figure 1.7, which overlays significant regression coefficients (colored pixels, $p < 0.05$) on grayscale face images. As can be seen, different facial features are linked with the categorization of the various facial expressions. For pooled expressions, both the eyes ($Z_{max} = 6.39$) and the mouth ($Z_{max} = 10.9$) significantly correlated with performance, and the difference between the two was marginally significant ($Z_{dif} = 3.19$, $p < 0.1$). Thus, our results replicate the finding that the mouth is overall the most diagnostic area (Blais et al., 2012).

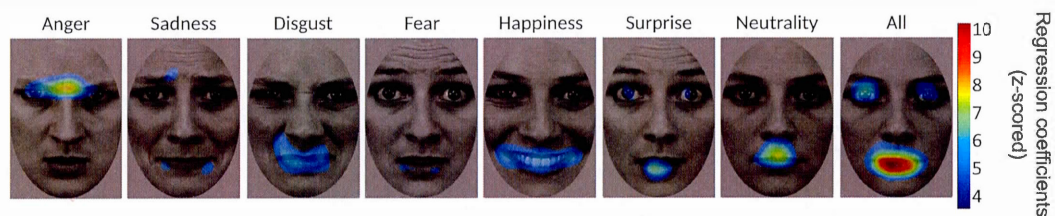


Figure 2.7. Experiment 3 group classification images. Areas depicted in color significantly correlated with task performance, $Z_{crit} = 3.4$, $p < 0.05$. Images [BF01AFS - BF01ANS - BF01DIS - BF01HAS - BF01NES - BF01SAS - BF01SUS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.

To benchmark the information revealed by location bubbles, we built a model observer similar to our orientation bubbles model observer. It was thus subjected to the location bubbles task with essentially the same experimental constraints as human

observers (for details, see Blais et al., 2012; Smith et al., 2005). On each trial, a bubbles mask was created and applied to the stimulus and each of the possible 70 face images. Instead of modulating the number of bubbles, we modulated the proportion of Gaussian white noise, estimated with QUEST (Watson & Pelli, 1983), that was added to the masked stimulus. The model calculated the Pearson correlation between the noisy filtered stimulus and each of the filtered face images. The model's response was the emotion expressed by the face image that maximally correlated with the noisy masked stimulus. Model classification images depicting the available information were then generated and z scored using the exact same procedure as for observer classification images. Usable facial information varied across expressions and, on average, the Pearson correlation between human and model observer profiles was strong ($M = 0.72$, $SD = 0.11$). For pooled expressions, available information was concentrated around the eyes ($Z_{max} = 8.17$) and the mouth ($Z_{max} = 9.48$), and the difference between the two was nonsignificant ($Z_{dif} = 0.93$).

Before investigating the link between the utilization of local information and of the orientation spectrum, we first looked at the link between our two task performance metrics—see Royer, Blais, Gosselin, Duncan, and Fiset (2015) for evidence showing that the amount of information revealed by bubbles is a good predictor of face processing abilities. As can be seen in Figure 1.8, individual differences in contrast sensitivity (Experiment 2) strongly correlated with differences in the number of bubbles (Experiment 3), $r = -0.71$, $CI\ 95 = [-0.84, -0.51]$, $p < 0.001$. This suggests that our two task manipulations tapped into a common perceptual mechanism for categorizing facial expressions. We thereafter looked at the correlation between utilization of orientation and of facial features.

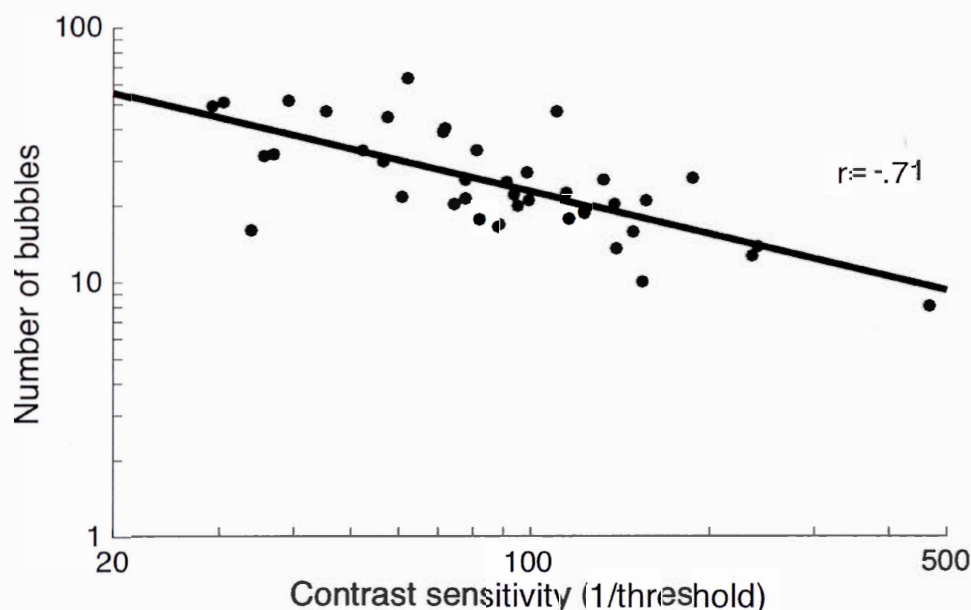


Figure 2.8. The association between image contrast sensitivity (Experiment 2) and the number of bubbles (Experiment 3), $r = -0.71$, $p < 0.001$.

To look at the link between horizontal tuning and utilization of facial features, we performed a multiple linear regression analysis of facial feature diagnosticity (independent variable) on horizontal tuning as described in Experiment 2 (dependent variable). For facial features, diagnosticity scores were defined as the maximum z-scored regression coefficient that fell within a region of interest (ROI) of the smooth classification images. These were extracted for each subject in the six following discrete ROIs (illustrated in Figure 1.9): the eyebrow junction, eyebrows, eyes, nose, nasolabial folds, and the mouth. We obtained a significant equation, $F(6, 33) = 3.36$, $p < 0.05$, with an R^2 equal to 0.38. Interestingly, the eye region was the only significant predictor in this equation, $t(39) = 3.8$, $p < 0.01$ (all other features, $p > 0.2$). More specifically, the correlation between eye diagnosticity and utilization of horizontal information was $r = 0.54$, $CI\ 95 = [0.27, 0.73]$, $p < 0.001$. Thus, it globally

appears that individual differences in utilization of horizontal information is intimately linked with differences in utilization of the eye region.

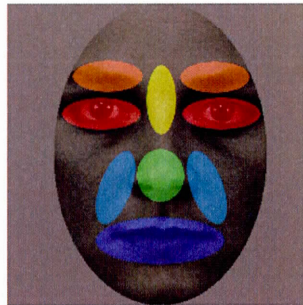


Figure 2.9. Color coded regions of interest (ROI) used in the multiple linear regression analysis—comparing orientation and local diagnostic profiles—are overlaid on a grayscale picture of a face. Red = eyes; orange = eyebrows; yellow = eyebrow junction; green = nose; blue = nasolabial folds; purple = mouth. Image [BF01AFS] from the KDEF recreated with the copyright holder's permission.

2.5 General Discussion

Our first objective with the present work was to explore the role played by the orientation spectrum in the categorization of the six basic facial expressions and of neutrality. We have developed orientation bubbles, which allow the extraction of precise orientation profiles, and validated the procedure in Experiment 1 using a simple plaid detection task. We thereafter proceeded in exploring the role of orientations in the categorization of facial expressions.

Previous work had already demonstrated that horizontal information plays a crucial role in the categorization of happy and sad facial expressions by contrasting performance with horizontal and vertical information (Huynh & Balas, 2014; Balas &

Huynh, 2015). In Experiment 2, we have addressed two limitations of this work, applying orientation bubbles to all the basic facial expressions and neutrality. Overall, we found a strong link between horizontal information and the successful categorization of neutrality and the basic expressions—except surprise. Our results thus replicated findings pertaining to the recognition of happy and sad expressions (Huynh & Balas, 2014; Balas & Huynh, 2015), and also expanded upon those by uncovering the link between horizontal information and other expressions. Additionally, we found anti-diagnostic—oblique-to-vertical—orientations for a handful of expressions. This means that some information, if relied too much upon by the visual system, systematically leads to incorrect categorization responses.

Pearson correlations between human and model—horizontally-tuned—profiles were on average quite strong for individual and pooled expressions. The only exception was surprise, for which the human strategy instead rested on information in the oblique-vertical axes, and this strategy negatively correlated with the model strategy. The results of our secondary analyses suggest that this is not because participants were incapable of using horizontal information to categorize surprise. Instead, they suggest that, on surprise-present trials, horizontal information systematically led to “fear” responses. In other words, had we not included fear among our expression categories, it is possible that subjects would have shown successful utilization of horizontal information to categorize surprise. We can only speculate as to why fear caused this to happen. One possibility is that surprise, as revealed through a horizontal filter, might be harder to dissociate from internal representations of fear. By revealing surprise through its diagnostic oblique-vertical band on the other hand, the rounded open mouth that is typical of this expression becomes more evident. Furthermore, when other expressions are revealed through surprise’s diagnostic orientation bands, the teeth and nasolabial folds—which are not typically associated with surprise—emerge from the picture. Thus, it might be easier to untangle surprise

from other internal representations when an expression is revealed through these oblique-vertical bands, even if this strategy is not well tuned to the available information—as revealed by the model observer.

Our second objective was to provide the first empirical investigation of the link between the utilization of the orientation spectrum and of local facial features. Experiments 2 and 3 were designed with this specific goal in mind. Orientation and location bubbles blocks were interleaved within subjects, such that we could analyze the data from the two tasks using an individual differences approach. We found that individual differences in task performance metrics, contrast sensitivity (Experiment 2) and number of bubbles (Experiment 3), strongly correlated. We also found that individual differences in utilization of horizontal information were best predicted by eye diagnosticity alone. No other feature was associated with these variables—not even the mouth.

At first, this result might perhaps seem surprising, given the importance of the mouth for human observers carrying this task (Blais et al., 2012; Calvo, Fernández-Martín & Nummenmaa 2014). Our location bubbles model observer, however, revealed that the eyes and the mouth convey information in about the same proportions, replicating previous results (Blais et al., 2012). Furthermore, as already mentioned, our orientation bubbles model observer revealed horizontal information to carry the most information for categorizing all the basic facial expressions. Thus, individuals who made better use of horizontal information used a strategy that was *de facto* better aligned with the available information, suggesting that they were in fact more efficient. A possible explanation of our results is thus that this increase in horizontal processing was reflected by an increase in eye processing—the mouth being used by all observers irrespective of horizontal tuning.

More specifically, the mechanism for this could lie in the processing of horizontal information in mid-to-high spatial frequencies. Indeed, recent findings indicate that the horizontal tuning of face processing mechanisms is best supported by this frequency range (Goffaux, van Zon, & Schiltz, 2011). Moreover, a study comparing Gabor filter responses to hundreds of pictures of human faces found that the eyes specifically contain more horizontal energy in these spatial frequencies (Keil, 2009).

Our results, along with those of Pachai and colleagues (2013), have shown that individual ability levels in face identification and expression categorization are well predicted by horizontal tuning. Thus, it could be that the information pertinent to these tasks are processed by a common cerebral region. For instance, recent findings suggest that overlap between face identification and facial expression recognition might occur in regions such as the fusiform gyrus and the functionally defined fusiform face area (FFA; Kanwisher et al., 1997; see also, for review, Duchaine & Yovel, 2015). The FFA was shown to respond equally strongly to emotional and neutral faces (e.g., Winston, Vuilleumier, & Dolan, 2003), and evidence suggests that the FFA responds reliably to the eye region—and also to the mouth region—in faces expressing fear (Smith et al., 2008). Furthermore, the FFA was found to be the only region—among the primary visual cortex and the occipital face area—that responds selectively to the horizontal information of faces (Goffaux et al., 2016). Thus, the FFA could subtend the diagnosticity of horizontal information and of local features, for both facial identity and expressions.

Relatedly, the N170 (see, for review, Eimer, 2011; Rossion, 2014), which is suggested to emerge from FFA activity (Sadeh et al., 2010), also appears to be sensitive to horizontal facial information (Jacques, Schiltz, & Goffaux, 2014). Additionally, this component has been likened to an eye detector (Rousselet, Ince, van Rijsbergen, & Schyns, 2014; Schyns, Jentzsch, Johnson, Schweinberger, &

Gosselin, 2003; Smith, Gosselin, & Schyns, 2004;), and to a diagnostic information integrator for facial expressions (Schyns, Petro, & Smith, 2007). By showing the link between horizontal tuning and eye utilization, our results could potentially help bridge the gap, supporting the notion that these findings might be different sides of a same coin.

CHAPITRE III

ARTICLE 2

Individual differences in face processing ability are correlated with horizontal tuning

Justin Duncan^{1,2}, Jessica Royer^{1,3}, Gabrielle Dugas¹, Caroline Blais¹ et Daniel Fiset¹

1. Département de Psychoéducation et de Psychologie, Université du Québec en Outaouais
2. Département de Psychologie, Université du Québec à Montréal
3. Brain Imaging Centre, Montreal Neurological Institute, McGill University

Article en prépublication à *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*; doi : 10.1037/xhp0000684

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 2

La recherche portant sur les mécanismes impliqués dans le traitement facial a mené les scientifiques à proposer plusieurs modèles théoriques explicatifs. L'hypothèse du traitement holistique (Maurer *et al.*, 2002; Richler *et al.*, 2012; Rossion, 2008; Yin, 1969), par exemple, et son lien avec les différences individuelles en ce qui concerne les aptitudes en reconnaissance faciale (p.ex., DeGutis *et al.*, 2013; Richler *et al.*, 2011), ont longtemps joué un rôle dominant dans le domaine. Plusieurs études suggèrent cependant que le système visuel humain n'utilise qu'une petite partie de l'information disponible afin d'identifier les visages. Dans le domaine de l'image, par exemple, la région des yeux joue un rôle crucial (p.ex., Butler *et al.*, 2010; Gold *et al.*, 2012; Gosselin et Schyns, 2001; Sekuler *et al.*, 2004), celle-ci étant liée aux différences individuelles en reconnaissance faciale (Royer *et al.*, 2018; Tardif *et al.*, 2019). De façon similaire dans le domaine fréquentiel, l'information entre 8-20 cycles par visage joue un rôle important dans le traitement facial (Gaspar *et al.*, 2008; Näsänen, 1999; Royer *et al.*, 2017; Tardif *et al.*, 2017; Willenbockel, *et al.*, 2010a), celle-ci étant principalement concentrée dans les régions englobant les traits faciaux internes (Keil, 2009). Récemment, les orientations spatiales, particulièrement horizontales, ont été impliquées dans plusieurs aspects du traitement facial. Afin de corroborer cette importance, il est pertinent de vérifier que les différences individuelles en reconnaissance faciale puissent, du moins en partie, être expliquées par des différences dans l'utilisation de l'information horizontale. À cet effet, deux études se sont intéressées à cette question et ont observé une association significative (Duncan *et al.*, 2017 [voir Chapitre II]; Pachai *et al.*, 2013a). Or, il émerge une certaine circularité de ces deux études, puisque les différences individuelles ont toutes été mesurées avec les mêmes tâches et stimuli.

Le but de la présente étude était donc une répllication de ces résultats, en mesurant cette fois les deux variables de façon indépendante. Quatre tâches de traitement facial ont été administrées et les résultats ont été analysés avec une approche de différences individuelles afin d'explorer le lien entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et les aptitudes pour le traitement perceptif des visages. De plus, les données de trois autres tâches ont été analysées pour appliquer un contrôle statistique de différents facteurs confondants.

Trente-sept participants âgés de 18 à 40 ans ($M = 25,72$, $S = 5,67$) ont été recrutés à l'Université du Québec en Outaouais. Une analyse de puissance a révélé que cet

échantillon était adéquat pour détecter une corrélation de $r = 0,4$ avec une puissance de 0,8 et une probabilité d'erreur de type 1 de 0,05.

Les participants ont accompli quatre tâches distinctes. Les trois premières tâches étaient des mesures validées de différences individuelles dans le traitement perceptif des visages, en l'occurrence : le Cambridge Face Memory Test + (CFMT+; Duchaine et Nakayama, 2006; Russell *et al.*, 2009), le Cambridge Face Perception Test (CFPT; Duchaine *et al.*, 2007) et la version courte du Glasgow Face Matching Test (GFMT; Burton *et al.*, 2010). La quatrième était une tâche d'identification faciale de dix visages (Willenbockel *et al.*, 2010a) filtrés avec des bulles d'orientation. Un essai débutait par la présentation (500 ms) d'une croix de fixation et celle-ci était suivie d'un visage visible jusqu'à l'émission de la réponse du participant. Les participants ont d'abord complété deux pratiques. Dans la première, des visages non filtrés et non bruités étaient présentés. Les participants devaient réussir un bloc (100 essais) avec 90% de bonnes réponses avant de pouvoir continuer à l'étape suivante; ils répétaient donc cette étape autant de fois que nécessaire ($M = 2$ blocs, $S = 0,97$). Ils complétaient ensuite un bloc (100 essais) avec des visages non filtrés auxquels était ajoutée une proportion de bruit blanc gaussien (ci-dessous) afin de se familiariser avec l'ajout de bruit au signal. Après cette dernière pratique, les participants complétaient six blocs (100 essais chacun) de la tâche expérimentale, dans laquelle étaient présentés des visages filtrés avec les bulles d'orientation, auxquels était ajoutée une proportion de bruit blanc. Dans les blocs avec bruit (pratique et expérience), la difficulté était manipulée afin de maintenir la performance près de 55%. Cela était effectué en ajustant le ratio signal/bruit (SNR) avec QUEST (Watson et Pelli, 1983), qui déterminait la proportion p (comprise entre 0 et 1) de l'image i requise pour atteindre 55% de bonnes réponses. À cela était ajoutée une proportion $1 - p$ de bruit blanc w . Le stimulus final pouvait donc être exprimé en tant que $ip + w(1 - p)$, et le SNR pouvait être exprimé en tant que $p/(1 - p)$.

Afin d'extraire un indice unique de l'aptitude en reconnaissance faciale, les scores individuels aux CFMT+, CFPT et GFMT ont été soumis à une analyse en composantes principales. Puisqu'une seule composante (valeur propre > 1) a été extraite, aucune rotation n'a été effectuée sur la solution. La matrice des composantes révèle que chacune des mesures d'aptitudes avait un poids significatif sur cette composante (CFMT+ = 0,84; CFPT = 0,7; GFMT = 0,47) et donc, que cette dernière capture une aptitude générale pour le traitement facial. Afin de générer des profils individuels d'utilisation des orientations, une analyse d'image de classification (Eckstein et Ahumada, 2002; Gosselin et Schyns, 2004) a été employée. Les orientations ont été traitées comme variable indépendante et la performance a été traitée comme variable dépendante. Spécifiquement, une somme pondérée des masques d'orientation a été calculée en attribuant un poids positif aux orientations présentées lors d'essais réussis et un poids négatif a été attribué aux orientations

présentées lors d'essais échoués. Ces poids étaient les scores de précision standardisés. Il en a résulté n (nombre de participants) vecteurs de classification (un par participant) quantifiant la corrélation entre les orientations spatiales et l'identification faciale. Chaque vecteur a ensuite été standardisé avec les paramètres de l'hypothèse nulle, estimée en simulant 1000 vecteurs avec autant de permutations aléatoires des scores de précision. Les vecteurs standardisés ont ensuite été additionnés et la somme divisée par $\sqrt{n}$. Le seuil statistique ($Z_{crit} = 2.49$, $p < 0,05$; bicaudé) a été établi avec la Stat4CI toolbox (Chauvin *et al.*, 2005).

En moyenne, les participants nécessitaient un SNR de 2,46 ($S = 0,94$; $I_C 95\% = [2,15; 2,78]$) dans la tâche des bulles d'orientation. Bien que ce SNR puisse sembler élevé, la procédure des bulles d'orientation réduit le contraste de l'image et une telle valeur est donc attendue. De façon importante, il n'y avait pas d'effet plancher et tous les participants pouvaient effectuer cette tâche avec une du bruit blanc. Au niveau du groupe, l'information autour de l'axe horizontal corrélait significativement et positivement avec l'identification faciale ($Z_{max} = 15,07$, $p < 0,001$), alors que l'information oblique et verticale corrélait négativement avec l'identification faciale ($Z_{min} = -7,48$, $p < 0,001$). Afin d'obtenir un indice d'utilisation sélective de l'information horizontale, une distribution Von Mises centrée sur l'axe horizontal avec somme égale à 1 et largeur à mi-hauteur égale à 42 degrés a été appliquée aux vecteurs de classification individuels. Cette largeur de distribution a été choisie, car elle était la mieux ajustée pour décrire la courbe des données. Une corrélation négative significative entre l'utilisation sélective des horizontales et le SNR a été observée, $r = -0,59$ ($r_{\text{Spearman}} = -0,59$), $I_C 95\% = [-0,75, -0,35]$, $p < 0,001$. Ainsi, les meilleurs dans cette tâche d'identification, c.-à-d. ceux requérant le moins de signal et tolérant mieux le bruit, étaient également ceux qui utilisaient le plus sélectivement l'information horizontale. De plus, ceux qui étaient les meilleurs dans la tâche de bulles d'orientation avaient également les plus hauts niveaux d'aptitudes pour le traitement facial, $r = 0,65$ ($r_{\text{Spearman}} = -0,56$), $I_C 95\% = [-0,79, -0,43]$, $p < 0,001$. Enfin, une corrélation significative a été observée entre la sélectivité pour les horizontales et les aptitudes pour le traitement facial, $r = 0,41$ ($r_{\text{Spearman}} = 0,37$), $I_C 95\% = [0,11, 0,63]$, $p < 0,05$. La corrélation partielle ($r_{\text{Partiel}} = 0,39$, $I_C 95\% = [0,08, 0,64]$, $p < 0,05$) a aussi été mesurée pour trente-cinq participants en ajoutant quatre covariables : l'utilisation sélective des horizontales pour les voitures, la sensibilité à des grilles sinusoïdales horizontales, aptitude en reconnaissance de chevaux et aptitude en reconnaissance de voitures. Ainsi, ceux qui avaient les meilleures aptitudes pour le traitement facial étaient ceux qui utilisaient le plus sélectivement l'information faciale horizontale.

