

Université de Montréal

**L'induction implicite de l'utilisation de l'œil droit produit une meilleure  
discrimination faciale du sexe**

Par  
Simon Faghel-Soubeyrand

Département de psychologie, Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de  
Maîtrise ès sciences en Psychologie

Août 2017

© Simon Faghel-Soubeyrand

## RÉSUMÉ

Les variations individuelles d'habileté en reconnaissance faciale sont encore largement inexplicées dans la population normale. À l'aide des plans de régressions multiples dérivés de la technique d'échantillonnage *Bubbles* (Images de Classifications, IC), nous avons d'abord révélé l'utilisation d'information visuelle de 140 individus sains pendant qu'ils réalisaient une tâche de reconnaissance faciale du sexe. Ceci nous a permis de découvrir que des différences qualitatives dans l'information visuelle utilisée par les sujets permettent de prédire les variations d'habileté entre ceux-ci ; si les participants du meilleur quartile de performance utilisent l'œil droit du visage présenté (selon la perspective de l'observateur), les participants du pire quartile de performance utilisent la région homologue de l'œil gauche pour accomplir la même tâche.

Nous avons ensuite voulu dépasser les techniques corrélationnelles employées jusqu'ici pour comprendre ces variations ; nous avons *induit* les deux stratégies visuelles utilisées par les individus habiles (c.-à-d. l'œil droit) et inhabiles (c.-à-d. l'œil gauche) chez 100 participants afin d'observer leur influence *causale* sur la performance individuelle. Les IC indiquent que nous avons induit avec succès l'utilisation de l'œil droit chez 50 sujets. La performance de ce groupe a augmenté entre les séances ayant précédées et suivies l'induction, et a également augmenté significativement plus que celle du groupe poussé à utiliser l'œil gauche. En considérant que ces deux régions faciales sont identiques sur le plan de l'information qu'elles signalent, ceci constitue la première démonstration que l'utilisation d'une représentation faciale spécifique cause un meilleur traitement facial.

**Mots clés :** Différences individuelles, habileté cognitive, stratégies visuelles, reconnaissance faciale, causalité, induction, représentations visuelles, apprentissage, reconnaissance faciale du sexe

## ABSTRACT

Variation in face recognition ability is still largely unexplained in the neurologically typical population. We first derived classification images (CI) from the *Bubbles* sampling technique—regression planes which reveal idiosyncratic visual information usage—for 140 healthy individuals while they conducted a face-sex discrimination task. We found that qualitative differences in the visual information used by participants predicted (i.e. was *correlated* to) variations of performance between healthy individuals; participants in the best performance quartile relied mostly on the right-eye of the presented face whereas individuals from the worst performance quartile used the left-eye region while performing the same task.

Then, with the aim of going beyond the correlational techniques that have attempted to resolve the issue of recognition ability, we experimentally *induced* the two visual strategies used by the best and worst individuals to one hundred naive participants and observed the effects of these treatments on individual recognition ability. Data from CIs indicate that we successfully induced right eye usage in fifty individuals. We found that this induction significantly improved the group's performance on post-induction task sessions, compared to pre-induction, and that this right-eye induction group also improved significantly more than the left-eye induction group. Given that both eye regions have the same informational content, this is the first evidence that the use of a specific facial representation causes better facial processing in the normal population.

**Key words:** Individual differences, facial recognition, cognitive ability, visual strategies, causality, induction, representations, learning, face-sex recognition

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	i
<b>Abstract</b> .....	ii
<b>Table des matières</b> .....	iii
<b>Liste des figures</b> .....	v
<b>Liste des sigles et abréviations</b> .....	vi
<b>Remerciements</b> .....	vii
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
Corrélat des différences d’habiletés dans une population saine .....	3
Stratégies visuelles et habiletés en reconnaissance faciale .....	6
Le modèle RAP et la technique d’échantillonnage <i>Bubbles</i> .....	9
Hypothèse corrélationnelle : nature du lien entre stratégies visuelles et habileté individuelle.....	12
Hypothèse causale : induction de stratégies visuelles et leurs impacts respectifs sur l’habileté individuelle.....	17
Établir un lien causal par l’induction implicite de stratégies visuelles .....	20
<b>Contribution des auteurs à l’article</b> .....	22

<b>ARTICLE</b> .....	23
Abstract .....	24
Introduction .....	25
Method .....	26
Results .....	29
Discussion .....	33
References .....	35
<b>DISCUSSION GÉNÉRALE</b> .....	37
Interprétation du lien causal entre la représentation de l'œil droit et la performance .....	41
<b>CONCLUSION</b> .....	46
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	48

## Liste des sigles et abréviations

<b>2AFC :</b>	<i>two alternative forced choice</i>
<b>A :</b>	<i>available information</i>
<b>BOLD :</b>	<i>blood oxygen level dependant</i>
<b>FFA :</b>	<i>fusiform face area</i>
<b>HD :</b>	hémisphère droit
<b>HG :</b>	hémisphère gauche
<b>IRMf :</b>	imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
<b>LOC :</b>	<i>lateral-occipital cortex</i>
<b>OFA :</b>	<i>occipital face area</i>
<b>P :</b>	<i>potent information</i>
<b>R :</b>	représentation
<b>SV :</b>	stratégie(s)-visuelle(s)
<b>DVF :</b>	<i>divided visual field</i>

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> L'optimalité de l'utilisation d'information faciale pour sept expressions émotionnelles .....	11
<b>Figure 2.</b> Différences qualitatives dans l'information utilisée par les individus habiles, moyens et inhabiles en reconnaissance faciale du genre.....	15
<b>Figure 3.</b> Creation of stimuli and classification image computation .....	29
<b>Figure 4.</b> Use of information as a function of sex-discrimination ability quartiles.....	31
<b>Figure 5.</b> Impact of the implicit induction procedure on the use of facial information and individual face-sex discrimination performance.....	34
<b>Figure 6.</b> Utilisation d'information des sous-groupes ( <i>clusters</i> ) A (N=69) et B (N=77) émergeant d'une procédure de classification non supervisée .....	42

## Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mon directeur recherche, Frédéric Gosselin ; bien sûr pour son soutien, sa facilité d'approche et son implication de toute heure, mais aussi pour les innombrables discussions qui ont su remettre mon esprit distrait sur les rails de l'efficacité. Tu as su à la fois attiser ma curiosité et rediriger mon intérêt quelquefois débordant. Évidemment, si les années passées au laboratoire ont été remplies d'apprentissages, c'est en très grande partie grâce à toi. Je me dois également de te remercier pour ces nombreuses et enrichissantes escapades en Floride, mais aussi à Barcelone et à Berlin ; c'est par ta générosité que ces quelques lignes ont été écrites à l'international.

Je remercie aussi la personne la plus positive et calme que je connaisse, Jessica, d'avoir partagé une quantité impressionnante d'heures avec moi dans le bureau à parler de livres/séries de *Sci-fi/fantasy* et de chats, principalement. Merci à Laurent, que j'ai appris à connaître depuis maintenant plus de 3 ans, d'avoir écouté mes élucubrations sur la vie et d'avoir tenté de (et un peu réussi à) communiquer son amour intellectuel du vin. Merci à Paul —pollenator— Lene pour les discussions politiques et, bien sûr, pour les petits trésors généreusement ramenés de la mère patrie. Merci à Sandra, qu'on ne peut oublier malgré ses rares apparitions au labo, d'avoir enduré mes mauvaises blagues. Merci finalement à Nicolas, l'aîné du labo, qui m'a supervisé à mon entrée dans le laboratoire : merci de m'avoir initié aux joies de la programmation, d'avoir pu communiquer des notions qui paraissaient intimidantes dans mes débuts et, surtout, pour ces jadis fréquentes discussions sérieuses et moins sérieuses.



Merci évidemment à mes fidèles acolytes de « A-town », à mon frère, ainsi qu'à mes collègues U. Montréalais d'avoir pu m'aider à m'évader du tourbillon enivrant qu'est le monde académique.

Enfin, merci à Catherine de partager absolument tout avec moi ; merci d'abord d'être la femme sensible, courageuse, intelligente et consciencieuse que tu es, merci pour les pauses forcées de travail à l'école et ailleurs, merci de faire avec mes distractions et mes oublis, et merci d'avoir eu la patience de lire/relire ce qui doit maintenant être un nombre gargantuesque de pages de demande de bourses, d'*abstracts*, de *posters* et de ce mémoire. Autrement dit, merci d'être présente et de comprendre des situations que beaucoup n'accepteraient pas.