Ces résultats renforcent la notion selon laquelle l'information horizontale joue un rôle central dans la perception faciale en démontrant que ceux avec les meilleures aptitudes sont ceux qui utilisent le plus sélectivement l'information horizontale

diagnostique. Ainsi, la sélectivité pour les horizontales expliquait près de 17% de la variance observée dans les aptitudes en traitement perceptif des visages. Ce résultat est important, car des observations similaires ont été effectuées en ce qui concerne le traitement de la région des yeux (Royer *et al.*, 2018), la sélectivité pour les visages du gyrus fusiforme (Furl *et al.*, 2011) et la latence de la N170 (Herzmann *et al.*, 2010). De façon intéressante, le traitement des yeux a été lié au traitement sélectif de l'information horizontale (Duncan *et al.*, 2017 [Chapitre II]) et des données suggèrent que la sélectivité pour les visages du gyrus fusiforme (Goffaux *et al.*, 2016) et de la N170 (Hashemi *et al.*, 2018; Jacques *et al.*, 2014) soit dépendante de l'information horizontale. Dans ce contexte, les résultats de la présente étude suggèrent que ces différentes associations avec l'aptitude pour le traitement perceptif des visages puissent en fait être retracées à l'information faciale horizontale de bas niveau. Ces données s'intègrent aussi harmonieusement au corps de données qui tend à démontrer que plusieurs aspects du traitement perceptif des visages sont en fait supportés par une partie limitée de l'information faciale disponible.

ABSTRACT

In recent years, horizontal spatial information has received attention for its role in face perception. One study, for instance, has reported an association between horizontal tuning for faces and face identification ability measured within the same task. A possible consequence of this is that the correlation could have been overestimated. In the present study, we wished to reexamine this question. We first measured face processing ability on the Cambridge Face Memory Test +, the Cambridge Face Perception Test, and the Glasgow Face Matching test. A single ability score was extracted using a principal components analysis. In a separate task, participants also completed an identification task in which faces were randomly filtered on a trial basis using orientation bubbles. This task allowed the extraction of individual orientation profiles and horizontal tuning scores for faces. We then measured the association between horizontal tuning for faces and the face processing ability score, and observed a significant positive correlation. Importantly, this relation could not be accounted for by other factors such as object processing ability, horizontal tuning for cars, or greater sensitivity to horizontal gratings. Our data give further credence to the hypothesis that horizontal facial structure plays a crucial role in face processing.

Keywords: Bubbles; Face perception; Psychophysics; Orientation

REVISITING THE LINK BETWEEN HORIZONTAL TUNING AND FACE PROCESSING ABILITY WITH INDEPENDENT MEASURES

3.1 Introduction

A variety of theories have been proposed to explain how the visual system makes sense of the face stimulus. Holistic processing (e.g. Maurer, Grand & Mondloch, 2002; Richler, Palmeri, & Gauthier, 2012; Rossion, 2008) and its link with individual differences in face processing skills (e.g., DeGutis, Wilmer, Mercado, & Cohan, 2013; Richler, Cheung, & Gauthier, 2011), for example, has been a primary focus of much of the past decades.

However, many studies suggest that humans rely on a restrained subset of the available information to recognize faces. In the image domain, experiments have shown that face recognition is largely driven by the eyes (Butler et al., 2010; Gold, Mundy, & Tjan, 2012; Gosselin & Schyns, 2001; Sekuler et al., 2004), and that differences in face processing ability are linked with utilization of this feature (Royer et al., 2018; Tardif et al., 2019). In the spatial frequency domain, face identification has been shown to rest on a band of approximately 8-20 cycles per face (Gaspar, Sekuler, & Bennett, 2008; Näsänen, 1999; Royer et al., 2017; Tardif et al., 2017; Willenbockel et al., 2010) largely associated with internal facial features (Keil, 2009).

Recently, spatial orientations have garnered attention for the role horizontal information appears to play in various aspects of face processing, such as detection (Balas, Schmidt & Saville, 2015), identification (Dakin & Watt, 2009; Goffaux &

Dakin, 2010; Goffaux, Duecker, Hausfeld, Schiltz & Goebel, 2016; Goffaux & Greenwood, 2016; Goffaux, Poncin & Schiltz, 2015; Pachai, Sekuler, Bennett, Schyns & Ramon, 2017) and emotional facial expression recognition (Balas & Huynh, 2015; Balas, Huynh, Saville & Schmidt, 2015; Duncan et al., 2017; Huynh & Balas, 2014; Yu, Chai, & Chung, 2018). Horizontal information also supports behavioral signatures of face processing specialization, such as the face inversion effect (Goffaux & Dakin, 2010; Goffaux & Greenwood, 2016; Pachai, Sekuler & Bennett, 2013). Interestingly, this information is object-based, and a 90° image rotation will induce a shift toward the vertical image—i.e., horizontal facial—structure (Huynh & Balas, 2014). This is in line with recent evidence suggesting that orientation tuning for faces is in fact flexible and depends on task demands (Goffaux, 2019).

If horizontal facial information is linked to recognition, then we should observe an association between face processing ability and use of this information. As it stands, one study has addressed the question (Pachai et al., 2013; see also, for facial expressions, Duncan et al., 2017). However, face processing ability and horizontal tuning for faces were not measured independently. Indeed, participants completed an identification task in which orientation-filtered (eight bands) or unfiltered (white) noise was added to stimuli, and a noise masking threshold was calculated separately for each noise condition. Individual horizontal tuning scores were then extracted by calculating the slope of the regression lines separating the horizontal and vertical noise masking thresholds, and identification ability was taken as the white noise masking threshold. A moderate correlation was observed between these measures, meaning that participants who performed better in the white noise condition used horizontal information more selectively. Though these results are important, one cannot help but notice the potential for circularity. Indeed, subjects who make the best use of diagnostic information in a task will also perform better in this very same

task, and there will be more overlap in variance if diagnostic information utilization and ability are measured using the same task than if they are measured using different tasks. For this reason, it is possible that the correlation observed by Pachai and colleagues is somewhat inflated (the argument also applies to the study of Duncan et al., 2017), and it is of great theoretical importance to verify that this link generalizes across other face processing tasks.

We therefore administered four face processing tasks in this study. Three were validated measures of individual differences in face processing, from which we extracted a single ability score. The fourth task was designed to measure individual orientation profiles and horizontal tuning for faces using orientation bubbles. The link between horizontal tuning for faces and face processing ability was then verified. Two measures of object processing, and one measure of low-level image processing, were also included (see Supplemental Materials; Results and Discussion) in a partial correlation analysis to serve as control measures.

3.2 Methods

3.2.1 Participants

Thirty-seven subjects aged between 18 and 40 ($M = 25.72$ yo, $SD = 5.67$) were recruited at the Université du Québec en Outaouais to complete a battery of tests (below; see also Supplemental Materials). Some of these were outside the scope of the present paper and the results are thus not reported here. A power analysis using G-power (Faul, Erdfelder, Buchner & Lang, 2009) revealed that this study was adequately powered to detect a correlation of $r = 0.4$ with a power of 0.8 and type 1 error probability of 0.05. Compared to previous results, this value was more conservative to account for the fact that we measured horizontal tuning for faces and

face processing ability independently, and also because it was closer to other results (Royer et al., 2018). All participants had normal or corrected-to-normal vision and received financial compensation for their participation. This experiment was conducted in accordance with the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki) and received approval from the university's research ethics committee.

3.2.2 Apparatus

The experiments were conducted on MacMini computers. Stimuli were displayed on a 24-in BenQ LCD monitor with 1920×1080 resolution and evenly distributed luminance levels. Participants sat in a dark room and a chin rest was used to maintain a 69 cm viewing distance.

3.2.3 Face processing ability

Three tasks were completed: the Cambridge Face Memory Test + (CFMT+; Duchaine & Nakayama, 2006; Russell, Duchaine, & Nakayama, 2009), the Cambridge Face Perception Test (CFPT; Duchaine, Germine, & Nakayama, 2007), and the Glasgow Face Matching Test—Short Version (GFMT; Burton, White, & McNeil, 2010). Cambridge tests were programmed in Java, the GFMT in Matlab.

3.2.4 Orientation Bubbles Task

The images portrayed ten individual faces (half female) displaying a neutral expression (Willenbockel, Fiset, et al., 2010). Luminance histograms and spatial

frequency spectra were equalized with SHINE (Willenbockel, Sadr, et al., 2010) to reduce low-level inter-stimuli variance. The images were downsampled to 512×512 pixels (7°), and an oval that blended with the gray monitor background (66.33 cd/m^2) was applied in order to hide the facial contour and external features (Figure 1a). Faces were spatially aligned on the positions of the eyes, nose, and mouth, using translation, rotation, and scaling.

To create an orientation-*bubblized* stimulus, a base image (Figure 1a) was first submitted to the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm and its quadrants were shifted to reveal its orientation content (Figure 1b). An orientation sampling vector was then created by summing ten pairs of symmetrical Von Mises orientation samples, or orientation bubbles (Figure 1c). This circular distribution ranges from -180° to $+180^\circ$ and has two parameters, μ (peak) and κ (width, equal to 92.9, or about 14° [Goffaux & Dakin, 2010]). One bubble consisted of two Von Mises, one with parameter μ_i , and the other with parameter $\mu_i + 180^\circ$. The μ_i parameters (i equal 1 to 10) were randomly drawn with replacement from a rectangular distribution of orientations.

An orientation sampling matrix (Figure 1d) of dimension 512×512 pixels was created by applying the orientation sampling vector to an orientation matrix equal to $\tan^{-1}([y - 255]/[x - 255])$, where y and x correspond to the columns and rows of the matrix. Sampling proportion ranged from 0 to 1. The orientation sampling matrix was then applied to the image orientation content, producing an orientation-*bubblized* Fourier spectrum, and the product was brought back to the image domain with the inverse FFT (Figure 1e).

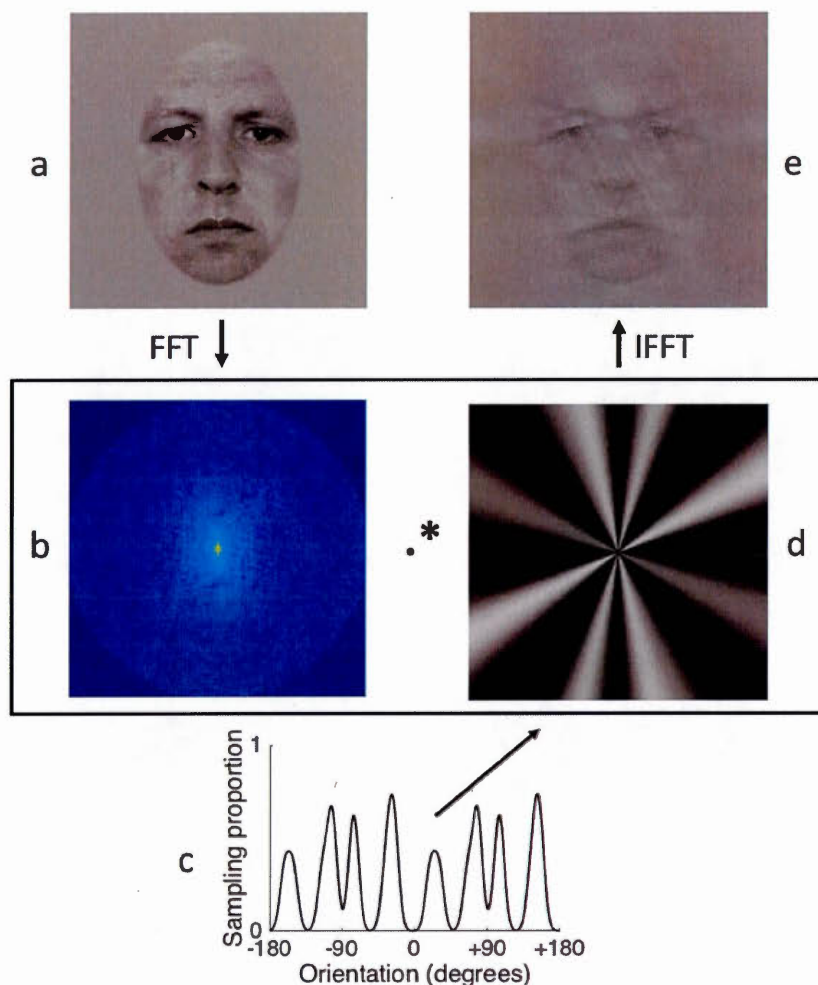


Figure 3.1. Orientation bubbles procedure. See text for description. The face shown is that of author D.F.

The task consisted of a 10 AFC identification procedure sequenced into blocks of 100 trials each, and was programmed in Matlab using custom code and the psychophysics toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). A trial began with a central fixation cross that was displayed for 500 ms. Then, a stimulus appeared in the center of the monitor and remained visible until a response was entered, using one of ten preallocated keys on the computer keyboard (i.e., one per identity).

Participants first performed two practice versions of this task: noiseless broadband, and noisy broadband. In the noiseless practice, participants completed as many blocks as needed to achieve 90% correct responses ($M = 2$ blocks, $SD = 0.97$). Then, participants completed one noisy practice block in which white noise was added to each face stimulus. This was done so that participants could familiarize themselves with the noisy aspect of stimuli.

Finally, participants completed six experimental blocks with orientation-*bubblized* stimuli to which white noise was added. In both the noisy practice and experimental task, difficulty was manipulated on a trial basis so that approximately 55% correct responses (halfway between floor [10%] and ceiling [100%]) were maintained. Specifically, we used QUEST (Watson & Pelli, 1983) to determine the proportion p , comprised between 0 and 1, of the broadband (noisy practice) or orientation-*bubblized* (experiment) image i that was needed. To this, a proportion $1 - p$ of white noise w was added. Thus, the final stimulus can be expressed as $ip + w(1 - p)$, and its signal to noise ratio (SNR) can be expressed as $p/(1 - p)$.

3.3 Results and Discussion

Participants needed an average SNR of 2.46 ($SD = 0.94$; $CI\ 95\% = [2.15, 2.78]$) to maintain near 55% correct responses in the orientation bubbles task; there was no floor effect and all could perform the task with some noise. It must be stated that orientation bubbles reduce the image RMS contrast (see Figure 1a, e). For example, the maximum possible image RMS contrast (when $p = 1$) was approximately 0.022 (compared to the base image RMS contrast of approximately 0.072); in contrast, the maximum possible noise RMS contrast (when $p = 0$) was 0.22.

To extract orientation profiles, we carried out a classification image analysis (Eckstein & Ahumada, 2002; Gosselin & Schyns, 2004), analogous to a multiple linear regression of orientation bubbles on response accuracy. For each subject, a weighted sum of orientation sampling vectors was calculated, attributing positive/negative weights (standardized accuracies) to filters that led to correct/incorrect responses, respectively. The procedure generated n (sample size) vectors of regression coefficients (i.e., classification vectors) quantifying the association between orientations and face recognition accuracy. These were standardized using the mean and standard deviation of the null hypothesis, the parameters of which were estimated by simulating 1,000 classification vectors with as many random permutations of accuracies.

A group classification vector was then generated by summing individual vectors and dividing the outcome by $\sqrt{n}$. A pixel test (Chauvin, Worsley, Schyns, Arguin, & Gosselin, 2005) was applied to determine the statistical significance threshold ($Z_{crit} = 2.49$, $p < 0.05$; two-tailed). Figure 2 shows that, at the group level, information around the horizontal axis was positively correlated with face identification ($Z_{max} = 15.07$), whereas oblique and vertical orientations were negatively correlated ($Z_{min} = -7.48$), both $ps < 0.001$.

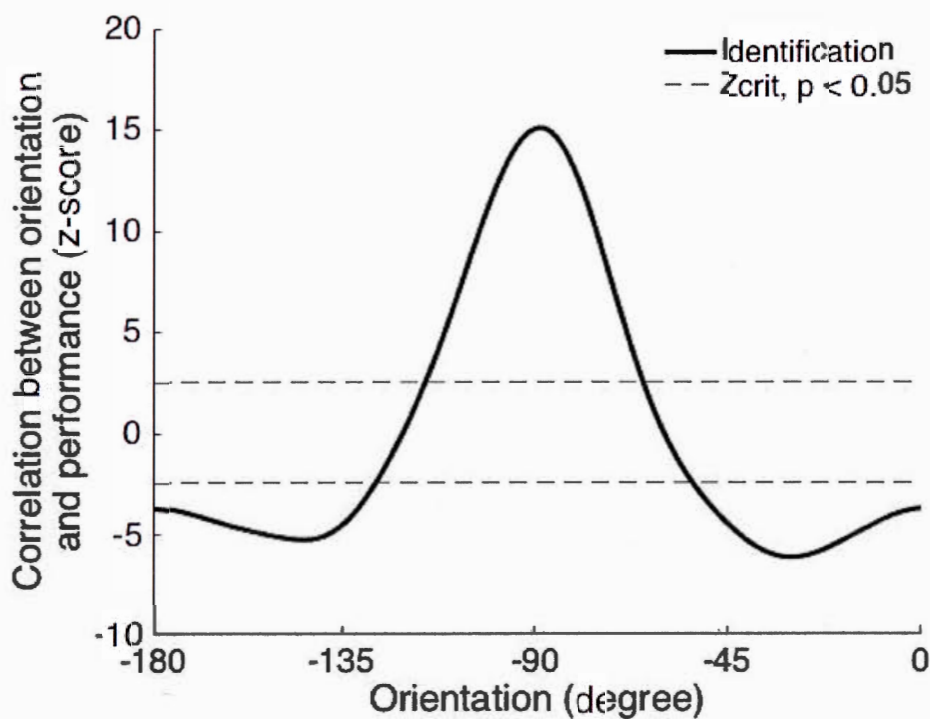


Figure 3.2. Classification vector from the orientation bubbles task. Illustrates the correlation (z-score) between orientations and accuracy for face identification. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold.

We then proceeded to verify the correlation between face identification ability and utilization of horizontal facial information. To generate the latter measure, we applied a 1D Von Mises distribution (sum equal to 1, FWHM equal to 42° [the value best fitted to the data, and similar to Pachai et al., 2018]) on the -90° horizontal axis of standardized individual classification vectors. The sum of a resulting product vector then represents a weighted average of horizontal information utilization for a single subject and can be taken as an approximation of horizontal tuning—with maximum weight given to coefficients square on the horizontal axis, and a gradually decreasing weight given to coefficients as they fell farther away from this axis.

Horizontal tuning was negatively correlated with SNR thresholds (Figure 3), r_{SNR} , $r_{\text{Tuning}} = -0.59$ ($r_{\text{Spearman}} = -0.59$), $CI\ 95\% = [-0.75, -0.35]$, $p < 0.001$. Thus, participants who relied more selectively on horizontal facial information required less signal in the orientation bubbles task. This echoes the results of Pachai and colleagues (2013).

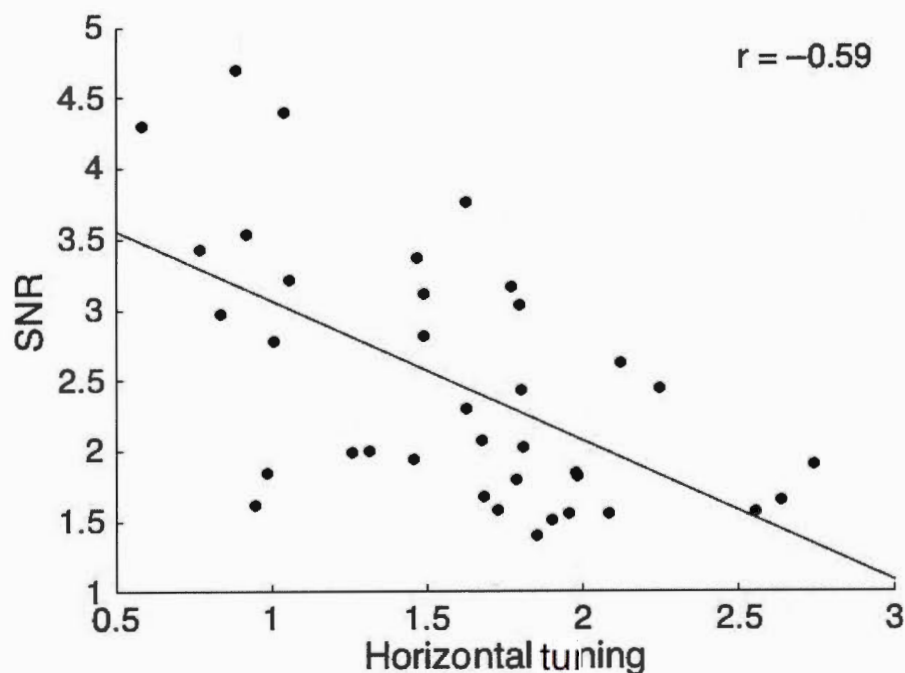


Figure 3.3. Scatterplot of the correlation between horizontal tuning and signal to noise ratio (SNR), $r = -0.59$, $p < 0.001$.

To verify the generalization of this relationship to other tasks, we first extracted a single measure of face processing ability using the same procedure as in Royer and colleagues (2015; 2018), i.e., submitting CFMT+, CFPT, and GFMT scores to a principal components analysis of the correlation matrix. The solution produced one

component with eigenvalue > 1 . Factor loadings confirm that this component captures variance from each face processing task (CFMT+ = 0.84; CFPT = 0.7; GFMT = 0.47). Scores on this component correlated with SNR, $r_{\text{SNR, Ability}} = -0.65$ ($r_{\text{Spearman}} = -0.56$), $p < 0.001$, CI 95% = $[-0.79, -0.43]$, indicating that the bubbles task successfully captured individual differences in face processing ability.

Critically, face processing ability correlated with horizontal tuning for faces (Figure 4), $r_{\text{Ability, Tuning}} = 0.41$ ($r_{\text{Spearman}} = 0.37$), $p < 0.05$, CI 95% = $[0.11, 0.63]$. Using Lee and Preacher's (2013; Seiger, 1980) web app for dependent correlations, we tested the difference between $r_{\text{Tuning, Ability}}$ and $r_{\text{Tuning, SNR}}$, and found it to be nonsignificant, $z = -1.51$, $p > 0.05$. Applying Fisher's transformation and a z-test, we also compared $r_{\text{Tuning, Ability}}$ with the results of Pachai et al. ($r = 0.52$, $n = 32$), and found a nonsignificant difference, $z = -0.56$, $p > 0.05$.

Interestingly, $r_{\text{Tuning, Ability}}$ remained almost unchanged ($z = 0.1$, $p > 0.05$) after controlling for factors such as object recognition ability, horizontal tuning for cars (Figure S1), and sensitivity to horizontal gratings (see, for details, Supplemental Materials), $r_{\text{Partial}} = 0.39$, 95% CI = $[0.08, 0.64]$, $p < 0.05$. This is in line with previous results suggesting that the horizontal tuning observed in face recognition is task-specific (Goffaux, 2019; Huynh & Balas, 2014), as the correlation between processing ability and horizontal tuning for faces is not predicated upon an overall better use of horizontal image structure. Thus, it may be that face recognition expertise begets selectivity to horizontal facial structure (see also Pachai et al., 2017), which would then be reflected in the more systematic deployment of the optimal (horizontally-tuned) processing strategy (Royer et al., 2018).

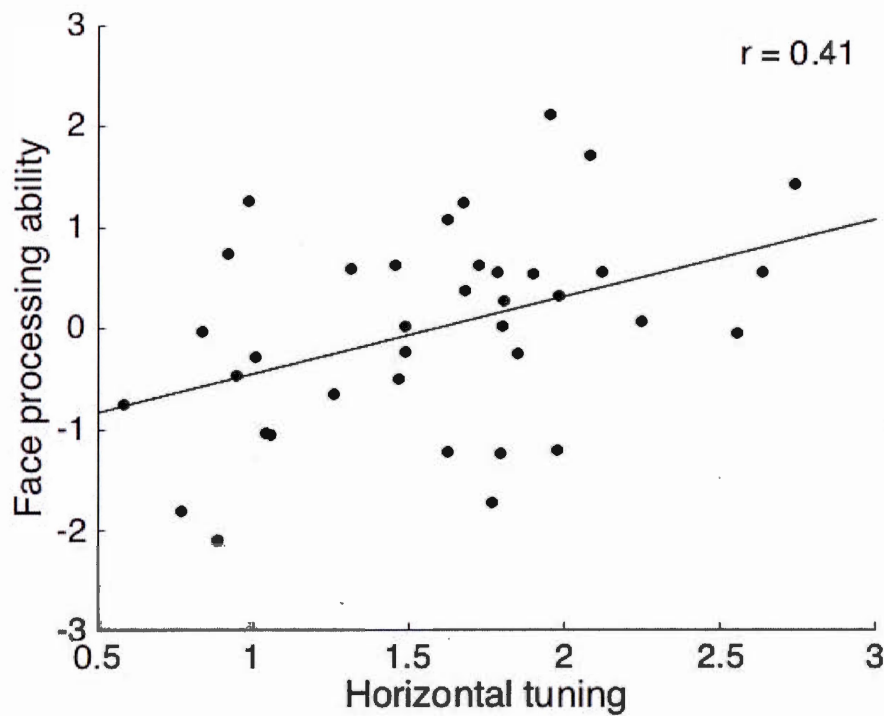


Figure 3.4. Scatterplot of the correlation between horizontal tuning and the face processing ability score, $r = 0.41$, $p < 0.05$.

Results similar to ours were obtained by correlating face processing ability with utilization of the eyes (Royer et al., 2018), face selectivity of the fusiform gyrus (Furl, Garrido, Dolan, Driver, & Duchaine, 2011), and N170 latency (Herzmann, Kunina, Sommer, & Wilhelm, 2010). Interestingly, there is evidence to suggest that the fusiform face area and the N170 are both tuned to the eyes (Ghuman et al., 2014; Smith, Gosselin, & Schyns, 2004), and to horizontal facial information (Goffaux et al., 2016; Hashemi et al., 2018; Jacques, Schiltz, & Goffaux, 2014); and also that processing of horizontal facial structure is best predicted by utilization of the eyes (Duncan et al., 2017). Thus, it may be that reliance on horizontal facial information is the process binding these various associations with face processing ability.

3.4 Conclusion

Our results reinforce the case for the fundamental role of horizontal spatial orientations in face recognition by showing that the best face recognizers in three well validated measures of individual differences in face processing ability were more selectively tuned to this diagnostic information, and that this association is likely task-specific.

SUPPLEMENTAL MATERIALS

As mentioned in the Methods section of the main text, participants were involved in a battery of tests on a variety of topics. Among these were tasks irrelevant to the present context, such as racism scales, perception of painful expressions, personality questionnaires, etc. Some tasks on the other hand were pertinent to the present experiment as the basis for statistical control of other processing abilities (below). Unfortunately however, because not all subjects completed all tasks, the following analyses could only be carried for 35 out of 37 participants.

3.S.1 Sensitivity to horizontal gratings

Among the battery of tests was a gratings detection task (600 trials), consisting in the presentation of two stimuli, on either side of a central fixation cross, that remained visible until participants entered a response. One stimulus was the target (a horizontal [300 trials] or vertical [300 trials] grating filtered with orientation bubbles and embedded in white noise) while the other was a distractor (white noise only), and participants indicated which stimulus contained the target. In order to maintain a performance of 75% correct responses within orientation, the signal-to-noise ratio (SNR) was modulated independently for horizontal and vertical gratings using QUEST (Watson & Pelli, 1983), which determined the proportion p , comprised between 0 and 1, of the target grating i needed to maintain the target performance. To this, a proportion of white noise w was added. Thus, the target can be expressed as $ip + w(1 - p)$, and SNR can be expressed as $p/(1 - p)$. Both the target and the distractor noise had equal energy. Participants were adequately prepared for this task by first completing noiseless and noisy practice blocks of the task.

3.S.2 Object processing and horizontal tuning for cars

Object processing tasks were a car recognition task with horizontal bubbles, and the Horse Memory Test (HMT; Duchaine & Nakayama, 2005).

The car recognition task was a 2ABX match-to-sample (600 trials total), consisting in the presentation of a noiseless unfiltered cue car (500 ms), followed by a white noise mask (100 ms), and then followed by a pair (target + distractor) of noisy orientation-filtered stimuli that remained visible until a response was entered. Both the target and distractor were filtered with the exact same orientation bubbles filter. In order to maintain a performance of 75% correct responses, the signal-to-noise ratio (SNR) was modulated using QUEST (Watson & Pelli, 1983), which determined the proportion p , comprised between 0 and 1, of the target/distractor i needed to maintain the target performance. To this, a proportion of white noise w was added. Thus, the target/distractor can be expressed as $ip + w(1 - p)$, and SNR can be expressed as $p/(1 - p)$. Participants were adequately prepared for this task by first completing noiseless and noisy practice blocks of the task.

3.S.3 Analyses and Results

For the gratings detection task, we extracted the SNR for horizontal grating trials, averaged over the last 50 trials ($M = 3.33$, $SD = 1.65$). For the Horse Memory Test, the variable of interest was percent correct responses ($M = 86.8\%$, $SD = 9.2\%$). For the car recognition task, SNR data and orientation bubbles were analyzed; the former was averaged over the last 100 trials ($M = 3.03$; $SD = 0.35$), and the latter was analyzed using the same classification image procedures as the one outlined in the main text. At the group level, horizontal information positively correlated with car recognition ($Z_{max} = 12.78$, $p < 0.001$; see Figure 2.S1). For this reason, we extracted

horizontal tuning scores for cars using the same procedure as for horizontal tuning scores for faces, but with a FWHM = 37 degrees, as this distribution width was best fitted to the group data for cars.

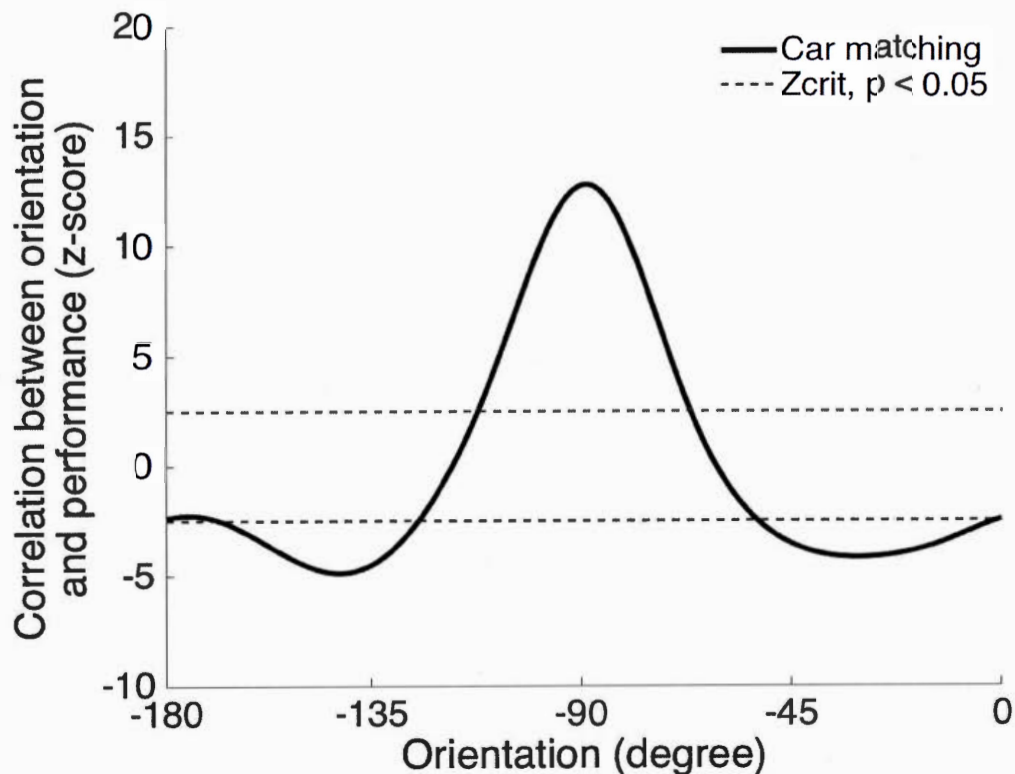


Figure 3.S.1. Group classification vector from the orientation bubbles car matching task. Illustrates the correlation (z-score) between orientations and accuracy for car recognition. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold.

We then proceeded to re-test the correlation between face processing ability and horizontal tuning for faces, this time controlling for the possible confounding effects of horizontal tuning for objects ($\text{Tuning}_{\text{Cars}}$), sensitivity to horizontal gratings ($\text{SNR}_{\text{Gratings}}$), and object processing ability ($\text{HMT}_{\% \text{Correct}}$, SNR_{Cars}). The correlation was almost unchanged, $r_{\text{Partial}} = 0.39$, 95% CI = [0.08, 0.64], $p < 0.05$.

CHAPITRE IV

ARTICLE 3

Horizontal tuning of the right hemisphere for face processing

Justin Duncan^{1,2}, Caroline, Blais¹, Guillaume Lalonde-Beaudoin¹, et Daniel Fiset¹

¹Université du Québec en Outaouais

²Université du Québec à Montréal

Article en révision à *Perception*

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE 3

L'idée selon laquelle on retrouve certaines personnalités de type « cerveau droit analytique » ou « cerveau gauche créative » a depuis longtemps été invalidée par les scientifiques (p.ex., Nielsen *et al.*, 2013). N'empêche, certains processus cognitifs sont caractérisés par une asymétrie cérébrale. La perception faciale en est un important exemple. Ainsi, plusieurs études sur des patients cérébrolésés (Barton, 2008a; Bodamer, 1947; Della Sala et Young, 2003; De Renzi et Pellegrino, 1998; Ellis et Florence, 1990; Landis *et al.*, 1986; Pancaroglu *et al.*, 2016; Quaglino et Borelli, 1867; voir aussi, pour une revue, Mayer et Rossion, 2007) ainsi qu'en neuroimagerie (Bentin *et al.*, 1996; Kanwisher *et al.*, 1997; Rossion *et al.*, 2012; Sergent *et al.*, 1992; Yovel *et al.*, 2003) ont permis d'établir le rôle prépondérant de l'hémisphère cérébral droit dans le traitement facial. Cette asymétrie peut également être observée sur le plan comportemental grâce à la séparation du champ visuel suivant une ligne verticale traversant la fovéa (Shillcock *et al.*, 2000) et la décussation des fibres nerveuses du système visuel. Ainsi, une image présentée au champ visuel gauche sera initialement traitée dans l'hémisphère cérébral droit et vice versa. La présentation latéralisée de visages nous permet d'observer l'effet de supériorité du champ visuel gauche, qui réfère à ce que les visages présentés à l'hémichamp visuel gauche sont traités plus efficacement, comparativement à l'hémichamp visuel droit (voir, pour des revues, Rhodes, 1985; Sergent et Bindra, 1981). Certaines données suggèrent aussi qu'il existe des différences qualitatives entre les hémisphères. En effet, des données ont lié l'hémisphère droit au traitement préférentiel de visages complets et l'hémisphère gauche au traitement préférentiel des traits faciaux (Rossion *et al.*, 2000), suggérant l'application d'une stratégie globale ou holistique dans l'hémisphère droit et une stratégie plutôt locale dans l'hémisphère gauche. Corroborant cette hypothèse, plusieurs études ont établi un lien entre l'hémisphère droit et les basses fréquences spatiales, et entre l'hémisphère gauche et les hautes fréquences spatiales (Keenan *et al.* 1989; Sergent, 1985). Considérant le lien entre l'information horizontale et le traitement facial, l'objectif du présent article était de vérifier le traitement des orientations spatiales dans les deux hémisphères cérébraux à l'aide d'un paradigme de présentation latéralisée.

Deux études empiriques ont été réalisées. La première étude visait à établir un profil-référence de l'utilisation des orientations spatiale. La seconde étude visait à répondre à l'objectif susmentionné en soumettant les participants à un paradigme de présentation latéralisée de visages.

La première étude avait pour but d'établir un profil d'utilisation des orientations spatiales dans une tâche de reconnaissance faciale avec la méthode des bulles d'orientation. Il était attendu que la probabilité de reconnaître un visage serait plus élevée lorsque l'information horizontale était révélée que lorsqu'elle était cachée.

Trente-sept participants âgés entre 18 et 33 ans ont été recrutés à l'Université du Québec en Outaouais afin d'accomplir les deux tâches de la présente expérience. La préférence manuelle a été établie à l'aide de l'Inventaire de Latéralité manuelle d'Édinbourg (Oldfield, 1971). Quatre ont été exclus, car ils ne satisfaisaient pas au critère d'inclusion (quotient de latéralité ≥ 60). Trois participants se sont aussi retirés du protocole durant l'expérimentation. Ainsi, l'échantillon final comportait trente participants (81,25% étaient des femmes) dont la moyenne d'âge était 20,38 ans ($S = 2,85$ ans). Le quotient de latéralité manuelle moyen était 86,71 ($S = 14,59$). Une analyse de puissance a révélé qu'un échantillon de vingt-sept serait nécessaire pour détecter un effet de taille moyenne de 0,5, avec une puissance de 0,8 et une probabilité d'erreur de type 1 de 0,05. Le présent échantillon était donc suffisamment puissant.

La première tâche complétée par les participants était une tâche d'identification comprenant cinq blocs de cent essais chacun. Ils disposaient d'abord de 20 minutes pour apprendre les visages et complétaient ensuite une séquence de blocs (cent essais par bloc) de pratique. L'objectif des pratiques était de s'assurer de la bonne connaissance des visages et habituer le participant à traiter très rapidement l'information visuelle, qui ne serait présentée que pendant 60 ms dans les deux tâches expérimentales. Durant la pratique, la durée de présentation était constante à l'intérieur d'un bloc, mais diminuait d'un bloc à l'autre passant de 1 000 ms à 500 ms, 250 ms, 120 ms et finalement, 60 ms. Chaque fois qu'un participant réussissait une pratique avec au moins 92% de bonnes réponses, la durée de présentation était réduite. Une fois la pratique à 60 ms réussie, le participant poursuivait avec la version expérimentale de la tâche. Dans celle-ci, les visages étaient filtrés avec un nombre de bulles d'orientation déterminé avec l'algorithme QUEST (Watson et Pelli, 1983), afin que les participants maintiennent une performance approximative de 55% de bonnes réponses.

Afin de révéler les orientations corrélant avec l'identification faciale, une technique d'analyse d'images de classification (Eckstein et Ahumada, 2002; Gosselin et Schyns, 2004) analogue à une procédure de régression linéaire multiple a été utilisée. Les orientations ont été traitées comme variable indépendante et la performance a été traitée comme variable dépendante. Une somme pondérée des masques d'orientation a été calculée en attribuant un poids positif aux orientations présentées lors d'essais réussis et un poids négatif aux orientations présentées lors d'essais échoués. Ces poids étaient les scores de précision standardisés. Il en a résulté n (égal au nombre de participants) vecteurs de classification. Chacun a ensuite été standardisé avec les

paramètres de l'hypothèse nulle, estimée en simulant 100 vecteurs avec autant de permutations aléatoires des scores de précision. Les vecteurs standardisés ont ensuite été additionnés et la somme divisée par $\sqrt{n}$. Le seuil statistique ($Z_{crit} = 2.101$, $p < 0,05$; bicaudé) a été établi avec la Stat4CI toolbox (Chauvin *et al.*, 2005).

En moyenne, les participants avaient besoin de 42.28 ($S = 24.11$, $I_C 95\% = [33.28, 51.29]$) bulles pour effectuer cette tâche. Les analyses ont révélé une corrélation positive entre l'information autour de l'axe horizontal et la performance ($Z_{max} = 3.382$, $p < 0,005$) et une corrélation négative entre l'information autour de l'axe vertical et la performance ($Z_{min} = -3.585$, $p < 0,005$). Ainsi, l'information horizontale augmente la probabilité d'une bonne réponse, alors que l'information verticale réduit cette probabilité.

La seconde tâche complétée par les participants était une tâche comprenant quinze blocs de quarante essais chacun. Dans celle-ci, inspirée des travaux de Yovel *et al.* (2003), les participants visionnaient une séquence de deux visages (sonde et cible) et devaient indiquer s'il s'agissait des mêmes individus (50% des essais) ou non. Ici aussi, les participants complétaient d'abord une pratique dans laquelle ils devaient réussir 92% des essais pour poursuivre avec la tâche expérimentale. Un essai débutait avec un délai de 1 000 ms durant lequel l'écran demeurait vierge. Ensuite, la sonde (60 ms) était présentée puis immédiatement suivie d'un masque de bruit blanc gaussien (250 ms). Suivant un intervalle inter stimuli de 1 200 ms, la cible était affichée (360 ms) et les participants pouvaient entrer leur réponse. Dans la version expérimentale, la cible était filtrée avec un nombre de bulles d'orientation et, à l'insu du participant, seule la moitié gauche ou droite de la sonde véhiculait de l'information, alors que la moitié complémentaire était occupée par un visage moyen. Afin de s'assurer que le participant regardait bien au centre du visage, des mesures des fixations oculaires ont été collectées tout au long de cette expérience à l'aide du EyeLink 1000 (SR-Research, Ottawa, Ontario). Le nombre de bulles était déterminé par QUEST afin de maintenir 75% de bonnes réponses à travers les deux champs visuels combinés.

Afin de révéler les orientations corrélant avec l'identification faciale, l'analyse d'images de classification décrite plus haut a été employée, à l'exception que des vecteurs de classification ont été créés séparément pour chaque champ visuel.

En moyenne, les participants avaient besoin de 44,57 bulles ($S = 15$) pour accomplir cette tâche. La performance moyenne était de 80,97% ($S = 5,58\%$) de bonnes réponses dans le champ visuel gauche et 73,47% ($S = 5,05\%$) dans le champ visuel droit. La différence entre les deux champs visuels était significative, $t(29) = 5,13$, $p < 0,001$, $d = 0,94$. Les temps de réponse médians étaient de 756,2 ms ($S = 179,4$ ms) dans le champ visuel gauche et de 772,2 ms ($S = 176,1$ ms) dans le champ visuel

droit. La différence entre les deux champs visuels était significative, $t(29) = 2,33, p < 0,05, d = 0,43$. Ces résultats reproduisent donc l'effet de supériorité du champ visuel gauche dans le traitement des visages. Les vecteurs de classification révèlent que l'information autour de l'axe horizontal corrèle positivement avec la performance ($Z_{max} = 3,454, p < 0,001$) dans le champ visuel gauche, alors que l'information autour de l'axe vertical corrèle négativement avec la performance ($Z_{min} = -2,517, p < 0,05$). Dans le champ visuel droit, on observe une corrélation négative marginale entre l'information autour de l'axe horizontal et la performance ($Z_{min} = -1,924, p < 0,1$). De façon intéressante, les vecteurs de classification des deux champs visuels sont négativement corrélés et la différence entre les deux vecteurs est significative autour des axes horizontal ($Z_{max} = 3,756, p < 0,001$) et vertical ($Z_{min} = -2,852, p < 0,01$). La sélectivité pour les orientations horizontale et verticale des deux hémisphères a également été comparée avec deux tests t pour échantillons appariés. Ceux-ci ont révélé que le champ visuel gauche ($M = 0,361, S = 0,68$) est significativement plus sélectif pour l'information horizontale que ne l'est le champ visuel droit ($M = -0,229, S = 0,783$), $t(29) = 3,398, p < 0,005, d = 0,62$; et que le champ visuel droit ($M = 0,184, S = 0,639$) est significativement sélectif pour l'information verticale que ne l'est le champ visuel gauche ($M = -0,331, S = 0,717$), $t(29) = 3,329, p < 0,005, d = 0,6$.

Les résultats de ce troisième article font, pour la première fois, le pont entre l'asymétrie cérébrale et le traitement des orientations spatiales dans le traitement perceptif des visages. Spécifiquement, ils montrent que le champ visuel gauche, dont le contenu est initialement traité par l'hémisphère cérébral droit, effectue une utilisation sélective l'information horizontale. Cela n'est en revanche pas le cas pour le champ visuel droit/hémisphère gauche. Au contraire, ce dernier semble plutôt utiliser l'information verticale. Une plus grande sélectivité du champ visuel gauche pour l'information horizontale était attendue, considérant le lien entre le traitement facial et l'information horizontale. Cependant, l'apparente sélectivité du champ visuel droit pour l'information verticale était inattendue, car cela implique que l'hémisphère gauche ait recours à une stratégie sous optimale de traitement facial. Une explication toute simple pourrait provenir de la sélectivité du champ visuel gauche pour l'information horizontale. En effet, des travaux récents ont montré que l'aire faciale fusiforme dans l'hémisphère droit est sélective pour l'information horizontale (Goffaux *et al.*, 2016), signifiant que l'information horizontale pourrait activer les mécanismes de traitement facial de cet hémisphère de manière plus fiable que l'information verticale. Ainsi, lors d'essais durant lesquels l'identité de la sonde était présentée au champ visuel droit, la présence d'information horizontale pourrait tout de même avoir activé les mécanismes de traitement facial de l'hémisphère droit; or, puisque la moitié gauche de la sonde ne véhicule aucune information sur l'identité durant ces essais, il en résulterait une plus grande incertitude perceptive et commission d'erreurs. Au contraire, la présence d'information verticale lors d'essais durant lesquels l'identité de la sonde était présentée au champ visuel droit mènerait à

une activation moindre des mécanismes de traitement facial de l'hémisphère droit; en résulterait donc une incertitude perceptive et commission d'erreurs moindre. Une autre explication concerne les possibles différences qualitatives entre les hémisphères. En effet, comme cela a été rapporté pour le traitement global/local (p.ex., Rossion *et al.*, 2000; Sergent, 1982), les fréquences spatiales (p.ex., Keenan *et al.*, 1989; Sergent, 1985), la lecture (p.ex., Cohen *et al.*, 2000; Dundas *et al.*, 2013) et les visages (p.ex., Kanwisher *et al.*, 1997), il est possible que les hémisphères diffèrent qualitativement en termes de traitement des orientations spatiales en lien avec différentes spécialisations (p.ex., Ossowski et Behrmann, 2015). Ainsi, en lien avec la spécialisation des visages, l'hémisphère droit pourrait avoir développé une spécialisation pour le traitement de l'information horizontale.