Je remercie finalement le CRSNG, le FRQNT ainsi que le RRSV, ces organismes qui auront permis de stopper l'hémorragie de mon fragile compte bancaire et sans lesquels je serais assurément en train de ne pas finir ce mémoire.

## INTRODUCTION

Un accomplissement majeur du système visuel humain consiste à décoder — avec une efficacité et une rapidité impressionnante— l'information sur l'identité, le genre et l'état émotionnel d'un individu en traitant l'entrée sensorielle provenant exclusivement d'un visage. Cette capacité d'association perceptive est cruciale pour tout individu humain qui interagit dans un contexte social durant la majorité de sa vie (Nachson, 1995; Bruce & young, 1986; Ekman & Friesen, 1971). Un des objectifs à long terme de la recherche cognitive et neuroscientifique a ainsi été d'expliquer *comment* l'Humain accomplit ces diverses tâches perceptives. Cet intérêt a fait éclore une quantité impressionnante d'études portant sur le processus général de reconnaissance faciale (Maurer, LeGrand et Mondloch, 2002; Tsao et Livingstone, 2008) et sur les régions cérébrales qui sous-tendent ce traitement (Kanwisher et al, 1997; Bentin, Allison, Puce, Perez, & McCarthy, 1996 ; Haxby, Hoffman & Gobbini, 2000; Rossion & Jacques, 2011 ; Schiltz, Dricot, Goebel & Rossion, 2010 ; Yang, Susilo, Duchaine, 2014 ; Duchaine & Yovel, 2015). Par contre, peu d'attention a été accordée aux variations de cette habileté entre les individus de la population normale, jusqu'à tout récemment (Wilmer et coll., 2008; DeGutis et coll., 2013 ; Yovel, Wilmer et Duchaine, 2014). En effet, si les cas extrêmes de ces variations commencent à être mieux expliqués à travers l'étude d'individus sains —sans lésions cérébrales— démontrant des capacités exceptionnellement faibles (prosopagnosie développementale, McConachie, 1976 ; Duchaine, Yovel, Butterworth, Nakayama, 2006) ou élevées en reconnaissance faciale (*super-recognizer*, Russell, Duchaine & Nakayama, 2009), la majorité des cas, massés autour de la moyenne, a reçu un intérêt limité (Wang, Li, Fang, Tian, Liu, 2012 ; Yovel, Wilmer et Duchaine, 2014).

Ce mémoire vise à comprendre comment la stratégie visuelle (SV; c.-à-d. l'utilisation d'information faciale spécifique telle que la région des yeux) est liée à la performance individuelle en reconnaissance faciale. Il comporte deux études interreliées : 1) l'observation, sur un large échantillon (N=140), de SV variant *systématiquement* avec l'habileté individuelle ; et 2) l'induction, chez deux groupes de 50 sujets, de SVs associées respectivement à une forte et une faible performance dans l'étude 1 afin de tester la nature *causale* du lien entre ces SVs et la performance. Ensemble, ces études répondront au manque flagrant de mécanismes cognitifs proximaux qui permettent non seulement de prédire (étude 1), mais surtout de *produire* (étude 2) de meilleures performances perceptives en reconnaissance faciale. Comme nous le verrons plus en profondeur, seule la découverte des facteurs causaux d'un phénomène permet l'implantation d'interventions ciblées pouvant améliorer l'habileté perceptive d'individus sains (p. ex. policiers, douaniers, agents de sécurité) ou d'individus vivant avec des troubles de reconnaissance faciale interagissant significativement dans leur vie quotidienne (prosopagnosiques développementaux ou acquis).

## ***Corrélat des différences d'habiletés dans une population saine***

Malgré la rareté de la littérature portant sur les facteurs expliquant les variations de performance en reconnaissance faciale, il semble pourtant bien établi que cette habileté varie significativement dans la population normale (p. ex. Duchaine & Nakayama, 2006; Russell, Duchaine & Nakayama, 2009; voir Wilmer et coll., 2008 pour une discussion sur le sujet; Bowles et coll., 2009; McConachie, 1976; Wilmer, 2008; Yovel, Wilmer et Duchaine, 2014). Certaines études à grande échelle se sont intéressées aux facteurs ontogéniques et phylogéniques qui sous-tendent ces variations et ont, par exemple, observé que les différences individuelles semblent avoir une forte composante génétique ( $r=.70$  entre habiletés de jumeaux monozygotes, Wilmer et coll., 2010). D'autres ont décrit l'évolution de l'habileté en reconnaissance faciale à travers l'âge et ont ainsi observé qu'elle semble atteindre un point critique vers 30 ans (Carey, Diamond, & Woods, 1980; Diamond, Carey, & Back, 1983; Germine, Duchaine et Nakayama, 2011). Parallèlement, des études en imagerie cérébrale se sont intéressées aux corrélats cérébraux de la capacité générale de reconnaissance faciale. Certaines d'entre elles, en utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), ont ainsi déterminé que la performance de détection/d'identification de visages était liée à l'activation *blood oxygen level-dependant* (BOLD) spécifiquement dans les régions du Fusiform Face Area (FFA, Kanwisher et coll., 1997) et du Lateral Occipital Cortex (Grill-Spector, Kourtzi & Kanwisher, 2001 ; Grill-Spector, Knouf & Kanwisher, 2004). Ces études ont porté sur des effets de groupes et ont montré un simple lien entre la présentation d'un visage et la spécificité de l'activité des régions ventro-temporales du cortex (Haxby, 2000; Duchaine et Yovel, 2015; Rossion, Schiltz, & Crommelinck, 2003 pour des revues). L'étude

de Grill-Spector, Knouf & Kanwisher (2004) a, par exemple, permis d'observer que plusieurs régions étaient significativement activées pendant la simple présentation de visages. Cependant, seuls le FFA et le LOC étaient significativement plus activés lors d'une détection et d'une identification *juste* que lors d'une identification *erronée*. Ceci suggère que ces régions spécifiques renferment des mécanismes ou de l'information importante à la catégorisation faciale, mais n'explique toutefois pas les *différences d'habiletés entre individus* d'un point de vue neuroscientifique.

Le peu d'acquis cumulé jusqu'à présent sur des sujets sains suggère de façon similaire que les individus ayant une plus grande sélectivité d'activation du FFA et du LOC aux visages (comparée à d'autres objets) sont plus performants dans une tâche de reconnaissance faciale (Huang et coll., 2014; voir aussi Furl, Garrido, Dolan, Driver & Duchaine, 2011). Cette relation semble également appuyée par l'observation que les prosopagnosiques développementaux —ces individus déficitaires en reconnaissance faciale— montrent moins de spécificité d'activation aux visages (Furl, et coll., 2011) et ont un volume plus faible de matière grise dans ces régions (Esins, 2015). De façon intéressante, et contrairement à la notion populaire d'une spécialisation de l'hémisphère droit pour la reconnaissance faciale, la corrélation trouvée par Huang et coll. (2014) entre performance et sélectivité d'activation cérébrale était aussi forte pour le FFA de l'hémisphère gauche que droit, suggérant une bilatéralité des individus doués pour la reconnaissance de visage (voir aussi Furl et coll., 2011 pour des résultats similaires).

Ensemble, ces résultats i) nous renseignent sur le parcours développemental de l'habileté en reconnaissance faciale et ii) suggèrent l'existence de régions cérébrales spécifiques (FFA et LOC) qui sont nécessaires à l'analyse perceptuelle approfondie d'un visage. Ces régions peuvent être conceptualisées en tant que modules sous-tendant différentes représentations présémantiques menant à la catégorisation faciale (Rossion, Schiltz & Crommelinck, 2003; Yang, Susilo, Duchaine, 2014). Les cas extrêmes des prosopagnosiques et des *super-recognizers* nous indiquent également que cette information stockée en mémoire peut être perturbée par des différences structurelles/fonctionnelles. Par contre, si ces études nous renseignent sur l'emplacement de cette information (le *où*), elles ne nous renseignent ni sur son contenu (le *quoi*) ni sur les mécanismes cognitifs à l'œuvre dans la mise en place de ces différences dans la population normale (le *comment*).

En effet, malgré la position solide de ces variations, les *mécanismes* cognitifs qui ont été mis de l'avant pour expliquer les différences d'habiletés au sein de la population normale restent flous, contradictoires, ou non robustes. Les quelques études sur le sujet ont eu de la difficulté à expliquer ces variations de performances en utilisant les mesures classiques du traitement holistique/configurale/globale telles que le *Part-Whole* et la *Face-composite task* (Konar et coll., 2010; Richler et coll., 2011; Wang et coll., 2012; Richler, Floyd & Gauthier, 2015; mais voir DeGutis et coll., 2013 pour une relation robuste), ou ont trouvé des effets significatifs mais petits avec d'autres construits tels que le *face-space coding* (c.-à-d. une approche mettant l'emphase sur des dimensions d'espacements entre les attributs faciaux d'un point de vue psychophysique, voir Dennett et coll., 2012 ;Rhodes et coll., 2014). Ainsi, malgré les nombreux acquis obtenus sur le traitement facial en neurosciences cognitives, aucune

explication proximale suffisante n'a été avancée pour expliquer les différences individuelles propres à l'habileté en reconnaissance faciale.

### **Stratégies visuelles et habiletés en reconnaissance faciale**

Il existe cependant plusieurs indications que des différences de *stratégies visuelles* (SV, c.-à-d. l'utilisation d'information spécifique d'un visage tel qu'un attribut pour une tâche donnée) peuvent expliquer une partie de la variation de cette habileté. À vrai dire, avant même de réaliser une seule expérience, nous pouvons avancer qu'il existe dans le signal visuel provenant d'un visage de l'information discriminant de façon *optimale* deux catégories (ou plus) pour une tâche de reconnaissance donnée. Dans une tâche de reconnaissance faciale émotionnelle, par exemple, un modèle mathématique discriminant de façon optimale deux catégories visuelles (p. ex. colère, surprise) utiliserait l'information de la région de la bouche pour identifier la surprise alors qu'il utiliserait principalement la région des yeux pour reconnaître la colère étant donné que le signal (c.-à-d. la quantité d'information visuelle disponible pour classer ces deux catégories) est réparti différemment sur un visage (Smith et coll., 2005). De façon analogue, pour une tâche d'identification faciale où on échantillonnerait un visage dans plusieurs bandes de fréquences spatiales (Gold, Bennett et Sekuler, 1999), la région des yeux sera la plus informative dans la gamme des hautes fréquences spatiale de 4 à 8 cycles par image (c/i), tandis que la bouche sera plus discriminante si le visage est échantillonné par un filtre passe-bas de 1 c/i (Gold, Bennett et Sekuler, 1999). Un observateur idéal performerait ainsi avec une d'exactitude proche de l'optimalité si les yeux d'un visage

étaient présentés en plus haute fréquence spatiale (4 à 8 c/i), mais se rapprocherait de la chance si la bouche était la seule région révélée dans cette gamme d'information. Cette information disponible nous renseigne ainsi sur la *stratégie optimale* à utiliser pour classer un visage dans une catégorie donnée : celle par laquelle un individu utiliserait la totalité de l'information disponible dans la dimension échantillonnée pour une tâche donnée. Ceci revient à dire que pour toute tâche perceptive, une stratégie visuelle spécifique est plus efficace qu'une autre car elle permet d'utiliser un ensemble d'information plus riche et pertinent pour reconnaître le stimulus facial. La capacité humaine à décoder les catégories de signaux faciaux présentés dépend donc *nécessairement* du degré de superposition de la SV d'un individu à celle de la stratégie optimale (Gosselin & Schyns, 2002; Murray, Bennett & Sekuler, 2005). Des écarts systématiques de ce facteur entre individus seraient suffisants pour produire une variation de la capacité de reconnaissance faciale. Un exemple concret de ce point nous est donné par Pachai, Sekuler et Bennett (2013) : en manipulant l'information faciale à l'aide de filtres gaussiens d'orientations et d'un modèle d'observateur idéal, les auteurs ont pu démontrer qu'il existe plus d'information faciale dans la structure horizontale que dans les verticales pour effectuer une tâche d'identification faciale, et que plus un individu sain utilisait cette information optimale, plus il était habile à la tâche.



Toutefois, notre capacité à extraire l'information disponible de l'environnement visuel n'est pas complète, directe et objective. Celle-ci se fait plutôt sous le « voile de la perception » (Locke comme cité dans Newman, 2004); elle est biaisée par un système ontogéniquement et phylogéniquement développé qui la traite selon sa propre définition d'efficacité, selon ses propres représentations (Kosslyn, Brunn, Cave & Wallach, 1984; Reed, 2016). Ainsi, quoique souvent similaires à cette stratégie idéale, les SVs humaines n'incluent qu'une proportion de l'information utilisée par le modèle idéal (p. ex. Gosselin et Schyns, 2001; Gold, Bennett et Sekuler, 1999; Smith et coll., 2005). Par exemple, Nestor et collègues (2008) ont constaté que les représentations internes individuelles du genre facial — acquises par une technique de corrélation inverse — étaient plus semblables (c.-à-d. corrélée) entre individus qu'avec l'information optimale permettant de discriminer l'homme et la femme. Ces divergences des modèles idéaux de catégorisations émergent d'abord des limites évidentes d'un système biologique qui le force à traiter une quantité finie d'information (visuelle, auditive, sémantique, etc.) à la fois. Il est ainsi important de souligner qu'une « bonne » représentation/stratégie visuelle est fondamentalement pragmatique : celle-ci est considérée supérieure non pas parce qu'elle copie fidèlement les objets réels, mais seulement dans la mesure qu'elle relie de manière plus utile l'objet — par exemple un visage apeuré signifiant un possible danger — avec l'observateur (James, 1975 ; Gibson, 1997). Au niveau de l'habileté individuelle en catégorisation faciale, il est ainsi utile d'adopter une conception empirique qui prend compte i) de la dimension informative (physique et idéale) des stimuli faciaux présentés et ii) de la composante perceptive (psychologique) et structurellement biaisée.

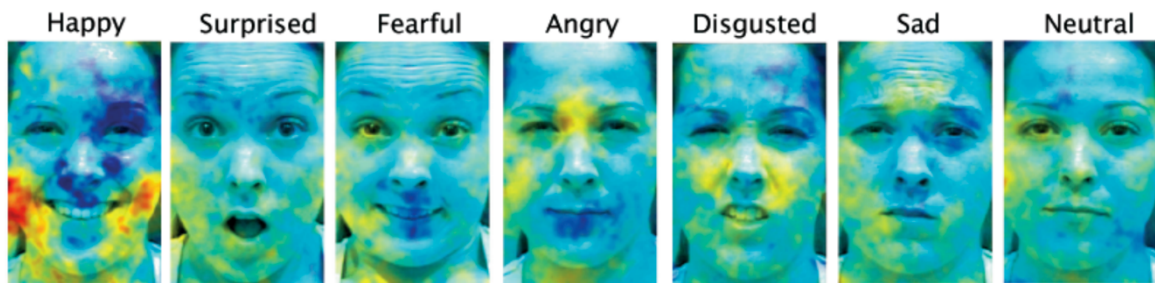
## Le modèle RAP et la technique d'échantillonnage *Bubbles*

Gosselin et Schyns (2002; voir aussi Murray & Gold, 2004) ont proposé un cadre théorique et méthodologique permettant de lier l'information visuelle représentée en mémoire (*Represented information*), à l'information visuelle qui est mise à la disponibilité de l'observateur pendant une tâche classique de reconnaissance (*Available information*). Selon ce cadre conceptuel, un observateur en contexte de catégorisation tenterait de superposer l'information visuelle provenant du stimulus présenté (*A*) aux différentes représentations (*R*) qu'il a en mémoire. De cette superposition entre *A* et *R* émergerait la *Potent information* (*P*), qui réfère à l'information utile à la catégorisation d'*A* en tant que *R*, et qui permettrait la reconnaissance du stimulus en tant que concept interprétable et socialement pertinent pour un observateur humain.