ABSTRACT

Left visual field (LVF) superiority refers to greater accuracy and processing speed for faces, compared to faces presented in the right visual field (RVF). This effect is typically associated with greater involvement of the right cerebral hemisphere (RH) during face processing, compared to the left hemisphere (LH). Recent data have put horizontal spatial orientation processing under the spotlight as fundamental to various aspects of face processing. We were thus interested in whether the LVF/RH might show greater horizontal tuning for faces. First, we obtained reference orientation tuning profiles for face identification. As expected, information around the horizontal axis was linked to better identification accuracy. Second, using a lateralized presentation paradigm, we measured orientation tuning in both the LVF/RH and RVF/LH, independently. Again, information around the horizontal axis was linked to better identification accuracy, but only when faces were presented to the LVF/RH. Thus, our results suggest that LVF superiority might at least partly arise as a result of increased processing efficiency of horizontals in the right cerebral hemisphere.

Keywords: Face perception; Psychophysics; Orientations; Hemispheric Asymmetry; Lateralization

HORIZONTAL TUNING OF THE RIGHT HEMISPHERE FOR FACE PERCEPTION

4.1 Introduction

The widespread notion that there are left-brain analytical and right-brain creative personality types has long been debunked by scientists (e.g., Nielsen, Zielinski, Ferguson, Lainhart, & Anderson, 2013). Still, the fact that some cognitive processes are characterized by a degree of cerebral asymmetry cannot be escaped. Right hemisphere (RH) lesions for instance more often lead to hemineglect than do left hemisphere (LH) lesions (see, for review, Parton, Malhotra, & Husain, 2004). Face processing is another example, and early evidence for asymmetry came from observations of a series of patients who, after suffering a brain injury, lost the ability to memorize new faces and recognize familiar faces, sometimes even their own—a condition known as acquired prosopagnosia (e.g., Bodamer, 1947; Della Sala & Young, 2003; Ellis & Florence, 1990; Quaglino & Borelli, 1867). As it turns out, when acquired prosopagnosia follows from a unilateral lesion, the damage is almost always located in the RH (Barton, 2008a; De Renzi & Pellegrino, 1998; Landis, Cummings, Christen, Bogen, & Imhof, 1986; Pancaroglu et al., 2016; see also, for review, Mayer & Rossion, 2007), suggesting that regions located in this hemisphere have a particular role in face processing.

Evidence for the cerebral asymmetry in face processing also comes from functional neuroimaging studies. For instance, though it can be localized in both hemispheres, the functional fusiform face area (FFA) typically has a larger volume in the RH (Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997; Rossion, Hanseeuw, & Dricot, 2012;

Sergent, Ohta, & MacDonald, 1992). Its electrophysiological correlate (Sadeh, Podlipsky, Zhdanov, & Yovel, 2010), the face-sensitive N170 visually evoked potential, also displays larger voltage amplitudes over RH electrodes (Bentin, Allison, Puce, Perez, & McCarthy, 1996; Yovel, Levy, Grabowecky, & Paller, 2003; see also, for reviews, Eimer, 2011; Rossion, 2014). These results are usually understood to reflect greater activity in RH regions in response to faces and thus, greater involvement in their processing, compared to LH regions.

In addition to neuroimaging data, cerebral asymmetry in face processing can also be observed behaviorally, thanks to separation of the visual fields along a vertical line that traverses the fovea (Shillcock, Ellison, & Monaghan, 2000), and decussation of the visual pathways. Indeed, by presenting faces to either the left (LVF) or the right (RVF) visual field—each one projecting directly to the contralateral hemisphere—we can observe a LVF/RH superiority effect, whereby faces are recognized with greater accuracy and speed, compared to the RVF/LH (see, for reviews, Rhodes, 1985; Sergent & Bindra, 1981). Relatedly, faces presented to the LVF/RH also induce a larger face-specific N170 amplitude than do faces presented to the RVF/LH and the magnitude of this asymmetry is a good predictor of the behavioral LVF/RH superiority (Yovel et al., 2003). Interestingly, results obtained with chimeric faces, in which the left and right halves of a face each convey a different identity (Levy, Heller, Banich, & Burton, 1983a; Schwartz & Smith, 1980), suggest that the LVF/RH largely dominates perceptual decisions (Yovel, Paller, & Levy, 2005). It was later shown that the magnitude of this effect is well predicted by FFA volume asymmetry (Yovel, Tambini, & Brandman, 2008). Thus, a wealth of data supports the notion that there are quantitative differences in hemisphere involvement in face processing, as the RH appears to have greater involvement in this task.

Regarding the nature of hemispheric asymmetry, there also appear to be qualitative (i.e., mechanistic) differences at play, as data suggest that each side may in fact specialize in complementary aspects of visual processing. The RH FFA for instance was found to exhibit greater activation in response to whole faces compared to isolated face parts, whereas the opposite pattern was observed in the LH FFA (Rossion et al., 2000). Thus, the RH might specialize with larger scale strategies, such as global/holistic processing; and the LH might specialize in smaller scale strategies, such as piecemeal/featural processing. This is consistent with other findings pertaining to spatial frequency processing, whereby the RH appears to process relatively lower spatial frequencies with greater efficiency, and the LH seems to process relatively higher spatial frequencies with greater efficiency. This appears to hold for faces (e.g., Keenan, Whitman, & Pepe 1989; Sergent, 1985), other objects (Sergent, 1982; review by Kauffmann, Ramanoël, & Peyrin, 2014), simple gratings (e.g., Woodhead, Wise, Sereno, & Leech, 2011), and also written words (e.g., Seghier & Price, 2011; Tadros, Dupuis-Roy, Fiset, Arguin, & Gosselin, 2013). In addition, a recent study found that unilateral RH/LH lesions led to marked reductions in sensitivity to lower/higher spatial frequencies, respectively (dos Santos, Andrade, & Fernandez Calvo, 2013). Crucially, holistic processing, which is significantly impaired in cases of acquired prosopagnosia (see, for review, Rossion, 2008), has been linked with the lower spatial frequency content of faces (Goffaux & Rossion, 2006; see, however, Gaspar, Sekuler, & Bennett, 2008; Royer et al., 2017; Willenbockel, Fiset, et al., 2010). Thus, the cerebral asymmetry observed in face processing might have its source upstream, in the lower level visual cortices.

In human early visual cortices, visual signals are processed through discrete psychophysical channels that respond more or less selectively to cyclical luminance variations of specific spatial frequencies and orientations (see, for review, De Valois & De Valois, 1990). Recently, various accounts have placed spatial orientations

under the spotlight by revealing how orientations around the horizontal axis are intricately linked with various aspects of face processing such as detection (Balas, Schmidt, & Saville, 2015), identification (Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Goffaux & Greenwood, 2016; Goffaux, Poncin, & Schiltz, 2015; Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013a; Pachai, Sekuler, Bennett, Schyns, & Ramon, 2017; Pachai, Bennett, & Sekuler, 2018), and facial expression recognition (Balas & Huynh, 2015; Balas, Huynh, Saville, & Schmidt, 2015; Duncan et al., 2017; Huynh & Balas, 2014). In fact, individual differences in horizontal selectivity may account for as much as a third of the observed variance in identity (Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013a) and expression (Duncan et al., 2017) recognition abilities.

Interestingly, a strong positive link was also found between individual differences in horizontal selectivity and utilization of the eye region, but not utilization of other face regions (Duncan et al., 2017; see also Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013b). This link is further supported by neuroimaging data, which suggest common neural underpinnings. Indeed, the eyes appear to be especially important for modulating the activity of the FFA (Ghuman et al., 2014) and the face-sensitive N170 (Rousselet et al., 2014; Smith, Gosselin, & Schyns, 2004); just as horizontal facial content appears to be a strong modulator of the FFA (Goffaux, Duecker, Hausfeld, Schiltz, & Goebel, 2016) and N170 (Duncan, Gosselin, Blais, & Fiset, 2018; Hashemi, Pachai, Bennett, & Sekuler, 2018; Jacques, Schiltz, & Goffaux, 2014). Critically, under restrained viewing conditions, the N170, which is typically larger in the RH, was found to respond selectively to the contralateral eye (Rousselet et al., 2014; Smith, Gosselin, & Schyns, 2004). This might account for the greater left eye utilization that is frequently observed in neurologically intact subjects (e.g., Vinette, Gosselin, & Schyns, 2004), and even enhanced in very good vs. average face recognizers (Royer et al., 2018; Tardif et al., 2019), but notoriously reduced in acquired (Caldara et al., 2005; Fiset et al., 2017) and developmental (Tardif et al., 2019) prosopagnosia.

Given these findings, we wondered whether we might observe differential spatial orientation tuning across the cerebral hemispheres; and specifically, whether the RH is more tuned to diagnostic horizontal facial information. To this effect, we used orientation bubbles (Duncan et al., 2017) to randomly filter faces in the spatial orientations domain and had participants accomplish two tasks. First, participants completed a simple face identification task to establish a reference orientation profile. Then, we independently measured the orientation profiles of each hemisphere with a same/different task in which only the LVF/RH or the RVF/LH half of a probe face conveyed identity information.

4.2 Methods

4.2.1 Experiment 1

4.2.1.1 Participants

Thirty-seven participants aged between 18 and 33 years old were recruited at the Université du Québec en Outaouais. All had normal or corrected-to-normal vision, and self-reported as right-handed. Of the initial sample, four were excluded upon failing the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) because they did not meet our handedness criterion (laterality quotient ≥ 60). An additional three desisted while the experiment was underway, and their incomplete data were discarded. Thus, thirty (81.25% female) remained in our final sample ($M = 20.38$ years old, $SD = 2.85$ years), with an average laterality quotient of $+86.71$ ($SD = 14.59$). An analysis using G-power (Faul, Erdfelder, Buchner, & Lang, 2009) revealed that we needed a sample of twenty-seven subjects to detect a medium effect size of 0.5, with a power of 0.8 and a type 1 error probability of 0.05; thus, the present study was adequately powered. This experiment was conducted in conformity with the Ethics Code of the

World Medical Association (Declaration of Helsinki) and received approval from UQO research ethics committee. A financial compensation of 12\$/hour was offered.

4.2.1.2 Apparatus

The experiment was conducted on a Mac Mini computer (Intel i7 2.6 GHz processor) using custom code written in Matlab (Natick, MA), along with functions from the Image Processing toolbox and the Psychophysics toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). Stimuli were displayed on a 24-in BenQ LCD monitor with evenly distributed luminance levels. Screen resolution was set to 1920×1080 , with a refresh rate of 100 Hz.

Movement of the dominant eye was recorded with an EyeLink 1000 (SR-Research, Ottawa, Ontario) eye tracker, with a temporal resolution of 1,000 Hz. Viewing distance was maintained at 54 cm using a chinrest.

4.2.1.3 Stimuli

Ten pictures of as many different individuals (five female) displaying a neutral expression were chosen as base images (see, for details, Willenbockel, Fiset, et al., 2010; Royer, Willenbockel, et al., 2017). Luminance histograms and spatial frequency spectra were equalized with the SHINE toolbox (Willenbockel, Sadr, et al., 2010) to reduce the influence of low-level variations and better capture internal representations.

The images were downsampled to 256×256 pixels, and a gray oval that seamlessly blended with the background (66.33 cd/m^2) was applied in order to hide facial

contour and external features (e.g., ears, hair). Faces were spatially aligned on the positions of the main internal features—eyes, nose, mouth—using translation, rotation, and scaling. To ensure that both hemispheres received the same low-level input, all face images were made to be symmetrical; that is, a mirrored version of the left half replaced the right half. Faces subtended 4° horizontally. However, a small gap (0.2°) was inserted between the two face halves prior to stimulus presentation in order to conceal inconsistencies between the two face halves that was introduced in the same/different task.

4.2.1.4 Procedure

Participants were first given a maximum of 20 minutes to familiarize themselves with the faces that would be used throughout both experiments. Then, they completed a series of practice blocks (100 trials each) in which they were asked to identify unfiltered face stimuli. The purpose of this practice was twofold: ensure that participants had learned face identities to a satisfactory level (see below), and prepare them for the experimental conditions, whereby stimulus presentation time was only 60 ms. This duration was chosen to minimize the likelihood that participants would notice inconsistencies between face halves in Experiment 2, and is in line with previous work using similar paradigms (e.g., Yovel et al., 2003; Yovel et al., 2008).

During practice, stimulus presentation duration was held constant within blocks, but it decreased across blocks—from 1,000 ms, to 500 ms, to 250 ms, to 120 ms, and finally to 60 ms—every time a participant successfully completed a block with at least 92% correct responses. Each practice trial began with a fixation point on a blank rest screen, and the trial sequence was initiated by pressing the keyboard spacebar. This led to the presentation of a stimulus for a varying duration (1,000, 500, 250, 120,

or 60 ms) that was followed by a 250 ms white noise mask. Participants entered their response by pressing one of the appropriate keys on the keyboard. Visual feedback (“Correct” or “Incorrect”) was provided.

When the face was present, the fixation point fell approximately halfway between nose and eye height. This location was chosen because it was shown to be nearly optimal for face identification tasks (Peterson & Eckstein, 2012). Participants were instructed to always fixate the fixation point and to refrain from blinking during the stimulus presentation sequence, using instead the blank rest screen for blinking. They were told that failing to comply would negatively affect their ability to carry the task—especially at the shortest presentation times. Beyond periodic reminders from the experimenter, compliance with this directive was ensured using eye tracking measures during the same/different experimental task described below.

Once the last practice block was completed, the face identification task was initiated. This task was built similar to the practice described above. There were however two notable differences: no feedback was given, and faces were filtered with a number of orientation bubbles. Orientation bubbles is a signal sampling procedure that applies filters of random orientations, thus allowing a thorough investigation of how this information influences visual perception. The procedure, described below, is illustrated in Figure 3.1. First, the image (Figure 3.1a) orientation content is revealed by applying the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm and shifting the resulting quadrants (Figure 3.1b). An *orientation sampling vector* is then created by summing the prescribed number of pairs of Von Mises orientation samples, or *orientation bubbles* (Figure 3.1c), and converted to an *orientation sampling matrix* (Figure 3.1d). This matrix is then applied to the image Fourier spectrum to produce an orientation-filtered Fourier spectrum, and the product is back-transformed to the image domain

with the inverse FFT (Figure 3.1e). For further detail on the method, the reader can consult Duncan and colleagues (2017).

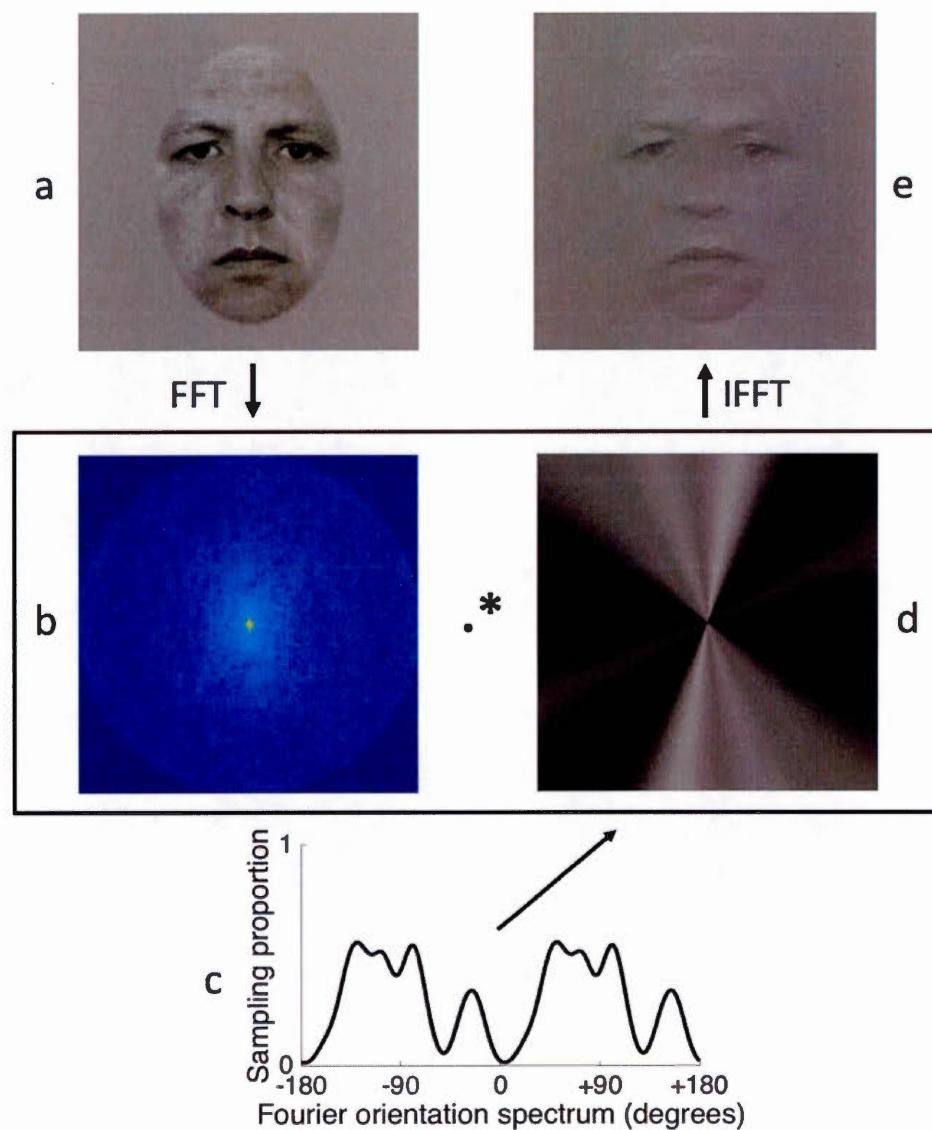


Figure 4.1. Orientation bubbles filtering procedure. For this example, the orientation sampling vector (and matrix) contains 33 symmetrical pairs of orientation bubbles. The face is that of author D.F.

The number of bubbles on any given trial—and thus, the total amount of information revealed—was determined with QUEST (Watson & Pelli, 1983) on a trial basis in order to control task difficulty and maintain a performance of about 55% correct, halfway between floor and ceiling levels. Dithering was applied to filtered stimuli to reduce aliasing (Allard & Faubert, 2008). Participants completed five blocks of 100 trials each.

4.2.2 Experiment 2

4.2.2.1 Participants, Apparatus, and Stimuli

Same as Experiment 1.

4.2.2.2 Procedure

In the same/different task, inspired by the one devised by Yovel and colleagues (2003), participants viewed a sequence of two faces—a probe and a target—and they were instructed to indicate whether the identity of the two was the same or not. This paradigm was favored to more classical lateralization paradigms because it allows for presentations in central vision.

Participants first completed a practice version of the task. Each trial began with a central fixation point on a blank rest screen, and the trial sequence was initiated by pressing the keyboard spacebar. After a delay (1,000 ms), the probe (60 ms) was presented and immediately followed by a white noise mask (250 ms). Then, there was an inter stimuli interval (1,200 ms) and finally, the target (360 ms) was presented. Once the presentation sequence was completed, participants could enter their

response by pressing one of the appropriate keys on the computer's keyboard. Visual feedback ("Correct" or "Incorrect") was provided. After having completed a practice block with at least 92% correct responses, they could begin the experimental version of this task.

The experimental version of the task was identical to the practice version, except that i) unbeknownst to the participants, only the left or right half of the probe—randomized across trials—conveyed identity information, whereas the complementary half was filled with an average face (geometric mean of the ten base faces; see Figure 3.2), ii) no feedback was given, and iii) both face halves of the probe were filtered with the same orientation bubbles and dithered. Both face halves of the target contained the same identity, and were presented unfiltered. The number of bubbles was determined with QUEST (Watson & Pelli, 1983) on a trial basis in order to maintain a performance of about 75% correct—halfway between floor and ceiling levels—across both hemifields. Thus, the same number of bubbles on average composed bubbles masks in the LVF/RH and in the RVF/LH. We favored this approach, instead of manipulating the number of bubbles within hemifield, so that both hemifields were presented with the same quantity of signal; thereby facilitating direct comparisons between the two conditions, and also reducing the likelihood that participants perceived the inconsistencies between face halves. Here, we remind the reader that these participants were extensively trained and could achieve at least 92% correct responses for unfiltered stimuli, and could thus efficiently process these identities. They completed fifteen blocks of forty trials each (600 trials, total). Eye tracker calibration and validation were performed before the first trial of each block using a 9-points grid. Drift correction was applied at the beginning of each trial.

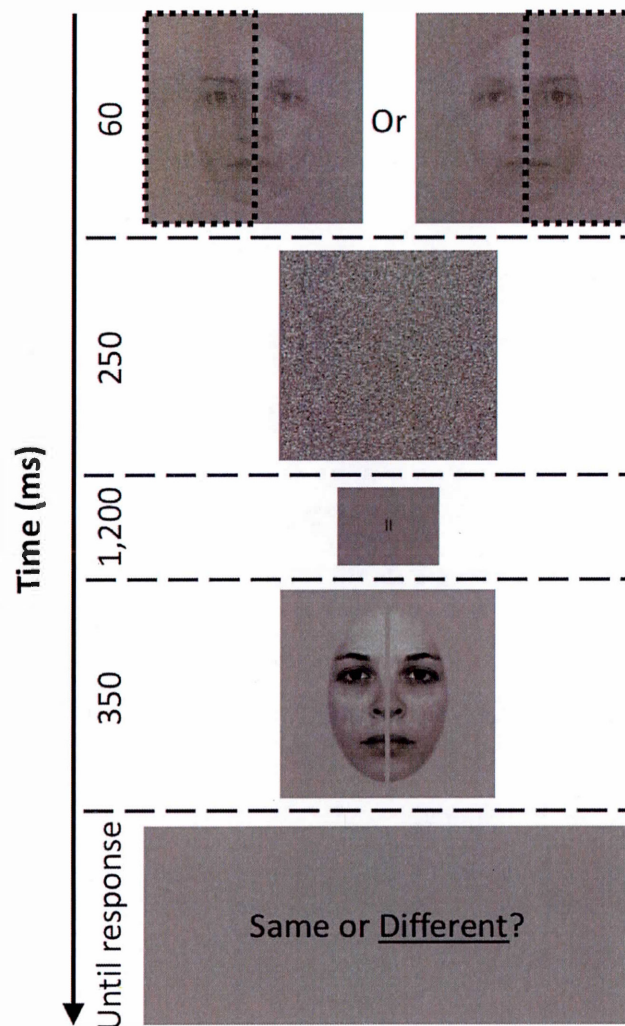


Figure 4.2. Trial sequence for Experiment 2. The black dotted line surrounding the left/right half of the experimental stimulus is only there for an indicative purpose and outlines the part that contains identity information; the other half is an average face mask. In this example, a "Different" trial is displayed. The top face half is that of author C.B. Permission was obtained by the concerned party to use the bottom face displayed in this illustration.