Cette approche conceptuelle est pertinente en ce qu'elle permet de lier les facteurs de bas niveau (c.-à-d. la dimension informative physique *A*) aux modèles et représentations de haut niveau tel que la représentation sémantique d'un visage d'homme ou de femme (c.-à-d. la dimension psychologique *R*) qu'a un individu en mémoire. On dira que *P*, qui fait le pont entre ces construits, nous renseigne sur l'information *diagnostique* ou utile qui est véhiculée par un visage.

La technique d'échantillonnage aléatoire *Bubbles* (Gosselin & Schyns, 2001), développée par les auteurs du modèle RAP, permet de dériver une image de classification qui révèle cette information diagnostique (utilisée) par un participant pendant une tâche de catégorisation. Depuis sa création, un corps important d'études s'est penché sur les caractéristiques visuelles utilisées lors de différentes tâches perceptives impliquant un visage telles que la discrimination du genre (Gosselin & Schyns, 2001; Dupuis-Roy & coll., 2009; Willenbockel et coll., 2013), des émotions (Smith et coll., 2005 ; Blais et coll., 2012; Jack et coll., 2017) ou de l'identité (Schyns, Bonnar et Gosselin, 2002; Caldara et coll., 2005; Butler et coll., 2010; Tardif et coll., soumis). Plusieurs études sur la reconnaissance faciale du genre ont ainsi permis d'identifier la région des yeux et de la bouche en tant qu'attributs utiles à sa discrimination (Gosselin et Schyns, 2001 ; Schyns et coll., 2002; Dupuis-Roy et coll., 2009), et ce sur plusieurs dimensions psychophysiques critiques comme la luminance/chrominance (Dupuis-Roy, Faghel-Soubeyrand & Gosselin, soumis), le contraste relatif de ces attributs au reste du visage (Dupuis-Roy et coll., 2009), ou les fréquences spatiales qui sous-tendent son traitement (Willenbockel et coll., 2013). Les résultats obtenus par cette technique d'échantillonnage démontrent que le système perceptif humain utilise de l'information spécifique à la tâche cognitive demandée. De plus, *Bubbles* permet de prendre en compte i) des variations de l'information *disponible* des stimuli faciaux et ii) des différences de stratégies visuelles émergeant des *représentations* humaines biaisées. En effet, une comparaison entre les résultats obtenus par *Bubbles* sur un observateur humain et idéal (voir figure 1, p.11) montre un chevauchement entre les stratégies de ces deux observateurs (bleu pâle), mais souligne surtout des différences entre ceux-ci : certaines des régions utiles pour la catégorisation de la joie (p. ex. l'œil droit, bleu foncé) ne sont pas utilisées autant par

l'observateur humain que par l'observateur idéal; d'autres indices (la bouche, rouge) sont au contraire *surutilisés*. L'étude de Smith et collègues (2005) est une démonstration efficace de la capacité de la technique *Bubbles* à distinguer les stratégies visuelles optimales des sous-optimales tant d'un point de vue informationnel (modèle idéal) que représentationnel (les biais dans l'information utilisée).



**Figure 1.** (Adaptée avec permission de Smith, Cottrell, Gosselin & Schyns, 2005) : L'optimalité de l'utilisation d'information faciale pour sept expressions émotionnelles. Les images indiquent le degré d'optimalité auquel un observateur humain utilise l'information faciale pour catégoriser chaque expression. La couleur bleu pâle des pixels correspond à des valeurs proches de 0, indiquant une utilisation optimale de l'information objective nécessaire à la catégorisation ; le bleu foncé correspond à des valeurs négatives, indiquant une utilisation sous-optimale (c.-à-d. une sous-utilisation) de l'information. Les pixels rouges et jaunes (valeurs positives) indiquent une plus grande utilisation de l'information qui n'est pas optimale pour la tâche, comparée à l'observateur idéal (une réflexion de biais humains).

## **Hypothèse corrélacionnelle : nature du lien entre stratégies visuelles et habileté individuelle**

Nous avons vu une démonstration théorique (informationnelle) suggérant que la performance en reconnaissance faciale est nécessairement tributaire de la SV d'un individu puisque cette stratégie est intrinsèquement liée à sa capacité à utiliser (ou non) la totalité de l'information visuelle disponible. Des appuis empiriques provenant d'individus prosopagnosiques acquis tel que PS (Caldara et coll., 2005) ou avec des lésions acquises aux amygdales (SM, Adolphs et coll., 2005) supportent aussi l'existence d'un lien entre des différences *qualitatives* de stratégies visuelles (c.-à-d. l'utilisation de différentes régions faciales) et des différences d'habiletés. Elles ont en effet montré que des atteintes cérébrales spécifiques génèrent des stratégies visuelles sous-optimales qui réduisent la performance de reconnaissance émotionnelle (Adolphs et coll., 2005) ou d'identité (Caldara et coll., 2005), selon la nature de la lésion (voir aussi Pancaroglu et coll., 2016).

À l'aide de la technique *Bubbles*, Adolphs et coll. (2005) ont par exemple comparé l'utilisation d'information d'une patiente cérébro-lésée aux deux amygdales (SM) à un groupe contrôle pendant une tâche d'identification émotionnelle. Les auteurs ont pu démontrer que les individus sains utilisaient significativement la région des yeux pour identifier l'émotion de peur, tandis que SM utilisait une stratégie sous-optimale (la région de la bouche) pour effectuer la même tâche. Cette différence de stratégie était accompagnée d'une performance significativement plus faible de SM comparée aux contrôles, comme indiqué par la quantité d'information (c.-à-d. le nombre de bulles) nécessaire à la réalisation de la tâche à un taux de 75% de réponses correctes.

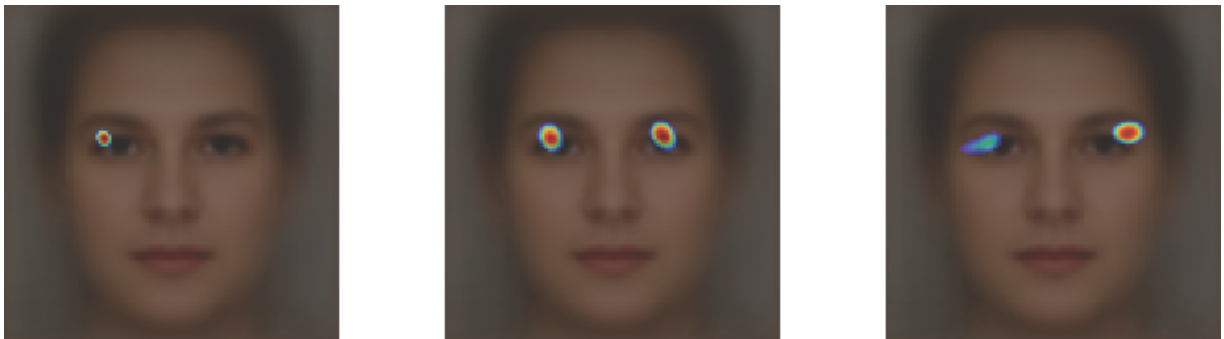
Par contre, malgré la nécessité d'une variation d'habileté avec l'utilisation d'information, il existe plusieurs alternatives à ce lien entre des différences qualitatives de SV et l'habileté. Il est par exemple possible qu'un paradigme expérimental donné tel que celui décrit plus tôt avec la patiente SM, qui révélait aléatoirement les régions éparses du visage (Adolphs et coll., 2005), ne permette pas de révéler des variations systématiques entre l'utilisation d'information individuelle (p. ex. région des yeux) et la performance entre deux individus. Dans une tâche de reconnaissance faciale d'identité par exemple, deux individus pourraient utiliser la région identique des yeux tout en extrayant des dimensions visuelles différentes telles que l'information dans la structure horizontale versus verticale, qui sont respectivement plus et moins optimales à la tâche (Pachai et coll., 2013). De plus, nous avons discuté d'appuis empiriques qui suggéraient que des biais humains pourraient sous-tendre des variations d'utilisation d'information inexplicables par la qualité de l'information seulement (voir figure 1, p.11, et la sous-utilisation de l'œil droit pour un exemple). Certaines différences structurelles du système visuel, tel que la spécificité et le degré de latéralisation du FFA-LOC aux visages (Grill-Spector, Knouf & Kanwisher, 2004; Huang et al., 2014) pourraient déterminer ce genre de biais d'extraction de l'information disponible (Rousselet et coll., 2014; Ince et coll., 2016). Il est ainsi possible que des différences dans les stratégies entre individus habiles et malhabiles ne soit pas dues à une interaction entre leurs structures internes et des facteurs purement physiques/informatifs provenant des stimuli faciaux (tel que l'exemple de SM), mais émergerait seulement de biais dans la structure des observateurs humains. Des biais de latéralisation pourraient, par exemple, produire une asymétrie (droite/gauche) de l'information utilisée sur un visage de telle sorte qu'un individu habile plus latéralisé du côté de l'hémisphère droit (HD) utiliserait significativement la région plus à

gauche du visage présenté. En raison d'une plus grande efficacité de l'HD, il est possible qu'un individu utilise une information identique à un autre tout en étant plus performant à une tâche perceptive. Finalement, il est aussi possible qu'une meilleure habileté résulte d'une simple augmentation linéaire de l'utilisation de l'information connue comme étant utilisée en moyenne par la population (p. ex. les yeux et la bouche dans une tâche de catégorisation faciale du genre), de sorte que plus un individu utilise ces régions, plus il performe correctement.

Étant donné ces multiples possibilités empiriques, il semble d'abord primordial d'examiner si —et si oui, comment— l'utilisation d'information visuelle covarie avec l'habileté d'identification dans une population saine. *Bubbles* nous permettra de révéler la nature de cette relation. Les données provenant d'études de cas énoncé plus haut (SM et PS) nous mènent à prédire qu'une stratégie donnée soit utilisée de façon systématique par des participants performants tandis qu'une autre stratégie (qualitativement différente) soit utilisée par des participants inhabiles à la reconnaissance faciale. À ce sujet, si l'étude des patients SM et PS suggère un tel lien, il est toutefois important de souligner qu'aucune étude de cas ne suffit à confirmer l'hypothèse voulant que des différences *systématiques* de SV dans la population normale expliquent les différences de performance en reconnaissance faciale. Ces deux observations pourraient n'être qu'anecdotiques, ou ne s'appliquer qu'à une population d'individus lésés et/ou dans l'extrême négatif du continuum de performance. Ce lien devra se faire à travers un échantillon suffisamment grand pour permettre une description totale du spectre de performance de la population générale.

Récemment, une réanalyse d'un jeu de 107 participants ayant complété une tâche de

reconnaissance faciale du genre dans un paradigme expérimental *Bubbles* (Dupuis-Roy et coll., soumis) a mené à découvrir que la stratégie visuelle de groupe, trouvée alors en moyennant l'échantillon total, cachait en réalité des différences qualitatives dans les stratégies visuelles utilisées entre différents sous-groupes d'individus pour compléter la tâche; tandis que les participants les plus performants utilisaient l'information provenant de l'œil droit du visage (selon la perspective de l'observateur), les participants *sous*-performants utilisaient plutôt l'œil gauche du visage présenté (voir figure 2, p.15, et Faghel-Soubeyrand & Gosselin, 2016; l'index de performance utilisé était la quantité d'information visuelle nécessaire pour accomplir la tâche à un seuil de 75% de réponses correctes, voir Royer et collègues, 2015 pour une validation de la mesure pour l'habileté en reconnaissance faciale).



**Figure 2.** Différences qualitatives dans l'information utilisée par les individus habiles, moyens et inhabiles en reconnaissance faciale du genre. Les trois figures montrent les Images de Classifications (IC) provenant de 3 tiers de performance obtenus après la réanalyse de Dupuis-Roy et coll. (soumis) qui ont été superposées à un visage moyenné des 300 stimuli. Les régions colorées soulignent les pixels des stimuli qui sont significativement utilisés par les individus du groupe de performance respectif (pixel test,  $tP=3.49$ ,  $p=.05$ ). Les stratégies visuelles du pire tiers (extrême gauche) au meilleur tiers (extrême droite) révèlent un patron de différences qualitatives dans les stratégies visuelles utilisées par les individus habiles versus inhabiles, les individus performants utilisant significativement plus l'œil droit que l'œil gauche du visage présenté.



Cette relation n'est pas sans rappeler celle de Pachai et coll. (2013) discutée plus tôt, où l'habileté pouvait être prédite par une stratégie visuelle spécifique (c.-à-d. l'utilisation des horizontales pour l'identification optimale). Elle rappelle aussi la découverte récente d'un lien entre l'utilisation de la région des yeux et la performance individuelle par Tardif et coll. (soumis) qui montrait une relation linéaire et positive entre l'utilisation des yeux et la performance de la prosopagnosie développementale jusqu'à la reconnaissance optimale de l'identité par les *super-recognizers*. Comme nous le verrons toutefois plus en profondeur dans les sections subséquentes, cette relation se distingue des deux études décrites plus tôt en ce qu'elle ne peut être explicable par des différences d'utilisation d'information seulement.

La première étude du présent mémoire visera à confirmer la relation entre l'utilisation de l'œil droit et une bonne performance individuelle dans une tâche de reconnaissance faciale du genre. Nous testerons par le fait même l'hypothèse théorique générale selon laquelle l'habileté en catégorisation faciale, dans la population normale, varie de façon systématique avec les stratégies visuelles des individus. Plus spécifiquement, il est prédit, comme démontré par les résultats préliminaires présentés ci-haut (figure 2, p.15), que les participants performants utiliseront une stratégie *qualitativement* différente des autres participants ; ceux-ci ne différeront pas sur la fréquence à laquelle ils utilisent la même information que les individus sous-performants (c.-à-d. une différence quantitative ou linéaire), mais utiliseront plutôt des régions différentes du visage présenté pour effectuer la même tâche. Notons au passage que nous donnons l'étiquette de SVs *qualitativement différentes* celles qui recrutent une extraction d'indices visuels provenant de différentes régions faciales (ce qui inclut l'œil gauche versus droit, par exemple, même s'ils contiennent la même information). La tâche de

reconnaissance faciale du genre a été étudiée de façon extensive par une grande quantité de laboratoires et de méthodologies qui ont mené à une description détaillée du phénomène (Brown et Perrett, 1993 ; Russel, 2003 ; Dupuis-Roy et coll., 2009; Willenbockel et coll., 2013; Nestor et coll., 2008). Nous verrons dans la prochaine section que les connaissances cumulées jusqu'ici sur cette tâche auront facilité l'implantation de la partie inductive (causale) de ce mémoire. Il est aussi important de souligner que la performance à cette tâche varie de façon considérable (c.-à-d. de façon similaire à la tâche d'identification faciale étudiée classiquement pour l'explication de l'habileté en reconnaissance faciale, Esins, 2015). De plus, la catégorisation du genre fait appel à des catégories qui sont communes à tout individu de la population générale et ne demande donc pas d'apprentissage préalable d'identité (contrairement à l'identification faciale) ou de connaissances culturelles spécifique (contrairement à la discrimination d'identités célèbres), facteurs qui pourraient faire varier la performance individuelle sur des éléments indésirables.

### **Hypothèse causale : induction de stratégies visuelles et leurs impacts respectifs sur l'habileté individuelle**

Un trait commun des quelques résultats énoncés jusqu'ici portant sur l'habileté perceptive —incluant les derniers portant sur les stratégies visuelles— est qu'ils ont prédit (c.-à-d. qu'ils ont *corrélé*) avec succès la performance d'individus en reconnaissance faciale. Aucune de ces études n'a toutefois révélé les *causes* d'une meilleure performance perceptive chez une population saine. On pourrait ainsi expliquer toutes ces associations par une médiation, tel que la variation de performance soit en réalité causée par un troisième facteur

qui reste inconnu et que le facteur corrélé (p. ex. holistique, stratégie ou autre) soit finalement non déterminant à l'habileté. Par exemple, une stratégie visuelle particulière telle que l'utilisation de l'œil droit, qui n'a seulement été *corrélé* avec la performance, pourrait se révéler être un simple épiphénomène d'un traitement facial efficace —un sous-produit lié à certains individus performants, mais n'exerçant en lui-même aucun effet sur l'habileté en reconnaissance faciale. Au-delà de la robustesse de la compréhension accompagnant la causalité (Pearl, 2003), les inférences causales sont particulièrement importantes dans un contexte d'intervention (par ex. pour améliorer les compétences en reconnaissance faciale de policiers, d'agents de sécurité, de douaniers ou d'individus souffrant de prosopagnosie développementale). Ces inférences permettent en effet de cibler les facteurs qui produisent un effet direct sur un phénomène donné.