4.3 Analyses and Results

Once the two experimental tasks were completed, participants were debriefed. One participant outright asked whether it was possible that some of the probe stimuli conveyed two different identities—although he admitted remaining oblivious to the research hypotheses even after this assumption was confirmed. All other participants expressed surprise—and even disbelief in some cases—upon learning the truth about these peculiar stimuli, claiming to have noticed nothing unusual.

4.3.1 Experiment 1

On average, participants needed 42.28 ($SD = 24.11$, $CI\ 95 = [33.28, 51.29]$) bubbles to carry this task. In order to retrieve diagnostic orientations for face identification, we performed a classification image analysis (Eckstein & Ahumada, 2002; Gosselin & Schyns, 2004) analogous to a multiple linear regression of orientation bubbles on response accuracy. More specifically, we calculated a weighted sum of orientation sampling vectors, attributing positive/negative weights to filters that led to correct/incorrect responses, respectively. The weights in question were accuracy scores, transformed into z-scores.

The outcome was a series of n (sample size) vectors of regression coefficients, henceforth referred to as classification vectors, which quantify the strength of association between orientations and the accuracy of face identification. Classification vectors were then transformed into z-scores using the mean and standard deviation of the null hypothesis. Those values were estimated by simulating 1,000 classification vectors with as many random permutations of accuracy vectors.

A group classification vector was then produced by summing individual standardized classification vectors and dividing the outcome by $\sqrt{n}$. A pixel test (Chauvin, Worsley, Schyns, Arguin, & Gosselin, 2005) was used to establish the statistical threshold ($Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$; two-tailed). The test applies a correction for multiple observations that also accounts for the non-independence of contiguous orientations.

Results for half of the symmetrical orientation spectrum are illustrated in Figure 3.3 (left graph). Figure 3.3 (right) also shows a face stimulus filtered with the diagnostic horizontal orientations (top) and anti-diagnostic vertical orientations (bottom) for the face identification experiment. As can be seen, diagnostic information which positively correlated with accurate face identification was bundled around the horizontal axis [-92° to -56°] ($Z_{max} = 3.382$, $p < 0.005$), whereas anti-diagnostic information which negatively correlated with accurate identification was bundled around the vertical axis [-27° to -164°] ($Z_{min} = -3.585$, $p < 0.001$). Thus, information around the horizontal axis increased the likelihood of a correct response, whereas information around the vertical axis decreased it, as expected from previous findings (e.g., Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Pachai, Sekuler, & Bennett, 2013a).

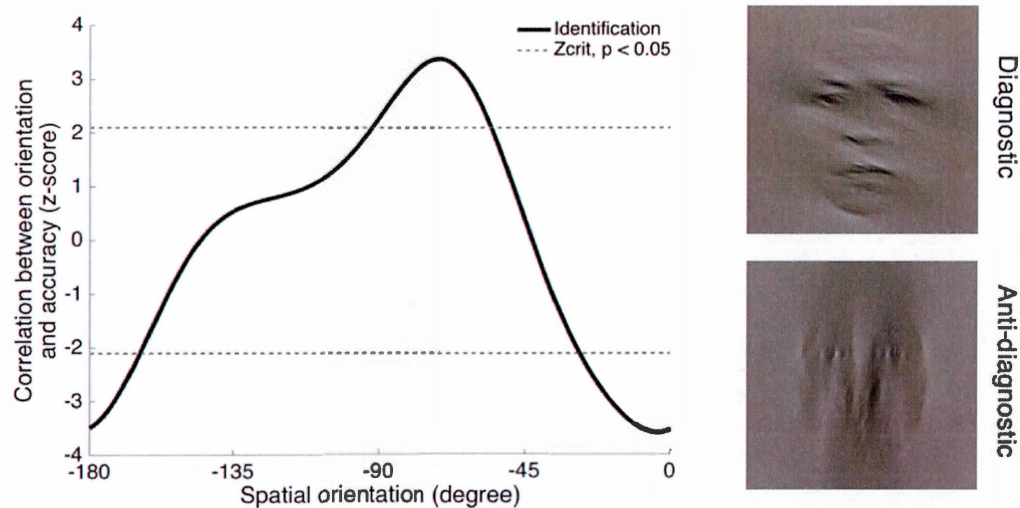


Figure 4.3. (Left) Classification vector from Experiment 1 illustrating the correlation (z-score) between orientations and accuracy for face identification. Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold, $Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$. (Right) Images filtered with diagnostic (top) and anti-diagnostic (bottom) orientations. The face is that of author D.F.

4.3.2 Experiment 2

Due to an error during file transfer, our entire set of eye tracking data was lost for eight subjects, and about half of the data was lost for one additional subject. For the available data however ($n = 21$), the rate of compliant trials was very high ($M = 97.67\%$, $SD = 3.09\%$) across subjects. In addition, fixations across trials were on average almost exactly on the fixation point, with a very small (1.35 pixel) leftward bias and skew (0.005). Given that the participants for whom data was lost completed the experiment in the same environment and with the same psychological conditions—that is, eye tracking measures were taken, and an experimenter was

present throughout for monitoring and to enforce instructions—we argue that there is little reason to believe that their compliance was any different. We therefore decided to include all the behavioral data from all our participants in the analyses.

Participants needed an average of 44.57 ($SD = 15$, $CI\ 95 = [38.97, 50.17]$) bubbles. Average performance was 80.97% correct ($SD = 5.58\%$) in the LVF/RH condition and 73.47% correct ($SD = 5.05\%$) in the RVF/LH condition. The difference between the two conditions was significant, $t(29) = 5.13$, $p < 0.001$, $d = 0.94$. Median reaction times were 756.2 ms ($SD = 179.4$ ms) in the LVF/RH condition and 772.2 ms ($SD = 176.1$ ms) in the RVF/LH condition. The difference is small, but statistically significant, $t(29) = 2.33$, $p < 0.05$, $d = 0.43$. Thus, these results replicate the expected LVF/RH superiority. Importantly, they also confirm that the difference in performance does not merely reflect a speed/accuracy tradeoff; performance in the RVF/LH is markedly worse in spite of somewhat increased response times.

To uncover the diagnostic orientations for each hemifield, we performed a classification image analysis similar to the one described above. That is, for each subject and for each hemifield condition, we calculated a weighted sum of orientation sampling vectors, attributing positive/negative weights to correct/incorrect responses, respectively. The weights were accuracy scores from the appropriate subset of trials (i.e., left hemifield trials for the LVF/RH analysis, and vice versa), transformed into z-scores.

The outcome was a series of n classification vectors per hemifield. Classification vectors were transformed into z-scores using the permutation procedure (1,000 iterations) outlined above. Standardized classification vectors were then summed across subjects and within hemifield, and the outcomes were divided by $\sqrt{n}$. The

statistical threshold ($Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$; two-tailed) was determined with a pixel test.

As can be seen in Figure 3.4 (left graph), information bundled around the horizontal axis [-93° to -54°] significantly positively correlates with response accuracy in the LVF/RH ($Z_{max} = 3.454$, $p < 0.001$); whereas information bundled around the vertical axis [-180° to -156°] significantly negatively correlates with response accuracy ($Z_{min} = -2.517$, $p < 0.05$). Figure 3.4 (right) also shows a face stimulus filtered with diagnostic orientations (top) and anti-diagnostic orientations (bottom) for the LVF/RH. Interestingly, the orientation profiles of the two visual fields were negatively correlated. As a result, horizontal information was marginally negatively correlated with response accuracy in the RVF/LH ($Z_{min} = -1.924$, $p < 0.1$), and a significant difference between the two visual fields emerged around the horizontal [-97° to -64° ; $Z_{max} = 3.756$, $p < 0.001$] and vertical [-180° to -142° ; $Z_{min} = -2.852$, $p < 0.01$] axes.

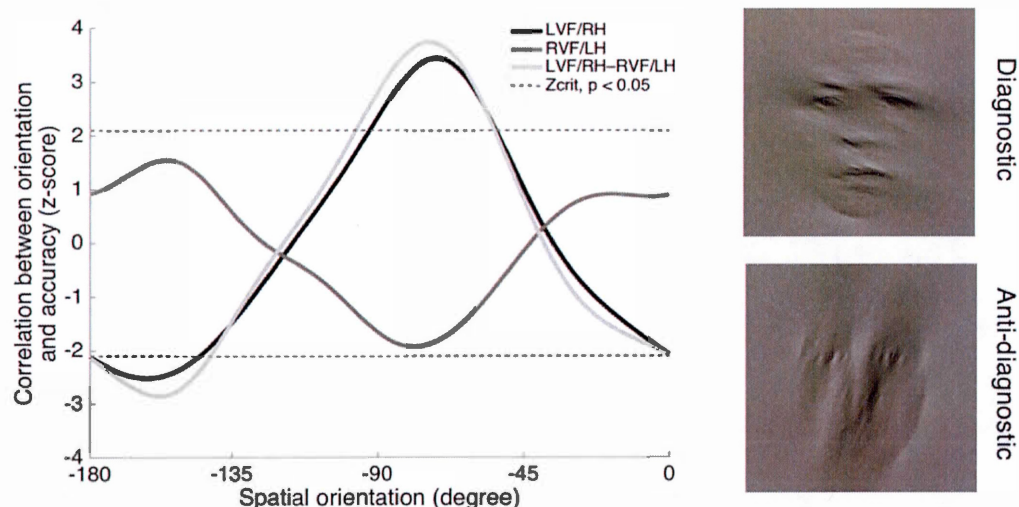


Figure 4.4. (Left) Classification vectors from Experiment 2 illustrating the correlation (z-score) between orientations and accuracy in the left visual field/right hemisphere (LVF/RH; black), in the right visual field/left hemisphere (RVF/LH; dark gray), and the difference between the LVF/RH and RVF/LH orientation profiles (light gray). Gray dotted lines plot the two-tailed significance threshold, $Z_{crit} = 2.101$, $p < 0.05$. (Right) Images filtered with diagnostic (top) and anti-diagnostic (bottom) orientations for the LVF/RH. The face is that of author D.F.

To verify that this difference between hemispheres was not due to a small subset of our sample, we directly compared orientation tuning of the two hemispheres in a manner similar to how horizontal tuning was calculated in our previous studies (Duncan et al., 2017; Duncan et al., in press). That is, we applied a one-dimension Gaussian filter (FWHM equal to 45° , and sum equal to one) centered on the horizontal (-90°) axis of individual classification vectors for horizontal tuning of the LVF/RH, and RVF/LH; and a one-dimension Gaussian filter (same parameters) centered on the vertical (-180°) axis of individual classification vectors for vertical tuning of the LVF/RH, and RVF/LH. The sum of each resulting product vector then

represented, for each subject, a weighted average of regression coefficients (*z*-scores) around the horizontal axis in the first case, and on the vertical axis in the second case, and can be taken as an approximation of horizontal/vertical tuning, respectively—as the weight given to each regression coefficient (*z*-score) is maximal for those that fall square on the horizontal/vertical axis, and gradually decreases the further away they fall from this axis. These cardinal (horizontal and vertical) axes were chosen because results from a model observer (not shown) suggest that the horizontal axis is where most diagnostic information lies; and the vertical axis is where most anti-diagnostic information lies.

We then directly compared the resulting tuning scores (i.e., *z*-scores weighted average) with paired sample *t*-tests. Horizontal tuning in the LVF/RH ($M = 0.361$, $SD = 0.68$, $CI\ 95 = [0.107, 0.615]$) was significantly more pronounced than in the RVF/LH ($M = -0.229$, $SD = 0.783$, $CI\ 95 = [-0.522, 0.063]$), $t(29) = 3.398$, $p < 0.005$, $d = 0.62$. For vertical tuning, the pattern was reversed, as it was significantly more pronounced in the RVF/LH ($M = 0.184$, $SD = 0.639$, $CI\ 95 = [-0.083, 0.452]$), compared to the LVF/RH ($M = -0.331$, $SD = 0.717$, $CI\ 95 = [-0.57, -0.092]$), $t(29) = 3.329$, $p < 0.005$, $d = 0.6$. Thus, it does not appear to be the case that the difference in tuning across hemispheres was due to a subset of our sample.

4.4 Discussion

We set out to verify whether we might observe differential spatial orientation tuning across the visual fields and cerebral hemispheres. More specifically, we expected to find greater tuning to diagnostic horizontal facial information in the left visual field/right hemisphere (LVF/RH), compared to the right visual field/left hemisphere (RVF/LH). Our results suggest that this is indeed the case, as we found horizontal tuning of the LVF/RH, but not the RVF/LH. In fact, not only did we fail to observe

horizontal tuning in the RVF/LH, when horizontal information was presented to this side, there even was a marginal increase in the commission of errors (i.e., a negative correlation between these spatial orientations, and accuracy). In addition, the RVF/LH was also significantly more vertically tuned, compared to the LVF/RH.

Given the growing literature showing horizontal tuning of face perception (e.g., Dakin & Watt, 2009; Goffaux & Dakin, 2010; Pachai et al., 2013a), and also how the LVF/RH is known for its greater implication in face processing (e.g., Kanwisher et al., 1997; Sergent & Bindra, 1981; Yovel et al., 2003; Yovel et al., 2008), greater horizontal tuning of the LVF/RH, compared to the RVF/LH, was expected. However, the fact that diagnostic horizontal facial information was marginally detrimental to RVF/LH performance was unexpected.

As for why horizontal information was detrimental to RVF/LH performance, one explanation could be LVF/RH primacy for faces. As already stated, part of the LVF/RH superiority effect concerns faster response times to faces presented to the LVF/RH (vs. RVF/LH), and our response times data fit nicely with this prediction. It is already established, through various functional imaging methods, that the LVF/RH exhibits preferential face processing. The N170 for instance typically exhibits larger amplitudes over the RH electrodes. In addition, N170 latency is also shorter over RH electrodes, and it was suggested that it is precisely from this processing milestone onward that LVF/RH superiority can be observed in electrophysiological markers of face processing from of either hemisphere, as both tend to better reflect information from the LVF, possibly as a result of information transfer across hemispheres—in this case, from right to left (Yovel et al., 2003). Furthermore, N170 response appears particularly sensitive to horizontal facial spatial orientations (Duncan et al., 2018 [Vision Sciences Society meeting abstract]; Hashemi et al., 2018; Jacques et al., 2014). Thus, it may be that horizontal facial information is more likely to engage face

processing mechanisms indexed by the N170—irrespective of whether the LVF face half contains an identifiable target or not, as proposed by Hashemi and colleagues (2018; see also, Hashemi, Pachai, Sekuler, & Bennett, 2012). And because these mechanisms tend to operate slightly faster in the RH, this hemisphere would be more likely to dominate perceptual decisions whenever it is presented with horizontal facial information; leading to better performance in the LVF/RH condition (i.e., LVF target), and to worse performance in the RVF/LH condition (i.e., LVF average face mask).

A complementary—albeit surprising—finding was that the RVF/LH also displayed greater efficiency for nondiagnostic vertical facial information, compared to the LVF/RH. One possibility implies qualitative (i.e., mechanistic) differences in spatial orientation processing that would make the RVF/LH more suited to other types of visual stimuli or tasks. As previously stated, there is already evidence to suggest functional complementarity of the cerebral hemispheres. Some have for example proposed that cerebral hemispheres differ with regard to visual strategies deployed for face processing, with RH processing being more global, and LH processing being more local (Rossion & al., 2000; Sergent, 1982). Relatedly, some have proposed that cerebral hemispheres differ with respect to spatial frequency (SF) processing, with RH processing being skewed toward relatively lower SFs (in line with a global strategy), and LH processing being skewed toward higher SFs (in line with a local strategy) (dos Santos et al., 2013; Woodhead et al., 2011; see also, for review, Robertson & Ivry, 2000). Others yet have proposed that cerebral hemispheres instead differ on a categorical basis, with the RH specialized for face processing (e.g., Kanwisher et al., 1997), and the LH specialized for visual word processing (e.g., Cohen et al., 2000; Dundas, Plaut, & Behrmann, 2013).

All these hemispheric differences need not all be mutually exclusive. For instance, it was proposed that LVF/RH specialization for faces, and enhanced processing of higher SFs in the RVF/LH arise as a result of reading acquisition (Dundas et al., 2013; Ossowski & Behrmann, 2015). In turn, seeing as each letter in a word must be processed for the whole to be recognized (Pelli, Farell, & Moore, 2003), enhanced processing of higher SFs in the RVF/LH make this hemisphere better equipped for local processing of letters, and words.

Our results suggest that spatial orientation processing is another way in which the cerebral hemispheres may differ. Indeed, enhanced processing of vertical information in the RVF/LH, could prove advantageous to visual word recognition by reducing visual crowding of letters, for instance (Duncan et al., 2014 [VSS meeting abstract]; see also Pachai, Downham, & Steeves, 2019 [VSS meeting abstract]). In this optic, complementary spatial orientation processing as a result of different specializations would be in line with the picture that has been emerging over the past several years. Further research should therefore be dedicated to investigating this possibility by relying on a more varied battery of visual tasks.

A possible limitation of the present work pertains to the strenuous nature of the tasks that were administered. Though our participants were extensively prepared for these tasks, they still placed high demands on the visual systems of our participants, and it is likely that this introduced more noise than usual in the orientation profiles we have obtained. This in turn might explain why our *z*-scores are somewhat lower than typically observed, and also why orientation profiles in Experiments 1 (baseline) and 2 (LVF/RH) were not exactly centered on the horizontal (-90°) axis, but instead showed a slight shift toward obliques (-71° and -72° , respectively). Nonetheless, it remains that i) horizontal facial information significantly positively correlated with performance in the baseline and LVF/RH conditions, but not in the RVF/LH

condition, ii) orientation profiles for the baseline and LVF/RH conditions were remarkably similar, with almost identically situated peaks, and iii) participants performed much better in the LVF/RH (vs. RVF/LH) condition, especially when horizontal facial information was present, despite the fact that the signal to noise ratio (i.e., number of bubbles) was on average the same in both conditions.

In closing, we provide a first investigation of orientation tuning of the visual fields and the cerebral hemispheres. The results reveal marked horizontal tuning of the LVF/RH, but not the RVF/LH. We also found significantly reduced horizontal tuning and increased vertical tuning of the latter compared to the former. We propose that this pattern might arise as a consequence of different specializations of the two hemispheres.

CHAPITRE V

CONCLUSION

5.1 Introduction

Le but de la présente thèse était d'explorer le rôle de l'information visuelle de bas niveau, notamment les orientations spatiales, dans différents aspects du traitement perceptif des visages. Dans les trois chapitres précédents, cette question a été abordée en traitant de la reconnaissance des expressions faciales, de l'utilisation des traits faciaux, de l'identification faciale et des différences individuelles et enfin, de l'asymétrie cérébrale observée dans le traitement perceptif des visages. Dans les paragraphes qui suivent, je présenterai un sommaire de ces expériences et discuterai des limites. Je terminerai en présentant mes suggestions pour la recherche future.

5.2 Retour sur les études présentées

5.2.1 Le traitement des expressions faciales

Plusieurs études s'étaient, au cours de la dernière décennie, intéressé au rôle des orientations spatiales horizontales dans le traitement perceptif des visages, s'attardant principalement à la reconnaissance faciale (p.ex., Goffaux et Dakin, 2010; Pachai *et al.*, 2013a). Les études étaient en revanche peu nombreuses à s'être penché sur la question de la reconnaissance des expressions faciales. En effet, avant que ne soient

publiées les expériences présentées dans le Chapitre II, seules deux études étaient répertoriées dans la littérature scientifique (Balas et Huynh, 2015; Huynh et Balas, 2014). Les résultats étaient intéressants, car ils confirmaient la supériorité de l'information horizontale pour la discrimination entre la joie et la tristesse, suggérant par le fait même que cette information a également un rôle dans la reconnaissance des expressions faciales. De plus, ils permettaient de nuancer cette supériorité en précisant l'effet médiateur de la configuration de la bouche : selon qu'elle soit ouverte ou fermée, l'information verticale est relativement plus ou moins utile, respectivement.

Le Chapitre II de cette thèse s'intéressait d'abord à la généralisation de ce résultat aux autres expressions faciales, puisqu'on observe une grande variation de la configuration des traits faciaux à travers les différentes émotions et que celle-ci pourrait influencer l'utilité des différentes orientations (p.ex., Smith *et al.*, 2005). À cet effet, une tâche de reconnaissance des expressions faciales de base (colère, dégoût, joie, peur, surprise, tristesse; Ekman et Friesen, 1975; Izard, 1971) et de la neutralité a été administrée à un groupe de participants. La méthode des bulles d'orientation a été employée afin de permettre une exploration complète des orientations spatiales et ainsi, tenir compte de la possibilité qu'une information spatiale autre qu'horizontale ou verticale soit utile à la reconnaissance des expressions faciales. Afin de quantifier l'information disponible, un observateur modèle a également été soumis à cette même tâche.

Les résultats ont confirmé l'importance d'effectuer un examen complet des orientations spatiales. D'abord, lorsqu'on considère les émotions regroupées et donc, la reconnaissance des expressions faciales en tant que processus unique, on peut conclure hors de tout doute que l'information horizontale joue un rôle primordial dans ce processus et correspond largement à l'information disponible, telle que

révélée par le modèle. Lorsqu'on considère les expressions faciales séparément cependant, on observe des différences notables entre celles-ci (Figure 1.4), la plus marquante étant certainement l'expression de surprise. En effet, les participants, pour reconnaître cette expression, ont plutôt utilisé l'information située autour de l'axe $-157,5$ degrés, à mi-chemin entre l'axe vertical (-180 degrés) et l'axe oblique (-135 degrés). Or, des analyses secondaires ont révélé que cela était probablement dû à la présence de l'expression de peur parmi les choix de réponse et que l'information horizontale serait autrement diagnostique pour la reconnaissance de cette expression.

Une précédente étude s'étant intéressée aux différences individuelles en termes de sélectivité pour l'information horizontale et d'aptitude en reconnaissance faciale avait révélé une association statistiquement significative entre ces deux mesures, expliquant environ 27% des différences individuelles observées (Pachai *et al.*, 2013a). Dans la présente étude, une corrélation significative a été observée entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et l'aptitude en reconnaissance d'expressions faciales, celle-ci expliquant environ 41% de la variance observée. Ces résultats sont donc compatibles avec des données récentes suggérant un chevauchement entre les mécanismes impliqués dans le traitement de l'identité et celui des expressions faciales (voir, pour une revue, Duchaine et Yovel, 2015), puisqu'elle propose un mécanisme perceptif commun; en l'occurrence, l'utilisation sélective de l'information faciale horizontale.