Malheureusement, peu d'études en reconnaissance faciale ont réussi à inférer de tels liens causaux, et seulement une étude a pu nous renseigner sur les mécanismes causant une meilleure habileté de traitement. Pitcher, Walsh, Yovel & Duchaine (2011) ont pu démontrer que l'activation de la région de l'*Occipital Face Area* (OFA) était nécessaire à la reconnaissance juste des attributs faciaux (yeux, nez, bouche) et de leur distance relative (voir aussi Parvizi et coll., 2012). Cette étude ne nous renseigne toutefois pas i) sur la nature de ce processus (p. ex. le traitement d'un ou de plusieurs attributs? Le/lesquels?), ce qui pose problème pour l'implantation d'un traitement et ii) a utilisé un échantillon restreint de 24 individus (ce qui peut être problématique dans l'étude de la performance dans un contexte de différences individuelles). Plusieurs études portant sur le rôle du neurotransmetteur ocytocine en perception faciale ont quant à elles démontrées que l'injection intranasale de cette

substance augmenterait le nombre de fixations oculaires dirigées vers les yeux des visages présentés (Andari, Duhamel, Herbrecht, Leboyer & Sirigu, 2010). À travers ce changement de stratégie de fixation, l'ocytocine améliorerait la performance d'individus atteints de prosopagnosie développementale (Bate, Cook, Duchaine, Tree, Burns & Hodgson, 2014) ou de déficits psychosociaux significatifs tels que le trouble de spectre autistique (Domes, Kumbier, Heinrichs & Herpertz, 2014).

Parallèlement, quatre études ont pu démontrer l'effet direct d'un traitement cognitif sur la performance d'individus sans lésions cérébrales (DeGutis, Cohan & Nakayama, 2014 ; Brundson et coll., 2006, DeGutis et coll., 2007; Schmalzl et coll., 2008). Parmi ces quatre études, trois sont des études de cas portant sur des prosopagnosiques développementaux (Brundson et coll., 2006; DeGutis et coll., 2007; Schmalzl et coll., 2008) et deux études parmi celles-ci ont été effectuées sur des enfants de moins de 8 ans (Brundson et coll., 2006; Schmalzl et coll., 2008). Ainsi, seule l'étude de DeGutis et coll. (2014), qui comptait 24 sujets prosopagnosiques développementaux, peut être considérée comme une démonstration d'une relation causale sur une population neurologiquement typique. Toutefois, même dans cette étude, le traitement utilisé n'a eu qu'un succès très sommaire. D'abord, seulement la moitié des sujets ayant reçu l'entraînement ont pu voir une augmentation de performance post versus prétraitement cognitif. Ensuite, l'entraînement utilisé durant l'étude était non-spécifique ; la procédure visait en effet à améliorer la capacité de discriminer des visages par l'utilisation d'une combinaison de différentes distances interattributs modifiées simultanément (c.-à-d. la distance entre les yeux/sourcils et entre la bouche/nez), ce qui rend impossible la dissociation des effets respectifs des différentes distances. Finalement, la procédure utilisée par DeGutis et

coll. (2014) ne permettait pas de vérifier que l'induction désirée (c.-à-d. l'utilisation individuelle des distances interattributs) avait bel et bien eu lieu chez les participants. L'établissement d'un lien causal entre le traitement/mécanisme perceptif utilisé et la performance individuelle semble ainsi approximatif.

### **Établir un lien causal par l'induction implicite de stratégies visuelles**

La deuxième et principale étude de ce mémoire tentera d'aller au-delà des résultats corrélacionnels sur l'habileté en reconnaissance faciale. Avec l'objectif de révéler les facteurs *causaux* de cette faculté perceptive, nous avons ici *induit* les deux stratégies visuelles trouvées plus tôt comme étant liées à la performance (c.-à-d. l'utilisation de l'œil gauche et droit du stimulus facial) à une centaine de participants sains afin d'observer l'effet de ce traitement sur leur habileté dans une tâche de reconnaissance faciale du genre.

Tel que décrit dans la dernière section, nous avons tout d'abord recruté un échantillon indépendant de 140 individus normaux afin de tester la robustesse de la relation entre l'utilisation de l'œil droit et la performance en reconnaissance faciale du genre découverte par la réanalyse de Dupuis-Roy et coll. (soumis; voir Faghel-Soubeyrand & Gosselin, 2016). Nous avons mis à l'épreuve ces résultats corrélacionnels grâce à la version spatiale de la technique d'échantillonnage *Bubbles* (Gosselin et Schyns, 2001). Comme nous démontrerons à travers l'article qui suit, ce lien corrélacionnel a pu être répliqué.

Dans la partie *inductive* (causale) de l'étude, cent individus ont ensuite complété une procédure en trois phases (pré-induction, induction et post-induction) où l'information diagnostique des indices visuels faciaux les plus utiles à la catégorisation du genre —la région des yeux (Brown et Perrett, 1993; Russel, 2003; Dupuis-Roy et coll., 2009; Nestor et coll., 2008)— a été alternativement manipulée afin que les participants ne puissent utiliser qu'un seul des deux yeux pour accomplir la tâche (c.-à-d. l'œil contenant de l'information sur le genre du visage, voir Schyns & Oliva, 1997 pour une approche similaire). Chaque participant se voyait attribué aléatoirement à un des deux groupes d'induction, de telle sorte que 50 individus étaient dans le groupe d'induction de l'utilisation de l'œil droit (appelé groupe droit) et les 50 autres dans le groupe d'induction de l'utilisation de l'œil gauche (appelé groupe gauche). Selon les groupes d'induction, il est prédit que la manipulation expérimentale modifiera l'utilisation d'information individuelle entre les phases pré-induction et post-induction : les individus du groupe gauche devraient utiliser significativement plus l'œil gauche et ceux du groupe droit devraient utiliser significativement plus l'œil droit. Quelle proportion des sujets montrera une augmentation de l'utilisation de l'œil renforcé ? La réponse à cette question interagira-t-elle avec le groupe ou l'utilisation naturelle de l'œil droit versus gauche ? Suivant les relations stratégies/performance énoncées plus tôt, il est principalement attendu que le groupe induit d'utiliser la stratégie d'utilisation de l'œil droit sera significativement plus performant après versus avant l'induction, et que la performance de ce groupe sera significativement supérieure à celle du groupe induit d'utiliser l'œil gauche du visage présenté.

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

L'article du présent mémoire, intitulé « When right is right: Inducing the use of the right eye enhances face-sex discrimination performance » a été rédigé par Simon Faghel-Soubeyrand sous la supervision de Frédéric Gosselin. Ce manuscrit sera soumis pour publication en tant que *Short Report* dans la revue *Psychological Science*.

L'idée originale du projet (la technique d'induction, les hypothèses et la procédure utilisée) vient de Frédéric Gosselin. Le code expérimental a été écrit principalement par Simon Faghel-Soubeyrand. La mise en place de l'étude (ex. le recrutement/passation des participants) a été supervisée par Simon Faghel-Soubeyrand. Le code d'analyse, le traitement statistique des données ainsi que les figures ont été créés par Simon Faghel-Soubeyrand. La recension de la littérature a été effectuée par Simon Faghel-Soubeyrand et l'écriture de l'article a été faite par Simon Faghel-Soubeyrand, Nicolas Dupuis-Roy et Frédéric Gosselin.

**When right is right: Inducing the use of the right eye enhances face-sex discrimination performance**

Faghel-Soubeyrand<sup>1</sup>, S., Dupuis-Roy, N. & Gosselin<sup>1</sup>, F.

1. Département de psychologie, Université de Montréal



## ABSTRACT

Face recognition ability varies tremendously among neurologically typical individuals. What causes these differences is yet to be known. Here, we first measured the use of local facial information in 140 neurotypical individuals during a face-sex discrimination task using *Bubbles*, and found that the eye located on the right side of the face image correlated positively with performance whereas the use of the left eye correlated negatively with performance. With these correlates as priors, we then induced 100 of these participants to use either the left or the right eye by eliminating, unbeknownst to them, the sex cues in the non-target eye region. After a one-hour training session, the right-eye induced participants improved more their performance than the left-eye induced group. This is the first clear evidence of a causal link between the use of specific information and face recognition ability: right-eye usage not only predicts but causes better face-sex discrimination.