De nombreuses études s'étaient jusqu'à maintenant intéressées au traitement des parties du visage (p.ex., yeux, nez, bouche) en reconnaissance d'expressions faciales, et ce, avec une variété de méthodes comme la capture des mouvements oculaires (p.ex., Eisenbarth et Alpers, 2011) et les bulles de localisation (Blais *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2005). Puisque les orientations spatiales sont une information globale, une question pertinente était de connaître la stratégie de traitement de l'information

locale associée au traitement de l'information diagnostique horizontale. À cet effet, les participants ont accompli en parallèle une seconde tâche de reconnaissance des expressions faciales dans laquelle les visages étaient filtrés avec des bulles de localisation. Ce faisant, il a ensuite été possible d'extraire, à l'aide d'analyses d'images de classification, des profils d'utilisation de l'information locale du visage.

Les résultats ont confirmé que la région des yeux et de la bouche est particulièrement utilisée pour la reconnaissance des expressions faciales, comme précédemment rapporté dans la littérature scientifique (p.ex., Calvo *et al.*, 2014; Blais *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2005). En outre, les résultats confortent également l'hypothèse récente selon laquelle c'est globalement la bouche qui est la plus diagnostique pour cette tâche (Blais *et al.*, 2012). Malgré cela, le modèle de régression qui a été testé afin d'établir le pont entre les stratégies visuelles impliquées dans l'utilisation sélective de l'information horizontale et l'utilisation de l'information faciale locale a révélé que la région des yeux est le seul prédicteur significatif dans cette équation, expliquant à lui seul près de 30% de la variance observée.

Ici, une étude publiée après celle produite au Chapitre II mérite d'être discutée, car elle remet potentiellement en cause ce dernier résultat (Yu *et al.*, 2018). Celle-ci était vouée à vérifier l'impact de sept différentes bandes d'orientations (incluant évidemment l'horizontale et la verticale) sur la capacité à reconnaître les émotions de colère, joie, peur et tristesse. Pour toutes les expressions étudiées, Yu *et al.* ont observé une performance similaire avec l'information centrée sur l'axe horizontal, de même que celle centrée à ± 30 degrés de l'axe horizontal. Ce résultat n'est pas sans rappeler ceux de Pachai *et al.* (2018), qui ont remarqué que les humains utilisaient, pour identifier les visages, l'information autour de l'axe horizontal avec jusqu'à ± 25 degrés d'excentricité. Afin de vérifier le lien entre l'information horizontale et les traits faciaux, les chercheurs ont d'abord mesuré le contraste de l'information

horizontale, de façon locale dans trois régions faciales distinctes : les yeux, le nez et la bouche. Ces niveaux ont ensuite été entrés comme prédicteurs dans un modèle de régression, avec la performance comme variable dépendante. Contrairement aux résultats présentés dans le Chapitre II, l'équation qu'ils ont obtenue suggère que c'est non seulement la région des yeux, mais également celle de la bouche qui est associée à l'information horizontale.

Or, le filtrage d'orientations spatiales est une procédure de manipulation globale de l'information, par opposition à une méthode de manipulation locale du contenu comme les bulles de localisation (Gosselin et Schyns, 2001; voir aussi la Figure 1.6 de la présente thèse). Ceci signifie qu'une bande passante horizontale laissera au même moment passer tous les contrastes horizontaux (ceux des yeux, du nez et de la bouche) et inversement, une bande passante verticale éliminera tous les contrastes horizontaux; contrairement aux bulles de localisation, qui peuvent révéler indépendamment les contrastes des yeux ou de la bouche. La conséquence est donc que la procédure employée par Yu et coll. ne permet pas de mesurer la contribution des différentes régions faciales de manière indépendante. Qui plus est, cette procédure indique l'information disponible, mais pas nécessairement l'information utile à la tâche (c.-à-d. celle utilisée par les participants), contrairement à la méthode des bulles de localisation.

La conclusion qu'il est permis de tirer à partir des résultats de Yu *et al.* est donc que l'information horizontale est surtout véhiculée par les yeux et la bouche, ce qui corrobore des données précédemment publiées (Keil, 2009). En revanche, le modèle présenté au Chapitre II concerne l'utilisation de l'information diagnostique et nous indique que les participants qui utilisent davantage l'information horizontale utilisent aussi davantage l'information de la région des yeux. Celui-ci n'indique pas que les participants qui utilisent davantage l'information horizontale n'utilisent pas la région

de la bouche; il indique plutôt qu'on ne peut pas connaître le degré d'utilisation de la bouche uniquement à partir de l'utilisation sélective de l'information horizontale. Ainsi, un examen critique de la méthode, des analyses et des résultats de Yu *et al.* nous indiquent que les deux ensembles de résultats ne sont pas incompatibles. Les premiers nous indiquent que l'information horizontale disponible se situe surtout dans la région des yeux et de la bouche (Yu *et al.*, 2018), alors que ceux de la présente thèse nous indiquent que l'information utilisée (ou diagnostique) se situe plutôt au niveau des yeux (Chapitre II).

Ainsi, l'étude présentée au Chapitre II démontre clairement que l'information horizontale joue un rôle prépondérant dans la reconnaissance des expressions faciales, qu'une part non négligeable des différences individuelles en termes d'aptitude en reconnaissance des expressions faciales peut être expliquée par l'utilisation sélective de l'information horizontale, et que l'utilisation de l'information horizontale est principalement liée à l'utilisation de la région des yeux.

5.2.2 La reconnaissance faciale et les différences individuelles

L'étude présentée au Chapitre II a démontré l'importance des orientations spatiales horizontales pour la reconnaissance des expressions faciales et a permis d'établir le lien entre cette information et la performance avec une approche des différences individuelles. Ces résultats corroborent ceux d'une étude précédente dans laquelle un lien avait été observé entre l'utilisation sélective des horizontales et la performance dans une tâche d'identification faciale (Pachai *et al.*, 2013a). Or, la critique dirigée envers ces derniers travaux est également valide pour l'étude présentée au Chapitre II. À savoir, une certaine circularité était constatée, dans la mesure où l'utilisation sélective de l'information horizontale et la performance avaient été mesurées avec la même tâche ou les mêmes stimuli. Ainsi, l'objectif de l'étude présentée au Chapitre

III était de pallier cette limite en obtenant des mesures d'aptitude pour la reconnaissance faciale et d'utilisation sélective de l'information horizontale de façon indépendante, puis en mesurant leur association statistique.

Pour ce faire, les participants recrutés ont accompli un total de sept tâches, soit : quatre tâches de reconnaissance faciale, deux tâches de reconnaissance d'objets et une tâche de détection de grilles sinusoïdales horizontale. À partir des données de trois tâches de reconnaissance faciale (CFMT+, CFPT et GFMT), un score unique d'aptitude en reconnaissance faciale a été généré avec une analyse en composantes principales. Dans la quatrième tâche de reconnaissance faciale, les visages à identifier étaient filtrés avec les bulles d'orientation afin de pouvoir extraire des profils individuels d'utilisation des orientations ainsi qu'un indice de sélectivité de l'utilisation des horizontales.

L'association entre le score d'aptitude en reconnaissance faciale et l'utilisation sélective de l'information horizontale a ensuite été mesurée et une corrélation significative observée, celle-ci expliquant 17% des différences individuelles observées. De plus, une analyse subséquente de corrélation partielle a révélé que cette association ne s'explique pas par un traitement généralement meilleur des horizontales (sensibilité à des grilles sinusoïdales horizontales; utilisation sélective des horizontales pour la reconnaissance des voitures), ni par une meilleure reconnaissance des objets (performance dans la tâche de reconnaissance de voitures, performance dans la tâche de reconnaissance de chevaux [HMT]).

Le résultat de cette dernière analyse est particulièrement important lorsqu'on prend compte de résultats récents suggérant que l'utilisation de l'information faciale horizontale est en fait déterminée par les demandes de la tâche et que celle-ci n'est donc pas simplement systématique dès lors qu'un mécanisme de perception faciale

est en jeu. En effet, Goffaux (2019) a récemment montré que certains types de jugements faciaux (notamment, le fait de déterminer la direction gauche/centre/droite du regard) peuvent reposer sur l'information verticale. De façon similaire, les résultats de Huynh et Balas (2014) montrent aussi que le système visuel utilisera plutôt l'information verticale de l'image si un visage est tourné sur son côté (suivant une rotation de 90 degrés), afin d'extraire l'information diagnostique horizontale d'une expression faciale. Ensemble, tous ces résultats montrent que le système visuel ne déploie pas toujours automatiquement une stratégie de traitement des horizontales, sans égard au stimulus ou à la tâche, mais qu'il met plutôt en œuvre les stratégies visuelles qui sont appropriées à la situation dans laquelle il se trouve.

Les résultats de l'étude présentée dans le Chapitre III sont aussi intéressants pour leur implication théorique quant aux processus avec lesquels sont perçus les visages. Selon la théorie du traitement holistique, le visage serait traité de façon globale tel un tout indissociable (p.ex., Maurer *et al.*, 2002; Rossion, 2008; Yin, 1969). À cet effet, une critique fréquemment adressée aux méthodes d'images de classification comme celle des bulles locales (Figure 1.6) affirme que le sous-échantillonnage aléatoire du visage pourrait en fait altérer les processus normaux de traitement facial en rendant impossible le traitement du visage entier (p.ex., Orban de Xivry, Ramon, Lefèvre et Rossion, 2008). Il est cependant difficile de réconcilier cette interprétation avec des résultats comme ceux rapportés par Royer *et al.* (2015; 2018), où les individus les plus forts en ce qui concerne leur aptitude en reconnaissance faciale sont aussi ceux qui nécessitent le moins de signal et tolèrent le mieux le bruit dans les tâches de reconnaissance faciale. De plus, la méthode des bulles d'orientation implique une manipulation globale (c.-à-d. affectant toute l'image et non uniquement des régions locales de celle-ci, contrairement à la méthode des bulles de localisation). Ainsi, les bulles d'orientation n'empêchent pas la présentation d'un visage entier et ne devraient donc pas non plus empêcher l'utilisation des processus normaux de perception

faciale. Pourtant, les résultats de l'étude présentée au Chapitre III sont qualitativement et quantitativement similaires à ceux de Royer et coll. En effet, une association significative a été observée entre le ratio signal/bruit (SNR) dans la tâche des bulles d'orientation et le score d'aptitude en reconnaissance faciale, celle-ci expliquant 42% de la variance observée (dans les travaux de Royer *et al.*, cette valeur oscille entre 41% [2018] et 62% [2015]). De plus, à partir des résultats du Chapitre II, il est permis de supposer que ceux dont l'utilisation des horizontales est la plus sélective sont aussi ceux qui utilisent le plus systématiquement la région des yeux. Ces résultats renforcent donc la notion d'information diagnostique (c.-à-d. l'information utile à la tâche) et complètent tout un pan de la littérature scientifique (Gaspar *et al.*, 2008; Gold *et al.*, 2012; Gosselin et Schyns, 2001; Pachai *et al.*, 2013a; Royer *et al.*, 2015; Royer *et al.*, 2018; Sekuler *et al.*, 2004; Willenbockel *et al.*, 2010) qui tend à démontrer que la reconnaissance faciale repose en fait sur une partie limitée de l'information visuelle disponible (p.ex., les yeux, l'information spatiale horizontale, les fréquences spatiales entre 8 et 20 cycles par visage).

Les résultats présentés au Chapitre III contribuent donc à renforcer l'idée selon laquelle l'information horizontale joue un rôle prépondérant dans la perception faciale en démontrant un lien entre son utilisation sélective et la performance dans une tâche. De manière importante, ces résultats suggèrent que l'utilisation sélective de l'information horizontale n'est pas simplement un phénomène spécifique à une tâche donnée d'identification, mais que celle-ci se généralise également à des tâches bien normalisées de reconnaissance faciale. Enfin, ces résultats vont dans le sens de plusieurs études publiées ces dernières années faisant la démonstration que le traitement facial repose en fait sur une partie limitée de l'information totale disponible, variant selon la tâche.

5.2.3 L'asymétrie hémisphérique

Après avoir étudié les différences individuelles, une question intéressante qui pouvait être posée était celle des différences intrasujets. De nombreuses études comportementales (Rhodes, 1985; Sergent et Bindra, 1981), en neuroimagerie (p.ex., Kanwisher *et al.*, 1997; Yovel *et al.*, 2003) et portant sur des sujets cérébrolésés (p.ex., Barton, 2008a; Mayer et Rossion, 2006) ont au fil du temps révélé la dominance de l'hémisphère droit dans divers aspects du traitement facial. Sur le plan comportemental particulièrement, l'effet de supériorité du champ visuel gauche/hémisphère droit, c.-à-d. le fait que les visages qui sont présentés au champ visuel gauche/hémisphère droit sont traités plus efficacement que ceux présentés au champ visuel droit/hémisphère gauche, paraissait très intéressant à aborder selon la perspective du traitement des orientations spatiales. L'objectif du Chapitre IV était donc d'explorer le traitement des orientations spatiales dans les deux champs visuels/hémisphères afin de voir si la supériorité du champ visuel gauche/hémisphère droit pouvait être le fait d'un meilleur traitement de l'information diagnostique horizontale.

Les participants ont d'abord accompli une tâche d'identification de visages filtrés avec des bulles d'orientation et présentés durant 60 ms. Cette tâche avait pour but d'établir un profil de base auquel seraient subséquemment comparés les profils hémisphériques mesurés durant la seconde expérience. Comme attendu, les résultats ont montré que les participants utilisaient l'information située autour de l'axe horizontal pour identifier les visages.

Dans la seconde expérience, les participants ont accompli une tâche dans laquelle une sonde filtrée était présentée durant 60 ms, suivie d'une cible non filtrée durant 360 ms. Leur objectif consistait à indiquer si l'individu illustré par la sonde et la cible

était le même. À l'insu des participants, seule la moitié gauche ou la moitié droite du visage véhiculait de l'information; la moitié complémentaire étant occupée par un visage moyen. Ainsi, cette procédure a permis de mesurer, indépendamment pour chaque champ visuel/hémisphère, l'utilisation des orientations spatiales.

Les résultats ont montré que l'information autour de l'axe horizontal corrélait significativement avec la performance dans le champ visuel gauche/hémisphère droit, mais pas dans le champ visuel droit/hémisphère gauche. En fait, pour cette dernière condition, aucune information ne corrélait significativement avec la reconnaissance faciale, mais l'information horizontale diagnostique corrélait marginalement négativement. Ceci signifie que l'information horizontale, lorsque présentée au champ visuel droit/hémisphère gauche, pourrait en fait légèrement nuire à la reconnaissance faciale. De plus, lorsqu'on les compare directement, le champ visuel gauche/hémisphère droit utilise davantage l'information diagnostique horizontale, comparativement au champ visuel droit/hémisphère gauche; alors que ce dernier utilise davantage l'information verticale, comparativement au premier. L'expérience présentée au Chapitre IV a donc permis de démontrer que la supériorité du champ visuel gauche/hémisphère concorde avec une utilisation plus sélective de l'information faciale horizontale présentée dans ce champ visuel et donc, qu'elle pourrait être expliquée par l'implémentation par l'hémisphère cérébral droit d'une stratégie visuelle de traitement des orientations spatiales qui est mieux adaptée à la reconnaissance faciale.

5.3 Limites des études présentées

Dans la présente section, j'aborderai d'abord les limites communes aux expériences présentées au cours des précédentes pages. Je m'attarderai ensuite un peu plus à des limites particulières à chacune des expériences présentées. Je proposerai enfin, dans

la prochaine section, des pistes afin d'y remédier (voir Suggestions pour la recherche à venir, p. 127).

5.3.1 Limites générales

Une importante limite qui concerne toutes les expériences présentées dans la présente thèse est l'utilisation de tâches dans lesquelles la répétition de visages est considérable. Par exemple, en excluant les pratiques, chaque image aura été visionnée 48 fois en moyenne au cours des deux tâches de reconnaissance des expressions faciales composant le Chapitre II (et chaque identité, 336 fois); au Chapitre III, chaque image aura été visionnée 60 fois; et au Chapitre IV, chaque image aura été visionnée 110 fois. Une conséquence possible de cette importante répétition des images est la possibilité pour les participants de développer une stratégie d'appariement au gabarit (« *template-matching* ») qui serait basée sur les propriétés physiques de l'image plutôt que sur ses propriétés sémantiques, dénaturant ainsi le processus étudié et altérant par le fait même la corrélation observée (comparativement à la corrélation réelle) entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et l'aptitude en reconnaissance faciale telle que mesurée par des tâches orthogonales.

À cet effet, il est pertinent de mentionner quelques facteurs qui pourraient atténuer cette crainte. D'abord, les procédures de traitement d'image employées font en sorte que l'utilisation d'une stratégie d'appariement au gabarit serait très difficile. En effet, les bulles d'orientation (Chapitres II, III et IV) et le bruit blanc (Chapitres III et IV), font en sortes que les stimuli, même s'ils sont générés à partir des mêmes images, ne peuvent que rarement avoir exactement la même apparence physique. De plus, les résultats du Chapitre III montrent que l'utilisation sélective de l'information faciale horizontale corrèle avec l'aptitude en reconnaissance faciale. Or, cette dernière a été mesurée par trois tâches indépendantes dans lesquelles l'utilisation d'une stratégie

d'appariement au gabarit est difficile, voire impossible. Enfin, dans toutes ces expériences de bulles, les visages avaient été appris avant le début de l'expérimentation. Si cela était fait avec une stratégie d'appariement au gabarit, le passage de la pratique à la tâche expérimentale aurait été très ardu. Or, les participants à l'expérience présentée au Chapitre III toléraient dès les premiers blocs une quantité appréciable de bruit (contraste RMS variant approximativement entre environ 0,0006 chez les plus faibles et 0,001 chez les plus forts) et un faible signal (contraste RMS variant approximativement entre 0,0004 chez les plus forts et 0,0005 chez les plus faibles). À cet effet, la Figure C.1 ci-dessous illustre deux exemples de stimuli qui auraient pu être présentés aux plus forts (droite) et aux plus faibles (gauche) dans la tâche de bulle présentée dans le Chapitre III.

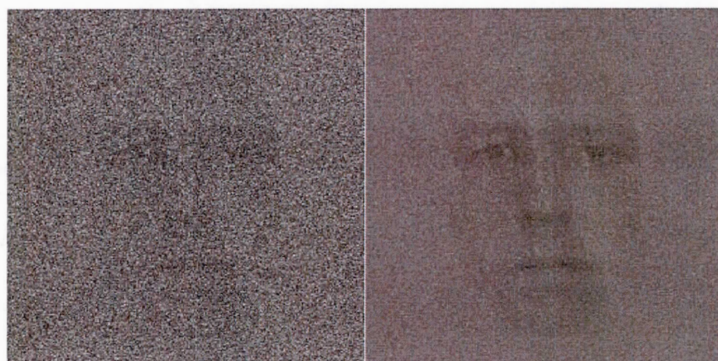


Figure 5.1. Exemple de stimuli présentés dans l'expérience d'identification et de différences individuelles (Chapitre III). L'image de gauche présente un stimulus qui aurait pu être présenté au participant avec la meilleure performance dans cette tâche (contraste RMS du visage = 0,0004; contraste RMS du bruit = 0,001). L'image de droite présente un stimulus qui aurait pu être présenté au participant avec la moins bonne performance dans cette tâche (contraste RMS du visage = 0,0005; contraste RMS du bruit = 0,0006). La différence entre ces deux stimuli est marquante et pourtant, dans les deux cas, le lecteur pourrait trouver difficile d'identifier ce visage comme celui de D.F. (pour une comparaison, voir la Figure 2.1a).

De plus, une analyse secondaire comparant la première à la seconde moitié de blocs de l'expérience présentée au Chapitre III montre également que l'utilisation sélective des horizontales au début et à la fin de l'expérience est fortement corrélée ($r = 0.7$, $p < 0,001$), suggérant que la stratégie optimale a été déployée assez tôt durant l'expérience. De plus, Royer *et al.* (2015) ont montré que plus les participants complètent d'essais avec les bulles (de localisation), plus la corrélation entre le nombre de bulles (c.-à-d. la quantité d'information requise) et les tâches orthogonales de reconnaissance faciale augmente (voir ci-dessous, p. 125). Ainsi, il semble davantage probable que les expositions répétées aux différents visages aient plutôt contribué à faire émerger la stratégie optimale d'utilisation sélective des horizontales (Pachai *et al.*, 2017), plutôt qu'une stratégie d'appariement au gabarit.

Une autre limite potentielle des présentes études concerne la distribution asymétrique d'énergie à travers les orientations spatiales faciales, qui favorise généralement les contrastes horizontaux. En effet, le visage contient plus d'énergie (c.-à-d. des contrastes de plus forte amplitude) dans les orientations horizontales que verticales et obliques. Il est donc possible que ceci explique l'importance systématique de cette orientation spatiale dans les images de classification calculées à partir des données de bulles d'orientation, puisque l'énergie n'a pas été égalisée à travers les orientations.

Or, certains facteurs inhérents aux études présentées dans cette thèse devraient permettre d'atténuer cette crainte chez le lecteur. D'abord, même en supposant un tel effet confondant, reste que les résultats obtenus avec les analyses des différences individuelles (Figures 1.5 et 2.2) et hémisphériques (Figure 3.4) sont protégés contre ce type d'artefact. De plus, certaines raisons permettent de croire que les autres résultats ne s'expliquent pas non plus par ce potentiel facteur confondant. En effet, bien que l'information disponible d'une image se trouve dans les contrastes,

l'information utile se trouve à la jonction de l'information disponible, des demandes de la tâche et des représentations de l'observateur (Gosselin & Schyns, 2004). Un contraste plus élevé ne signifie donc pas nécessairement qu'il y ait plus d'information utile pour une tâche donnée : par exemple, même si les visages contiennent plus d'énergie horizontale, l'information véhiculée par les contrastes verticaux est utilisée en plus grande mesure dans une tâche où l'observateur tente de déterminer si un regard est dirigé vers la gauche ou vers la droite (Goffaux, 2019). Idem pour la reconnaissance de la surprise, pour laquelle les participants humains utilisaient davantage l'information oblique-verticale et pour la reconnaissance de la peur, pour laquelle les participants utilisaient marginalement l'information verticale; ce malgré une plus grande disponibilité de l'information dans la bande horizontale (Figure 1.4). Ainsi, si toute information utile peut être associée à un contraste, tous les contrastes ne sont pas une source d'information utile à une tâche donnée. Qui plus est, il est possible de créer un observateur modèle afin de régler cette question (ex., Chapitre II), mais cela n'est pas toujours nécessaire, comme lorsque des conditions virtuellement identiques sont comparées entre elles (différences individuelles aux Chapitres II et III, différences hémisphériques au Chapitre IV).