A major achievement of the ordinary human visual system is its ability to decipher information about an individual's identity, gender, and emotional state from a face stimulus with impressive efficiency and speed (e.g. Jeffreys, 1996). But not all humans are equally competent at face recognition. Indeed, face recognition ability varies tremendously among neurologically typical individuals (e.g. Duchaine & Nakayama, 2006; Russell, Duchaine & Nakayama, 2009).

Research in cognitive neuroscience and psychology has only begun to unveil the perceptual mechanisms responsible for these individual differences. Observers that process the face “holistically” tend to be better face recognizers (DeGutis et al., 2013; Wang, Fang, Tian & Liu, 2012; but see Konar, Bennett, & Sekuler, 2010). Moreover, face recognition ability correlates with narrower tuning to horizontal information (Pachai, Sekuler & Bennett 2013) and with the use of eye information (Tardif et al., submitted). These findings, however, fall short of establishing a causal link between perceptual mechanisms and face recognition ability. It may be, for example, that the use of horizontal information and face recognition ability are not directly linked but have a common cause.

A few studies attempted to go beyond such correlations. Three of them were single-case studies (Brunsdun et coll., 2006; DeGutis et coll., 2007; Schmalzl et coll., 2008). In the most thorough one, DeGutis and colleagues (2014) trained twenty-four developmental prosopagnosics to recognize faces that varied along a combination of eye-to-eyebrow and nose-to-mouth spacing information. Subjects exhibited a modest improvement on measures of front-view face discrimination. Unfortunately, the training procedure employed by DeGutis and colleagues was rather tedious (~8 hours on a three weeks period) and unspecific: it is not known, for example, which interattribute distances, if any, are responsible for the improvement.

Here, we first reveal the use of facial information of skilled and poor face-sex recognizers using the Bubbles technique (Gosselin & Schyns, 2001). With these correlates as priors, we then induce specific information usage in a single one-hour training session. Finally, participants repeated the Bubbles face-sex discrimination task to assess i) the changes in use of

information and ii) its effect on performance. We show that right-eye usage not only predicts but causes better face-sex discrimination.

## **Method**

### *Participants*

A total of 140 participants (45 men; 18-30 years old) with normal or corrected-to-normal vision completed the pre-induction Bubbles face-sex discrimination task. The last 100 tested participants (35 men; 18-30 years old) also completed the induction and post-induction Bubbles face-sex discrimination tasks. The experimental protocol was approved by the ethics board of the University of Montreal and the study was conducted in accordance with the approved guidelines. Informed consent was obtained from each participants and monetary compensation was given to all participants according to the University of Montreal ethics committee.

### *Pre- and Post-induction stimuli*

The three hundred colour face images (150 men) from Dupuis-Roy et al. (2009) were used to generate the stimuli. These face images were scaled, rotated and translated so that the position of the eyes, the nose, and the mouth coincided as much as possible while preserving relative distances between them. Inter-pupil distances were 40 pixels on average. Importantly, face images were randomly flipped on the vertical axis on every trial to control for possible information asymmetries (e.g. illumination differences). Pre- and post-induction Bubbles face-sex discrimination tasks stimuli were created by superimposing an opaque grey mask punctured by randomly located Gaussian windows of 3 pixels of standard deviation, or *bubbles*, on randomly selected face images (Gosselin & Schyns, 2001; fig. 3a). Stimuli subtended 3.08 degrees of visual angle (256 x 256 pixels).

### *Induction stimuli*

Stimuli for the induction phase of the Bubbles face-sex discrimination task were identical to the pre- and post-induction Bubbles face-sex discrimination ones, except that the non-target eyes in the face images (e.g. the left eye for right-eye induction group) were replaced by an androgynous eye. This androgynous eye was cropped from the mean of all face images (fig. 3b). The choice to induce the use of one of the two eyes had three main motivations. First, previous studies have shown that the eye areas of the face are the most important cues for the discrimination of sex from faces (e.g. Dupuis-Roy et al., 2009; Gosselin & Schyns, 2001; Russell, 2003). We thus reasoned that participants would learn to use the only eye area containing face-sex information (i.e. the target eye). Second, as we will soon show, right-eye usage is linked to higher performance scores while left-eye usage is linked to lower performance scores. Third, both eye regions convey exactly the same amount of face-sex discrimination information because faces were vertically flipped with a probability of 0.5 on every trial. Thus, any observed difference between the induction groups—differences in information usage and performance—can be ascribed to the experimental manipulation.

Importantly, during the induction phase, the purpose of the Bubbles procedure was not to reveal the use of information. Instead, we employed the Bubbles procedure during the induction phase to maintain accuracy constant at 75% correct throughout the entire experiment, to make the experimental manipulation more difficult to notice (a comparison between the two eyes was not always possible due to the random sampling), and to give an impression of continuity between experimental phases in the hope that subjects would remain unaware of the eye manipulation.

### *Apparatus*

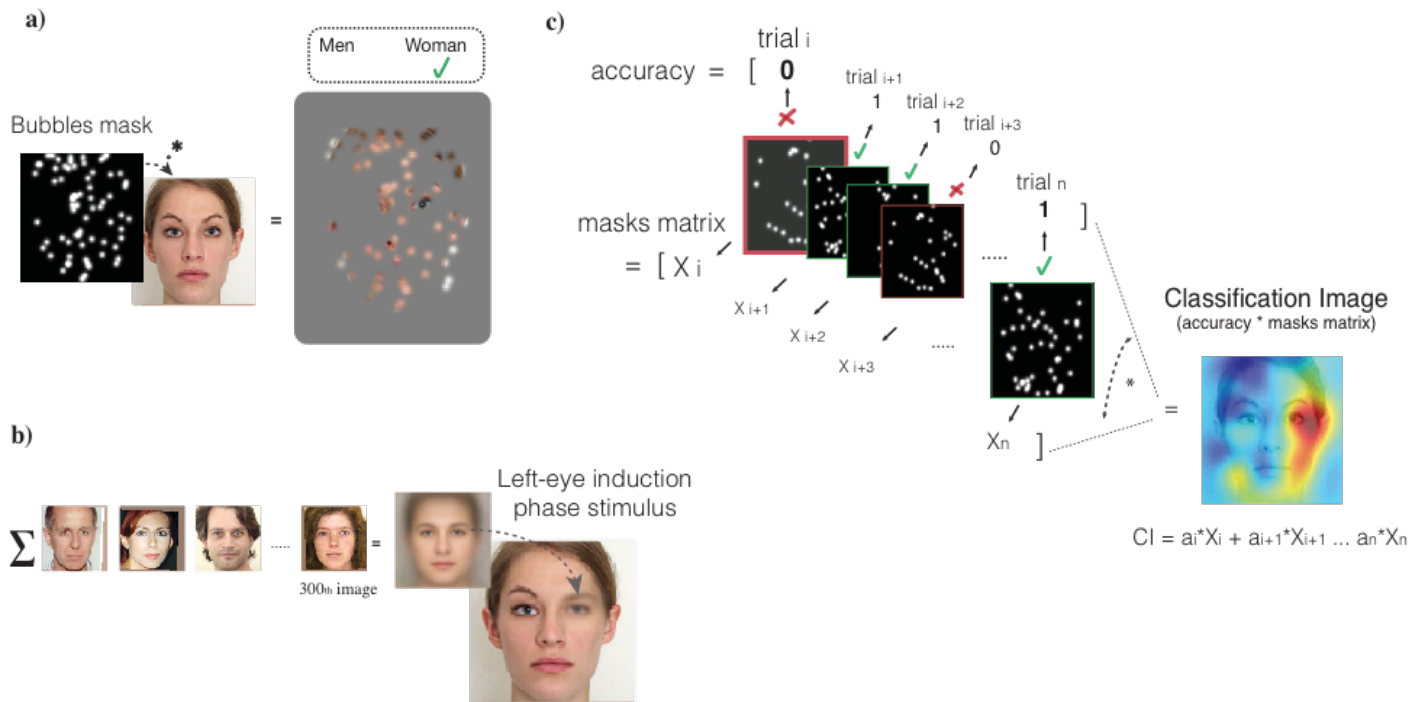
The experimental program ran on Mac Pro computers in the Matlab environment (The Mathworks, Natick, MA, USA), using functions from the Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). Stimuli were shown on 27-inch ASUS VG278H LCD monitors (1600x900 pixels, at 60Hz) calibrated to allow linear manipulation of luminance. Participants performed

the experiment in a dimly lit room. Chin rests were used to maintain viewing distance at 90 cm.