5.3.2 Limites spécifiques

En considérant chaque étude séparément, on peut également constater certaines limites. Par exemple, le Chapitre II tentait de répondre à deux questions, soit d'une part l'utilisation des orientations spatiales horizontales pour la reconnaissance des expressions faciales et, d'autre part, l'utilisation des différentes régions faciales en lien avec l'utilisation des orientations spatiales. La méthode préconisée (deux tâches menées en parallèle avec deux méthodes de bulles différentes) a permis un examen précis de l'utilisation des orientations spatiales et de l'utilisation des traits faciaux. Cette méthode a été préconisée, car optimale pour répondre à l'objectif primaire, soit

l'étude des orientations spatiales. Le paradigme n'était cependant peut-être pas optimal pour une étude du lien entre l'utilisation des orientations et l'utilisation des traits faciaux. En effet, les analyses corrélationnelles permettent de conclure que ceux qui utilisent sélectivement l'information horizontale utilisent aussi davantage l'information de la région des yeux. Bien que le saut conceptuel soit facile à effectuer, ce résultat ne permet cependant pas de conclure hors de tout doute que ces participants utilisent davantage l'information horizontale véhiculée par les yeux.

En ce qui concerne l'expérience présentée au Chapitre III, Royer et coll. (2015) ont démontré que la corrélation entre le nombre de bulles de localisation (c.-à-d. l'information requise pour accomplir la tâche) et l'aptitude en reconnaissance faciale tend à augmenter avec le nombre d'essais complétés dans la tâche de bulles pour plafonner après approximativement 1 440 essais ($r_{120} = -0,47$; $r_{1440} = -0,78$; $r_{1800} = -0,79$). Or, la tâche de bulles (d'orientation) comptait seulement 600 essais. Ainsi, il est possible que la corrélation réelle entre le nombre de bulles d'orientations et l'utilisation sélective de l'information horizontale ($r = -0,59$), entre le nombre de bulles d'orientation et l'aptitude en reconnaissance faciale ($r = -0,65$), de même que celle entre l'utilisation sélective de l'information horizontale et l'aptitude en reconnaissance faciale ($r = 0,41$), aient toutes été sous-estimées. Trois similitudes avec d'autres ensembles de données indiquent cependant que cela pourrait ne pas être le cas. D'abord, la méthode des bulles d'orientation est potentiellement plus puissante et requière donc un moins grand nombre d'essais que celle des bulles de localisation, puisque l'espace mesuré y est plus petit. De plus, la corrélation observée entre le contraste RMS requis pour la reconnaissance d'expressions faciales et l'utilisation sélective de l'information horizontale ($r = 0,64$; Chapitre II) dans une tâche de 1 400 essais est similaire à celle obtenue entre le nombre de bulles d'orientation et l'utilisation sélective des horizontales, dans une tâche de reconnaissance faciale de 600 essais (Chapitre III). En outre, Royer *et al.* (2018) ont observé une corrélation

entre le nombre de bulles de localisation et l'aptitude en reconnaissance faciale ($r = -0,67$) similaire à celle obtenue entre le nombre de bulles d'orientation et l'aptitude en reconnaissance faciale (Chapitre III). Enfin, Royer *et al.* (2018) ont observé une corrélation entre l'aptitude en reconnaissance faciale et l'utilisation de la région des yeux ($r = 0,43$) similaire à celle obtenue entre l'aptitude en reconnaissance faciale et l'utilisation sélective de l'information horizontale (Chapitre III); or, on sait que l'utilisation de la région des yeux est modérément liée à l'utilisation sélective de l'information horizontale ($r = 0,54$; Chapitre II). De telles comparaisons sont certes risquées et la ressemblance pourrait être fortuite; reste que celle-ci est saillante et tempère la possibilité que la valeur des corrélations rapportées au Chapitre III soit en fait sous-estimée.

Enfin, l'étude présentée au Chapitre IV comporte également quelques limites qu'il importe de reconnaître. En effet, le paradigme employé est très atypique dans l'étude comportementale de l'asymétrie cérébrale en termes de traitement perceptif des visages et un paradigme plus standard aurait préconisé la présentation de visages entiers dans chacun des hémisphères (p.ex., Tadros *et al.*, 2013). De surcroît, le temps de présentation de la cible était très court, le signal était altéré par les bulles d'orientation et par l'ajout d'une faible quantité de bruit blanc, et enfin, la cible était masquée par une matrice de bruit blanc immédiatement suivant sa présentation. Ce paradigme a tout de même été préconisé, car il permettait de présenter les visages en vision centrale et permettait de ce fait l'adoption d'une fixation plus près de sa position naturelle ou optimale pour le traitement facial (p.ex., Peterson et Eckstein, 2012). Les temps de présentations limités avaient aussi l'avantage d'empêcher les participants d'amorcer une saccade oculaire avant la fin de la présentation du stimulus. Un autre avantage des courts temps de présentations utilisés est que la très grande majorité des participants ne s'est pas rendu compte du subterfuge (en l'occurrence, la présence d'information dans une seule moitié du visage) et ne s'en

est donc pas laissé distraire. Des temps de présentation plus longs auraient certainement mené à une plus faible efficacité du subterfuge. En contrepartie cependant, le paradigme utilisé a aussi en toute vraisemblance eu la conséquence d'introduire une quantité non négligeable de bruit dans les vecteurs de classification, ce qui permettrait d'expliquer, du moins en partie, la différence entre les scores z obtenus aux Chapitres II et III et ceux obtenus au Chapitre IV. Qu'à cela ne tienne, les résultats de cette étude suggèrent tout de même que le système visuel peut, moyennant un certain apprentissage, très rapidement traiter l'information visuelle diagnostique, même lorsque celle-ci est fortement dégradée.

5.4 Suggestions pour la recherche à venir

À la lueur des précédentes sections, je propose maintenant quelques pistes à explorer, d'abord pour i) remédier aux limites soulevées ci-dessus, mais également dans l'optique de ii) vérifier, compléter ou renforcer les présents résultats et enfin, iii) repousser les frontières des connaissances dans le domaine de la perception des visages humains.

5.4.1 Suggestions générales

Une limite possible partagée par toutes les études présentées dans cette thèse concerne la répétition des images. Ainsi, il serait pertinent, voire important, de reproduire les observations étayées dans le présent ouvrage en introduisant une plus grande variété dans les images. Cela pourrait par exemple être avec l'utilisation d'un paradigme d'appariement à travers des points de vue divergents (p.ex., Pachai *et al.*, 2013a; Royer *et al.*, 2015) ou à travers des conditions de visionnement différentes (p.ex., éclairage, réfraction de la lentille ayant pris la photo, expressions faciales

d'émotions, couvre-chef, chevelure, etc.), tel que cela est fait dans les tâches normalisées comme le CFMT et le GFMT. Toutes ces manipulations rendraient d'autant plus difficile l'utilisation d'une stratégie visuelle d'appariement au gabarit et nous informeraient véritablement sur l'information qui constitue l'identité faciale d'une personne, indépendamment de tous les facteurs qui peuvent faire en sortes qu'une personne ait une apparence différente.

À terme, cette meilleure compréhension de l'information constituant l'identité faciale à proprement parler pourrait nous permettre de mieux comprendre le défi que peuvent représenter non seulement l'identification, mais également la reconnaissance des expressions faciales. En effet, bien que la prosopagnosie (Bodamer, 1947) soit principalement associée à un déficit de traitement de l'identité, elle peut dans certains cas être associée à un déficit dans la reconnaissance des expressions faciales (Fiset *et al.*, 2017; Humphreys *et al.*, 2007) et même, dans les cas extrêmes, à une incapacité de différencier deux visages qui sont côte à côte (prosopagnosie aperceptive; De Renzi, Faglioni, Grossi et Nichelli, 1991). L'étude d'un cas notable de prosopagnosie acquise (PS; Mayer et Rossion, 2006) a par exemple permis de montrer que cette patiente n'utilise pas la région des yeux pour l'identification faciale (Caldara *et al.*, 2005), ni pour la reconnaissance des expressions faciales (p.ex., Fiset *et al.*, 2017), contrairement à des sujets neurologiquement sains, ce qui pourrait expliquer les déficits qu'elle éprouve avec la perception des visages. Considérant le lien étroit entre l'utilisation de la région des yeux et l'utilisation de l'information faciale horizontale (Chapitre II), il serait donc de la plus grande importance de vérifier si la prosopagnosie entraîne une réduction de l'utilisation sélective de l'information horizontale dans les tâches de reconnaissance faciale et de reconnaissance des expressions faciales.

Les études sur les différences individuelles présentées aux Chapitres II et III indiquent que cela pourrait être le cas, puisque les individus avec les plus faibles niveaux d'aptitudes sont aussi ceux qui démontrent l'utilisation la moins sélective de l'information faciale horizontale, et ce, tant pour la reconnaissance faciale (Chapitre III) que pour la reconnaissance d'expressions faciales (Chapitre II). Or, ces deux études ont été menées chez des sujets normaux. Afin de pousser plus loin cet examen, il serait donc avisé d'avoir recours à un plus large éventail de performance, englobant par exemple des individus atteints de prosopagnosie développementale ($< 5^{\text{e}}$ percentile dans différents tests normalisés) et des « super reconnaisseurs » (*super recognizers*; $> 95^{\text{e}}$ percentile), tel que cela fut fait par Tardif et coll. (2019). Dans le même ordre d'idées, il serait pertinent d'étudier le chevauchement entre les stratégies d'utilisation des orientations spatiales déployées pour la reconnaissance des expressions faciales et pour l'identification faciale dans ce même type d'échantillon. Ceci permettrait par exemple de statuer sur le niveau de dissociation entre les mécanismes perceptifs impliqués dans le traitement de l'identité faciale et ceux impliqués dans le traitement des expressions faciales. En effet, la question demeure contentieuse, à savoir : si le traitement des expressions faciales et de l'identité est essentiellement indépendant (p.ex., Haxby *et al.*, 2000), ou s'il existe des voies ou des mécanismes de traitement partagé (Duchaine et Yovel, 2015). Les résultats d'une telle étude pourraient également, par le fait même, d'ouvrir la voie vers le développement de programmes d'apprentissage perceptif basés sur l'entraînement à l'utilisation sélective de l'information diagnostique (horizontale).

Une autre question qui devrait être explorée est celle de la dissociation de l'influence des traitements ascendant et descendant qui devrait, dans le même ordre d'idées, permettre de déterminer si l'utilisation de l'information horizontale se généralise au traitement facial ou des objets plus globalement, ou si celle-ci dépend de la tâche ou des traits impliqués dans la réalisation de la tâche. À cet effet, la corrélation partielle

présentée au Chapitre III, les résultats récents de Goffaux (2019) sur la direction du regard et ceux de Huynh et Balas (2014) sur l'orientation de l'image faciale sont informatifs, car ils mettent en lumière le fait que les stratégies mises en œuvre par le système visuel peuvent être adaptées afin de répondre aux besoins de la tâche, permettant l'extraction de l'information diagnostique. Afin de poursuivre l'exploration de ce questionnement, il serait donc pertinent d'examiner l'utilisation des orientations spatiales dans différentes tâches de traitement facial. Les tâches de jugements sociaux (p.ex., dignité de confiance, apparence de dominance) sont un premier exemple probant. En effet, Robinson et al. (2014) ont montré que les jugements de confiance dépendent largement de la région des yeux et de la bouche, alors que les jugements de dominance dépendent plutôt du haut du visage (front et sourcils) et du contour de la mâchoire. Il serait donc intéressant de voir si différentes orientations spatiales sont utilisées pour ces deux types de jugements faciaux, lesquels reposent sur des régions faciales distinctes. La catégorisation ethnique est un autre exemple de traitement facial qu'il serait intéressant d'explorer, particulièrement sous l'angle de l'effet d'autre ethnie, c.-à-d. lorsque les visages d'une autre ethnie sont plus difficiles à mémoriser et reconnaître que les visages de sa propre ethnie (Malpass et Kravitz, 1969). Selon une hypothèse populaire, l'effet d'autre ethnie s'expliquerait par le fait que la catégorisation des gens d'autre ethnie dans l'« exogroupe » serait un processus automatique, mais pas la catégorisation des gens de même ethnie dans l'« endogroupe » (Hugenberg, 2010). Conséquemment, les stratégies visuelles d'identification pourraient être déployées sans problème pour les individus de même ethnie, mais être empêchées par le déploiement automatique des stratégies visuelles de catégorisation ethnique lorsque nous sommes face à des individus appartenant à l'exogroupe. Ainsi, on pourrait vérifier si l'utilisation des orientations spatiales est la même pour ces deux processus et de surcroît, vérifier à l'aide d'une approche de différences individuelles si la stratégie déployée dans une tâche donnée (p.ex., identification ou confiance) est liée à la stratégie mise en œuvre dans l'autre tâche (p.ex., catégorisation ethnique ou dominance, respectivement).

5.4.2 Suggestions particulières

Tel que précédemment mentionné, le paradigme employé dans le Chapitre II permet de statuer que les participants qui utilisent l'information horizontale utilisent l'information dans la région des yeux, mais il ne permet pas d'établir que les participants qui utilisent l'information horizontale utilisent celle provenant de la région des yeux. Pour ce faire, une prochaine étape pourrait être de vérifier directement le lien entre les orientations spatiales et l'information locale avec une méthode mieux adaptée. Une possibilité serait d'employer une procédure de masquage d'orientations par régions d'intérêt et vérifier séparément pour les différents traits faciaux (ex., yeux, sourcils, nez, bouche, etc.) quelles sont les régions faciales pour lesquelles l'orientation est primordiale et, le cas échéant, quelle est cette orientation (p.ex., Pachai *et al.*, 2013b). Une meilleure procédure serait cependant la randomisation de l'orientation d'ondelettes, qui est une méthode paramétrique sans *a priori* (Honey, Kirchner et VanRullen, 2008), tout comme les bulles (de localisation, d'orientation). Jumelée à une technique d'analyse d'image de classification, la randomisation de l'orientation d'ondelettes serait mieux adaptée, car elle permettrait de déterminer de façon indépendante les régions faciales et les fréquences spatiales pour lesquelles l'orientation est importante et, le cas échéant, quelle est cette orientation. De plus, la méthode permettrait de déterminer la largeur de bande de cette orientation locale, car la randomisation signifie que les changements d'orientation seront parfois importants (p.ex., ≈ 90 degrés) et parfois mineurs (ex., ≈ 1 degré). D'une part, dès lors que le traitement local d'une orientation est moins sélectif, un changement majeur devrait avoir un plus grand effet sur la performance, comparativement à un changement mineur. D'autre part, selon que la largeur de bande est plus/moins étroite et donc, que le traitement d'une orientation est plus/moins sélectif, un changement mineur devrait avoir un effet plus/moins important, respectivement. La méthode de randomisation de l'orientation d'ondelettes serait donc non seulement idéale pour une étude de l'importance des orientations

horizontales dans la région des yeux, mais également pour l'importance des orientations locales de l'image plus généralement.

Dans le même esprit que ce qui a été accompli au Chapitre II, il serait pertinent de vérifier que le lien entre l'utilisation de l'information des yeux et l'aptitude en reconnaissance de visages (Royer *et al.*, 2018) est supporté par le traitement de l'information horizontale, tel que proposé dans la discussion du Chapitre III. Cela pourrait être effectué de la même façon que dans le Chapitre II, c'est-à-dire en administrant aux mêmes sujets une tâche de bulles de localisation et une tâche de bulles d'orientation puis en créant un modèle de régression. Autrement, cela pourrait être fait avec la méthode de randomisation de l'orientation d'ondelettes mentionnée ci-dessus. En outre, il serait pertinent de reproduire cette étude en augmentant le nombre d'essais à au moins 1 440 afin de vérifier que la valeur de la corrélation rapportée dans le Chapitre III ne sous-estime pas les paramètres réels de cette association statistique.

En ce qui concerne l'étude présentée au Chapitre IV, de nombreuses voies s'offrent aux chercheurs s'intéressant aux différences hémisphériques, puisque cette dernière fait figure de pionnière dans le domaine. Ainsi, une première étape importante pourrait être de tenter de reproduire les résultats de la présente étude en utilisant un paradigme classique de présentation latéralisée (ex., Tadros *et al.*, 2013). Il pourrait aussi être justifié de soumettre un plus grand nombre de participants à un plus grand nombre d'essais afin d'améliorer le ratio signal/bruit des vecteurs de classification générés. Puis, afin de ne pas prolonger indûment l'expérience, la mesure des mouvements oculaires pourrait possiblement être laissée de côté, puisque les données ont montré que les participants respectaient les consignes relatives à la fixation centrale et l'abstention de cligner des yeux dans environ 97,5% des essais. Au-delà de la réplication, il serait intéressant d'explorer les stratégies visuelles d'utilisation des

orientations spatiales par les hémisphères cérébraux dans différentes tâches (p.ex., détection de grilles sinusoïdales, reconnaissance d'objets, lecture) afin de vérifier si les différentes spécialisations hémisphériques se traduisent en différences de sensibilité ou de sélectivité pour de l'information visuelle. Il serait également intéressant de vérifier si les différents indicateurs d'asymétrie en neuroimagerie reflètent également une asymétrie dans la sélectivité de l'hémisphère droit pour l'information horizontale (p.ex., asymétrie de l'amplitude de la N170), potentiellement en utilisant une technique d'analyse par essai singulier (*single-trial*), tel que cela fut effectué par Rousselet *et al.* (2014; voir aussi, pour une méthode similaire, Schyns, Petro et Smith, 2007). Il serait également pertinent d'étudier la question en adoptant une approche de différences individuelles afin de vérifier si l'asymétrie hémisphérique peut être expliquée par des différences de sélectivité pour l'information faciale horizontale ou par des différences d'expertise dans la reconnaissance faciale. Par exemple, on pourrait tenter de répondre aux questions suivantes : les plus sélectifs pour l'information faciale horizontale ont-ils un hémisphère droit plus dominant; les individus qui ont un effet de supériorité du champ visuel gauche plus marqué utilisent-ils davantage l'information faciale horizontale; l'asymétrie cérébrale de sélectivité pour l'information faciale horizontale corrèle-t-elle avec l'aptitude en reconnaissance faciale; les individus qui ont un effet de supériorité du champ visuel gauche plus marqué sont-ils généralement meilleurs dans les tâches orthogonales de reconnaissance faciale? De plus, la localisation des lésions cérébrales et particulièrement, l'étude des stratégies atypiques associées dans les cas de prosopagnosie (acquise ou développementale) pourraient nous aider à comprendre l'origine des stratégies atypiques ou compensatoires observées dans certains cas (p.ex., utilisation de la bouche; Caldara *et al.*, 2005; Fiset *et al.*, 2017). On pourrait donc par exemple vérifier si une lésion de l'hémisphère droit entraîne une diminution relative de l'utilisation de l'information faciale horizontale (diagnostique), ou une augmentation de l'utilisation de l'information verticale (anti-diagnostique). Il serait également intéressant d'examiner les stratégies visuelles chez des patients avec

une agnosie visuelle dont l'atteinte concerne l'hémisphère gauche et épargne l'hémisphère droit. Le cas échéant, cela permettrait possiblement de comprendre pourquoi les lésions unilatérales de l'hémisphère droit entraînent plus souvent une prosopagnosie que les lésions unilatérales de l'hémisphère gauche.

5.5 Conclusion

Le traitement des orientations spatiales horizontales du visage est un aspect essentiel du traitement perceptif des visages, notamment en ce qui concerne la reconnaissance des expressions faciales (Chapitre II) et l'identification faciale (Chapitre III). Dans les deux cas, les différences individuelles d'aptitude en reconnaissance faciale (Chapitre III) ou d'expressions faciales (Chapitre II) corrélerent avec l'utilisation sélective de l'information faciale horizontale. De plus, l'hémisphère droit, réputé spécialisé dans le traitement perceptif des visages, semble préconiser le traitement de l'information diagnostique horizontale (Chapitre IV). Ensemble, les résultats de la présente thèse contribuent à renforcer le statut unique dont bénéficient les orientations spatiales horizontales depuis quelques années et à cimenter le rôle crucial que joue cette information dans le traitement perceptif des visages.

RÉFÉRENCES

- Allard, R. et Faubert, J. (2008). The noisy-bit method for digital displays: Converting a 256 luminance resolution into a continuous resolution. *Behavior Research Methods*, 40(3), 735–743.
- Balas, B. J. et Huynh, C.M. (2015). Face and body emotion recognition depend on different orientation sub-bands. *Visual Cognition*, 23(6), 659-677.
- Balas, B., Huynh, C., Saville, A. et Schmidt, J. (2015). Orientation biases for facial emotion recognition during childhood and adulthood. *J Exp Child Psychol*, 140, 171-183. doi:10.1016/j.jecp.2015.07.006
- Balas, B. J., Schmidt, J. et Saville, A. (2015). A face detection bias for horizontal orientations develops in middle childhood. *Frontiers in Psychology*, 6, 772.
- Barton, J. S. (2008a). Structure and function in acquired prosopagnosia: Lessons from a series of 10 patients with brain damage. *Journal of Neuropsychology*, 2, 197-225.
- Barton, J. S. (2008b). Prosopagnosia associated with a left occipitotemporal lesion. *Neuropsychologia*, 46(8), 2214-2224. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2008.02.014
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E. et McCarthy, E. (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 551-565.
- Blais, C., Roy, C., Fiset, D., Arguin, M. et Gosselin, F. (2012). The eyes are not the window to basic emotions. *Neuropsychologia*, 50(12), 2830-2838.
- Blais, C., Fiset, D., Roy, C., Saumure Régimbald, C. et Gosselin, F. (2017). Eye fixation patterns for categorizing static and dynamic facial expressions. *Emotion*, 17(7), 1107–1119.

- Bodamer, J. (1947). Die prosop-agnosie. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 179(1-2), 6-53.
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial vision*, 10(4), 433-436.
- Burton, A. M., White, D. et McNeill, A. (2010). The Glasgow Face Matching Test. *Behav Res Methods*, 42(1), 286-291. doi:10.3758/BRM.42.1.286
- Butler, S., Blais, C., Gosselin, F., Bub, D. et Fiset, D. (2010). Recognizing famous people. *Attention, Perception et Psychophysics*, 72(6), 1444-1449.
- Caldara, R., Schyns, P., Mayer, E., Smith, M. L., Gosselin, F. et Rossion, B. (2005). Does prosop-agnosia take the eyes out of face representations? Evidence for a defect in representing diagnostic facial information following brain damage. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(10), 1652-1666.
- Calvo, M. G., Fernández-Martín, A. et Nummenmaa, L. (2014). Facial expression recognition in peripheral versus central vision: role of the eyes and the mouth. *Psychological research*, 78(2), 180-195.
- Chauvin, A., Worsley, K. J., Schyns, P. G., Arguin, M. et Gosselin, F. (2005). Accurate statistical tests for smooth classification images. *Journal of Vision*, 5(9), 1. doi:10.1167/5.9.1
- Costen, N. P., Parker, D. M. et Craw, I. (1996). Effects of high-pass and low-pass spatial filtering on face identification. *Attention, Perception et Psychophysics*, 58(4), 602-612.
- Dakin, S. C. et Watt, R. J. (2009). Biological “bar codes” in human faces. *Journal of Vision*, 9(4), 2. doi:10.1167/9.4.2
- Damasio, A. R., Tranel, D. et Damasio, H. (1990). Face agnosia and the neural substrates of memory. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 89-109. doi:10.1146/annurev.ne.13.030190.000513
- DeGutis, J., Wilmer, J., Mercado, R. J. et Cohan, S. (2013). Using regression to measure holistic face processing reveals a strong link with face recognition ability. *Cognition*, 126(1), 87-100. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.09.004>.

- De Renzi, E. et di Pellegrino, G. (1998). Prosopagnosia and alexia without object agnosia. *Cortex*, 34(3), 403-415.
- De Renzi, E., Faglioni, P., Grossi, D. et Nichelli, P. (1991). Apperceptive and associative forms of prosopagnosia. *Cortex*, 27(2), 213-221.
- De Valois, R. L., Albrecht, D. G. et Thorell, L. G. (1982). Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22(5), 545-559.
- De Valois, R. L. et De Valois, K. K. (1990). *Spatial Vision*. New York (NY): Oxford University Press.
- dos Santos, N. A., Andrade, S. M. et Fernandez Calvo, B. (2013). Detection of spatial frequency in brain-damaged patients: influence of hemispheric asymmetries and hemineglect. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 92.
doi:10.3389/fnhum.2013.00092
- Duchaine, B., Germine, L. et Nakayama, K. (2007). Family resemblance: Ten family members with prosopagnosia and within-class object agnosia. *Cognitive Neuropsychology*, 24(4), 419-430.
- Duchaine, B. et Nakayama, K. (2006). The Cambridge Face Memory Test: Results for neurologically intact individuals and an investigation of its validity using inverted face stimuli and prosopagnosic participants. *Neuropsychologia*, 44, 576-585.
- Duchaine, B. et 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. et Fiset, D. (2017). Orientations for the successful categorization of facial expressions and their link with facial features. *Journal of Vision*, 17(14), 7.
- Dunlap, K. (1927). The role of eye-muscles and mouth-muscles in the expression of the emotions. *Genetic Psychology Monographs*.
- Eckstein, M. P. et Ahumada Jr., A. J. (2002). Classification images: A tool to analyze visual strategies. *Journal of Vision*, 2(1), i. doi:doi: 10.1167/2.1.i.

- Eimer, M. (2011). The Face-Sensitive N170 Component of the Event-Related Brain Potential. Dans A. J. Calder, G. Rhodes, M. H. Johnson et J. V. Haxby (Dir.), *The Oxford Handbook of Face Perception* (p. 329-344). Oxford (Royaume-Uni): Oxford University Press.
- Eimer, M., Gosling, A. et Duchaine, B. (2012). Electrophysiological markers of covert face recognition in developmental prosopagnosia. *Brain*, 135(2), 542-554.
- Eisenbarth, H. et Alpers, G.W. (2011). Happy mouth and sad eyes: scanning emotional facial expressions. *Emotion*, 11(4), 860-865.
- Ekman, P. et Friesen, W.V. (1975). *Unmasking the face*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall.
- Ellis, H.D. et Florence, M. (1990). Bodamer's (1947) paper on prosopagnosia. *Cognitive neuropsychology*, 7(2), 81-105.
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A. et Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41, 1149-1160.
- Fiset, D. et Gosselin, F. (2009). L'information visuelle efficace pour la reconnaissance des visages. Dans Barbeau, E., Jouvert, S. et Felician, O (Dir.). *Traitement et reconnaissance des visages: du percept à la personne*, (p. 143-164). Paris (France): Solal.
- Fiset, D., Blais, C., Royer, J., Richoz, A.R., Dugas, G. et Caldara, R. (2017). Mapping the impairment in decoding static facial expression of emotions in prosopagnosia. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(8), 1334-1341.
- Furl, N., Garrido, L., Dolan, R.J., Driver, J. et Duchaine, B. (2011). Fusiform gyrus selectivity relates to individual differences in facial recognition ability. *Journal of Cognitive Neuroscience*. doi:10.1162/jocn.2010.21545
- Galton, F. (1883). *Inquiries into human faculty and its development*. London (Royaume-Uni): Macmillan.

- Gaspar, C. M., Sekuler, A.B. et Bennett, P.J. (2008). Spatial frequency tuning of upright and inverted face identification. *Vision Research*, 48, 2817-2826.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J. C. et Anderson, A. W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neuroscience*, 3(2), 191-197. doi:10.1038/72140
- Ghuman, A. S., Brunet, N. M., Li, Y., Konecky, R. O., Pyles, J. A., Walls, S. A., . . . Richardson, R. M. (2014). Dynamic encoding of face information in the human fusiform gyrus. *Nat Commun*, 5, 5672. doi:10.1038/ncomms6672
- Goffaux, V. (2019). Fixed or flexible? Orientation preferences in identity and gaze processing in humans. *PLoS One*, 14(1), e0210503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210503>
- Goffaux, V. et Dakin, S.C. (2010). Horizontal information drives the behavioral signatures of face processing. *Frontiers in psychology*, 1, 143.
- Goffaux, V., Duecker, F., Hausfeld, L., Schiltz, C. et Goebel, R. (2016). Horizontal tuning for faces originates in high-level Fusiform Face Area. *Neuropsychologia*, 81, 1-11. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.12.004
- Goffaux, V. et Greenwood, J.A. (2016). The orientation selectivity of face identification. *Scientific Reports*, 6, 34204. doi: 10.1038/srep34204
- Goffaux, V., Hausfeld, L., Schiltz, C. et Goebel, R. (2016). Horizontal tuning for faces originates in high-level Fusiform Face Area. *Neuropsychologia*, 81, 1-17. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.12.004.
- Goffaux, V., Poncin, A. et Schiltz, C. (2015). Selectivity of Face Perception to Horizontal Information over Lifespan (from 6 to 74 Year Old). *PLoS ONE*, 10(9), e0138812. doi:10.1371/journal.pone.0138812
- Goffaux, V., van Zon, J. et 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. doi:10.1167/11.10.1

- Gold, J., Bennett, P. J. et Sekuler, A. B. (1999). Identification of band-pass filtered letters and faces by human and ideal observers. *Vision research*, 39(21), 3537-3560.
- Gold, J. M., Mundy, P.J. et Tjan, B.S. (2012). The Perception of a Face Is No More Than the Sum of Its Parts. *Psychological Science*, 23(4), 427-434.
- Gosselin, F. et Schyns, P. G. (2001). Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision research*, 41(17), 2261-2271.
- Gosselin, F. et 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.
- Graham, D.J., Chandler, D.M. et Field, D.J. (2006). Can the theory of “whitening” explain the center-surround properties of retinal ganglion cell receptive fields? *Vision Research*, 46(18), 2901-2913.
- Hashemi, A., Pachai, M.V., Bennett, P.J. et Sekuler, A.B. (2018). The role of horizontal facial structure on the N170 and N250. *Vision Research*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.02.006>
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A. et Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 223-233.
- Honey, C., Kirchner, H. et VanRullen, R. (2008). Faces in the cloud: Fourier power spectrum biases ultrarapid face detection. *J Vis*, 8(12), 1-13. doi:10.1167/8.12.9
- Humphreys, K., Avidan, G. et Behrmann, M. (2007). A detailed investigation of facial expression processing in congenital prosopagnosia as compared to acquired prosopagnosia. *Experimental Brain Research*, 176(2), 356-373.
- Huynh, C. M. et Balas, B. (2014). Emotion recognition (sometimes) depends on horizontal orientations. *Attention, Perception et Psychophysics*, 76(5), 1381-1392.
- Izard, C. (1971). *The face of emotion*. New York (NY): Appleton-Century-Crofts.

- Jack, R. E., Garrod, O. G. B. et Schyns, P. G. (2014). Dynamic facial expressions of emotion transmit an evolving hierarchy of signals over time. *Current Biology*, 24(2), 187–192.
- Jack, R. E. et Schyns, P. G. (2015). The human face as a dynamic tool for social communication. *Current Biology*, 25(14), R621-R634.
- Jack, R. E., Sun, W., Delis, I., Garrod, O. G. B. et Schyns, P. G. (2016). Four Not Six: Revealing Culturally Common Facial Expressions of Emotion. *Journal of Experimental Psychology: General*. 145(6), 708-730. doi: 10.1037/xge0000162
- Jacques, C., Schiltz, C. et Goffaux, V. (2014). Face perception is tuned to horizontal orientation in the N170 time window. *Journal of vision*, 14(2), 5. doi: 10.1167/14.2.5.
- Kanwisher, N., McDermott, J. et Chun, M.M. (1997). The Fusiform Face Area: A Module in Human Extrastriate Cortex Specialized for Face Perception. *The Journal of Neuroscience*, 17(11), 4302-4311.
- Kauffmann, L., Ramanoël, S. et Peyrin, C. (2014). The neural bases of spatial frequency processing during scene perception. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8, 37. doi:10.3389/fnint.2014.00037
- Keenan, P. A., Whitman, R. D. et Pepe, J. (1989). Hemispheric asymmetry in the processing of high and low spatial frequencies: a facial recognition task. *Brain Cogn*, 11(2), 229-237.
- Keil, M. S., Lapedriza, A., Masip, D. et Vitria, J. (2008). Preferred spatial frequencies for human face processing are associated with optimal class discrimination in the machine. *PLoS ONE*, 3(7), e2590. doi:10.1371/journal.pone.0002590
- Keil, M. S. (2009). "I Look in Your Eyes, Honey": Internal Face Features Induce Spatial Frequency Preference for Human Face Processing. *PLoS Computational Biology*, 5(3), e1000329.
- Landis, T., Cummings, J. L., Christen, L., Bogen, J. E. et Imhof, H. G. (1986). Are unilateral right posterior cerebral lesions sufficient to cause prosopagnosia? Clinical and radiological findings in six additional patients. *Cortex*, 22(2), 243-252.

- Lee, I. A. et Preacher, K. J. (2013, September). Calculation for the test of the difference between two dependent correlations with one variable in common [logiciel]. Récupéré de <http://quantpsy.org>.
- Levy, J., Heller, W., Banich, M.T. et Burton, L.A. (1983a). Asymmetry of Perception in Free Viewing of Chimeric Faces. *Brain and Cognition*, 2, 404-419.
- Levy, J., Heller, W., Banich, M.T. et Burton, L.A. (1983b). Are Variations Among Right-Handed Individuals in Perceptual Asymmetries Caused by Characteristic Arousal Differences Between Hemispheres? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(3), 329-359.
- Lundqvist, D., Flykt, A. et Öhman, A. (1998). The Karolinska Directed Emotional Faces - KDEF, CD ROM from Department of Clinical Neuroscience, Psychology section, Karolinska Institutet, ISBN 91-630-7164-9.
- Malpass, R. S., & Kravitz, J. (1969). Recognition for faces of own and other race. *Journal of Personality and Social Psychology*, 13(4), 330-334. <http://dx.doi.org/10.1037/h0028434>
- Mattson, A. J., Levin, H. S. et Grafman, J. (2000). A case of prosopagnosia following moderate closed head injury with left hemisphere focal lesion. *Cortex*, 36(1), 125-137.
- Maurer, D., Grand, R. L. et Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends Cogn Sci*, 6(6), 255-260.
- Näsänen, R. (1999). Spatial frequency bandwidth used in the recognition of facial images. *Vision research*, 39(23), 3824-3833.
- Nielsen, J. A., Zielinski, B. A., Ferguson, M. A., Lainhart, J. E. et Anderson, J. S. (2013). An evaluation of the left-brain vs. right-brain hypothesis with resting state functional connectivity magnetic resonance imaging. *PLoS ONE*, 8(8), e71275. doi:10.1371/journal.pone.0071275
- Ojanpää, H. et Näsänen, R. (2003). Utilisation of spatial frequency information in face search. *Vision Research*, 43, 2505-2515.

- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Orban de Xivry, J.J., Ramon, M., Lefèvre, P. et Rossion, B. (2008). Reduced fixation on the upper area of personally familiar face following acquired prosopagnosia. *Journal of Neuropsychology*, 2, 245-268.
- Pachai, M. V., Bennett, P. J. et Sekuler, A. B. (2018). The Bandwidth of Diagnostic Horizontal Structure for Face Identification. *Perception*, 47(4), 397-413. doi:10.1177/0301006618754479
- Pachai, M.V., Sekuler, A.B. et Bennett, P.J. (2013a). Sensitivity to information conveyed by horizontal contours is correlated with face identification accuracy. *Frontiers in psychology*, 4, 74. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00074
- Pachai, M. V., Sekuler, A. B. et Bennett, P. J. (2013b). Masking of individual facial features reveals the use of horizontal structure in the eyes. *Journal of Vision*, 13(9), 411. doi:10.1167/13.9.411
- Pachai, M. V., Sekuler, A. B., Bennett, P. J., Schyns, P. G. et Ramon, M. (2017). Personal familiarity enhances sensitivity to horizontal structure during processing of face identity. *Journal of Vision*, 17(6), 5.
- Pancaroglu, R., Hills, C.S., Sekunova, A., Viswanatha, J., Duchaine, B et Barton, J.J. (2016). Seeing the eyes in acquired prosopagnosia. *Cortex*, 81, 251-265.
- Parton, A., Malhotra, P. et Husain, M. (2004). Hemispatial neglect. *Journal of Neurology, Neurosurgery et Psychiatry*, 75(1), 13-21.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial vision*, 10(4), 437-442.
- Peterson, M. F. et Eckstein, M. P. (2012). Looking just below the eyes is optimal across face recognition tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109(48), E3314-E3323.
- Richler, J. J., Cheung, O. S. et Gauthier, I. (2011). Holistic processing predicts face recognition. *Psychological science*, 22(4), 464-471.

- Rhodes, G. (1985). Lateralized processes in face recognition. *British Journal of Psychology*, 76, 249-271.
- Robbins, R. et McKone, E. (2007). No face-like processing of objects-of-expertise in three behavioural tasks. *Cognition*, 103(1), 34-79.
- Robinson, K., Blais, C., Duncan, J., Forget, H. et Fiset, D. (2014). The dual nature of the human face: there is a little Jekyll and a little Hyde in all of us. *Frontiers in Psychology*, 5:139.
- Rossion, B. (2008). Picture-plane inversion leads to qualitative changes of face perception. *Acta Psychologica*, 128(2), 274-289.
- Rossion, B. (2014). Understanding face perception by means of human electrophysiology. *Trends in cognitive sciences*, 18(6), 310-318.
- Rossion, B. et 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, 1297-1311.
- Rossion, B., Dricot, L., Devolder, A., Bodart, J.-M., Crommelinck, M., de Gelder, B. et Zoontjes, R. (2000). Hemispheric Asymmetries for Whole-Based and Part-Based Face Processing in the Human Fusiform Gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 793-802.
- Rossion, B., Gauthier, I., Tarr, M.J., Despland, P., Bruyer, R., Linottes, S. et 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), 69-74.
- Rossion, B. et Gauthier, I. (2002). How Does the Brain Process Upright and Inverted Faces? *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 1(1), 62-74.
- Rossion, B., Hanseeuw, B. et Dricot, L. (2012). Defining face perception areas in the human brain: a large-scale factorial fMRI face localizer analysis. *Brain Cogn*, 79(2), 138-157. doi:10.1016/j.bandc.2012.01.001

- Rossion, B., Kaiser, M. D., Bub, D. et Tanaka, J. W. (2009). Is the loss of diagnosticity of the eye region of the face a common aspect of acquired prosopagnosia?. *Journal of Neuropsychology*, 3(1), 69-78.
- Rousselet, G. A., Ince, R. A., van Rijsbergen, N. J. et Schyns, P. G. (2014). Eye coding mechanisms in early human face event-related potentials. *Journal of Vision*, 14(13):7, 1–24, doi:10.1167/14.13.7.
- Roy, C., Fiset, D., Taschereau-Dumouchel, V., Gosselin, F. et Rainville, P. (2013). A refined examination of the facial cues contributing to vicarious effects on self-pain and spinal responses. *The Journal of Pain*, 14, 1475–1484.
- Royer, J., Blais, C., Gosselin, F., Duncan, J. et 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), 1179–1183.
- Royer, J., Blais, C., Charbonneau, I., Dery, K., Tardif, J., Duchaine, B., . . . Fiset, D. (2018). Greater reliance on the eye region predicts better face recognition ability. *Cognition*, 181, 12-20. doi:10.1016/j.cognition.2018.08.004
- Royer, J., Willenbockel, V., Gosselin, F., Blais, C., Leclerc, J., Lafortune, S. et 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(1), 13–23, doi: 10.1007/s00426-015-0740-3.
- Russell, R., Duchaine, B. et Nakayama, K. (2009). Super-recognizers: People with extraordinary face recognition ability. *Psychonomic Bulletin et Review*, 16(2), 252–257. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.252>.
- Sadeh, B., Podlipsky, I., Zhdanov, A. et 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.
- Schwartz, M. et Smith, M.L. (1980). Visual asymmetries with chimeric faces. *Neuropsychologia*, 18, 103-106.

- Schyns, P. G., Bonnar, L. et Gosselin, F. (2002). Show me the features! Understanding recognition from the use of visual information. *Psychological science*, 13(5), 402-409.
- Schyns, P. G., Jentzsch, I., Johnson, M., Schwein-berger, S. R. et Gosselin, F. (2003). A principled method for determining the functionality of brain responses. *Neuroreport*, 14(13), 1665-1669.
- Schyns, P. G. et Oliva, A. (1999). Dr. Angry and Mr. Smile: when categorization flexibly modifies the perception of faces in rapid visual presentations. *Cognition*, 69, 243-265.
- Schyns, P. G., Petro, L. S. et Smith, M. L. (2007). Dynamics of visual information integration in the brain for categorizing facial expressions. *Current Biology*, 17(18), 1580-1585.
- Sekuler, A., Gaspar, C.M., Gold, J.M. et Bennett, P.J. (2004). Inversion leads to quantitative, not qualitative, changes in face processing. *Current Biology*, 14(5), 391-396.
- Sergent, J. et Bindra, D. (1981). Differential hemispheric processing of faces: methodological considerations and reinterpretation. *Psychol Bull*, 89(3), 541-554.
- Sergent, J. (1982). The cerebral balance of power: Confrontation of cooperation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(2), 253-272.
- Sergent, J. (1985). Influence of Task and Input Factors on Hemispheric Involvement in Face Processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(6), 846-861.
- Sergent, J., Ohta, S. et MacDonald, B. (1992). Functional neuroanatomy of face and object processing. A positron emission tomography study. *Brain*, 115(1), 15-36.
- Shillcock, R., Ellison, T.M. et Monaghan, P. (2000). Eye-Fixation Behavior, Lexical Storage, and Visual Word Recognition. *Psychological Review*, 107(4), 824-851.

- Smith, F. W., Muckli, L., Brennan, D., Pernet, C., Smith, M. L., Belin, P., . . . Schyns, P. G. (2008). Classification images reveal the information sensitivity of brain voxels in fMRI. *NeuroImage*, 40(4), 1643–1654.
- Smith, F. W. et Schyns, P. (2009). Smile Through Your Fear and Sadness: Transmitting and Identifying Facial Expressions Over a Range of Viewing Distances. *Psychological Science*, 20(10), 1202–1208.
- Smith, M. L., Gosselin, F., Cottrell, G.W. et Schyns, P.G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions of emotion. *Psychological Science*, 16(3), 184–189.
- Smith, M. L., Gosselin, F. et Schyns, P. G. (2004). Receptive fields for flexible face categorizations. *Psychological Science*, 15(11), 753–761.
- Smith, M. L. et Merlusca, C. (2014). How task shapes the use of information during facial expression categorizations. *Emotion*, 14(3), 478–487.
- Sowden, P. T. et Schyns, P.G. (2006). Channel surfing in the visual brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(12), 538–545.
- Tadros, K., Dupuis-Roy, N., Fiset, D., Arguin, M. et Gosselin, F. (2013). Reading laterally: The cerebral hemispheric use of spatial frequencies in visual work recognition. *Journal of Vision*, 13(1):4, 1–12, doi:10.1167/13.1.4.
- Tardif, J., Morin Duchesne, X., Cohan, S., Royer, J., Blais, C., Fiset, D., . . . Gosselin, F. (2019). Use of Face Information Varies Systematically From Developmental Prosopagnosics to Super-Recognizers. *Psychological Science*.
<https://doi.org/10.1177/0956797618811338>
- Tardif, J., Fiset, D., Zhang, Y., Estéphan, A., Cai, Q., Luo, C., . . . Blais, C. (2017). Culture shapes spatial frequency tuning in face identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 43(2), 294–306.
- Valentine, T. (1988). Upside-down faces: A review of the effect of inversion upon face recognition. *British Journal of Psychology*, 79, 471–491.
- Wang, H.F., Friel, N., Gosselin, F. et Schyns, P.G. (2011). Effective bubbles for visual categorization tasks. *Vision Research*, 51(12), 1318–1323.

- Watson, A. B. et Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception et psychophysics*, 33(2), 113-120.
- Willenbockel, V., Fiset, D., Chauvin, A., Blais, C., Arguin, M., Tanaka, J.W., Bub, D.N. et Gosselin, F. (2010a). Does face inversion change spatial frequency tuning? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(1), 122-135.
- Willenbockel, V., Sadr, J., Fiset, D., Horne, G. O., Gosselin, F. et Tanaka, J. W. (2010b). Controlling low-level image properties: the SHINE toolbox. *Behavior research methods*, 42(3), 671-684.
- Winston, J. S., Vuilleumier, P. et Dolan, R. J. (2003). Effects of low-spatial frequency components of fearful faces on fusiform cortex activity. *Current Biology*, 13(20), 1824-1829.
- Yin, R.K. (1969). Looking at upside down faces. *Journal of Experimental Psychology*, 81(1), 141-145.
- Yovel, G., Levy, J., Grabowecky, M. et Paller, K.A. (2003). Neural Correlates of the Left-Visual-Field Superiority in Face Perception Appear at Multiple Stages of Face Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(3), 462-474.
- Yovel, G., Tambini, A. et Brandman, T. (2008). The asymmetry of the fusiform face area is a stable individual characteristic that underlies the left-visual-field superiority for faces. *Neuropsychologia*, 46, 3061-3068.
- Yu, D., Chai, A. et Chung, S. T. L. (2018). Orientation information in encoding facial expressions. *Vision Res*, 150, 29-37. doi:10.1016/j.visres.2018.07.001