### *Procedure*

In the pre-induction phase, 140 participants completed three 100-trial blocks of a Bubbles face-sex discrimination task. In the induction phase, a randomly selected subset (N=100) of these 140 participants also completed five 100-trial blocks of induction Bubbles face-sex discrimination task. During this phase, participants were randomly assigned to either the left- (N=50) or right-induction group (N=50). In the post-induction phase, these 100 participants underwent three 100-trial blocks of the initial Bubbles face-sex discrimination task. Participants could take a brief pause between blocks. The experiment was followed by a debriefing session, where we verified whether subjects had been aware of the eye manipulation during the induction phase. The pre-induction, induction, post-induction, and debriefing phases were conducted on a single day and lasted approximately 2 hours.

Every trial comprised the following sequence of events: a black fixation cross centered on a uniform mid-grey field (750 ms), a uniform mid-grey field (250 ms), and a stimulus presented until a response was made by the participant (see *Bubbles stimuli*). Subjects were asked to indicate the sex of the face in the stimulus by pressing on the appropriate keyboard key as accurately and as rapidly as possible. Response keys were counterbalanced across subjects. No accuracy feedback was provided to subjects. The quantity of face information (i.e. the number of *bubbles*) necessary to maintain an accuracy of 75% was adjusted on a trial-by-trial basis with the QUEST algorithm (Watson & Pelli, 1983). Royer and colleagues (2015) showed that this number-of-bubbles threshold is strongly correlated with three commonly used face recognition ability tests ( $r=-.79$  with the mean of the Cambridge Face Memory Test +, the Cambridge Face Perception Test, and the Glasgow Face Matching Test short version), even after controlling for general visual and cognitive processing ability ( $r_{\text{partial}}=-.72$  after having factored out the mean of the Horse Memory Test, the Cambridge Car Memory Test, and the Cambridge Hair Memory Test). We used the number of bubbles required to maintain an accuracy of 75% as our individual index of face-sex discrimination performance.



**Figure 3.** Creation of stimuli and classification image computation. (a) A mask punctured by randomly positioned Gaussian windows of 3 pixels of standard deviation, or *bubbles*, was superimposed on a face image to create face stimulus on each trial. (b) On the induction phase only, diagnostic information from the non-target eye region (here the right-eye for a left-eye induction stimulus) was removed from the face image. This was done by replacing the non-target eye region with an androgynous eye that was obtained from the average men and women faces of the entire set (see *stimuli*). (c) To reveal individual use of facial information in the task, Classification Images were computed as the multiple linear regression between the vectorised *bubbles* mask matrix and the accuracy vector.

## Results

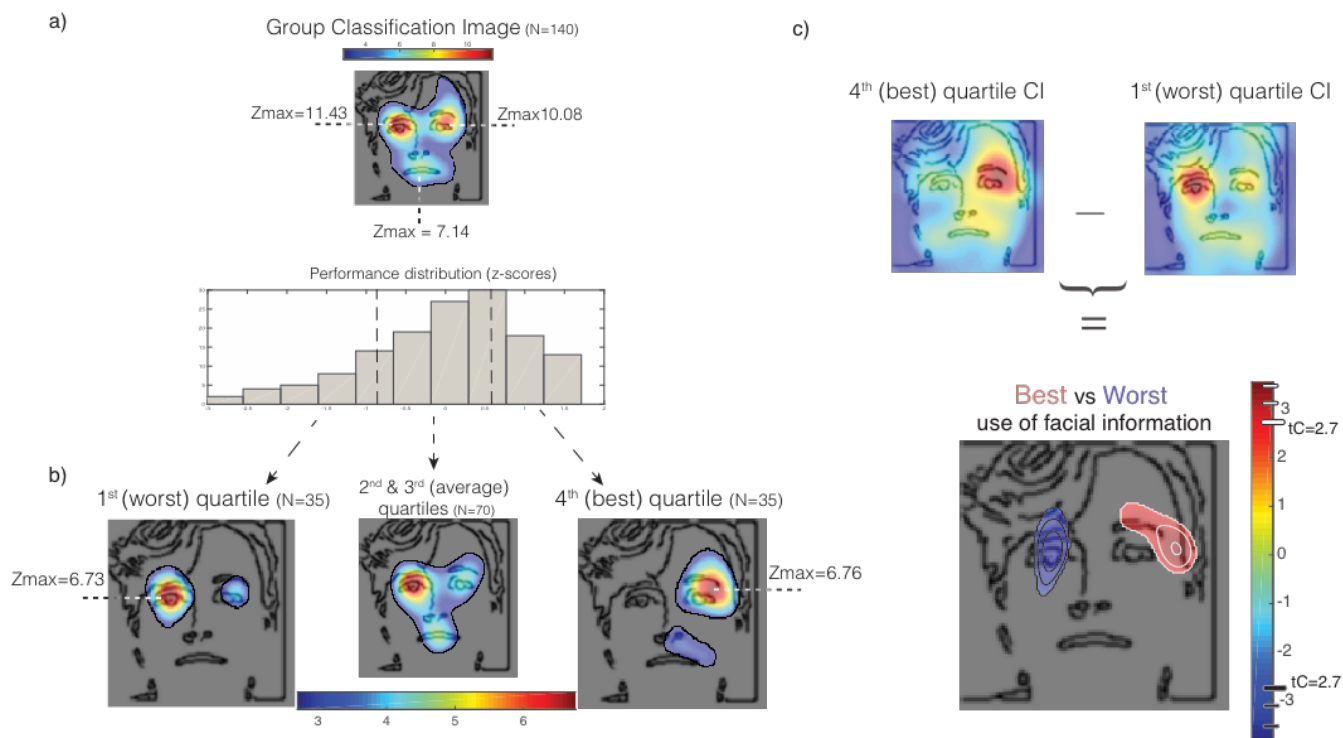
Our face-sex discrimination performance index, that is the number of *bubbles* required to reach an accuracy of 75%, ranged from a low of 23 to a high of 89 bubbles ( $M=46.51$ ; Median = 43.74;  $SD = 14.01$ ).

### *Pre-induction results*

We first replicated previous results showing that the eyes and mouth regions are, on group-average, the most important facial cues for face-sex discrimination. We performed multiple linear regressions between the location of the bubbles and response accuracy for each subject. The plane of regression coefficients yielded by this operation is called a classification image (CI, see fig. 3c). It reveals which locations on the face image (i.e. which parts or features of faces) are systematically associated with a participant's accurate face-sex discrimination. We first looked at the overall use of information: we summed the 140 individual CIs, smoothed them with a Gaussian kernel of 12 pixels of standard deviation and transformed them in z-scores. A Cluster test (Chauvin et al., 2005) corroborated previous findings that identified the eye and mouth regions as the most important face-sex cues (fig. 4a; search region=11,429 pixels; arbitrary z-score threshold = 2.7; cluster size statistical threshold = 277 pixels;  $p<.05$ , two-tailed; e.g. Dupuis-Roy et coll., 2009). As in previous Bubbles (e.g. Gosselin & Schyns, 2001; Dupuis-Roy et al., 2009), eye-tracking (Butler et al., 2005) and chimeric faces studies (Butler et al., 2005; Innes, Burt, Birch & Hausmann, 2015), there was a slight bias for the use of the left-eye region compared to the right-eye region (see fig.4, a). This difference, however, did not reach statistical significance ( $M_{\text{left-eye}}=1.01$ ,  $M_{\text{right-eye}}=-0.01$ ;  $F=(1, 278)=1.71$ ,  $p=.1925$ ).

Next, we examined the facial information used by skilled and poor face-sex recognizers. As a first approximation, we summed the CIs of the participants in the first performance quartile (worst subjects,  $N=35$ ), smoothed them with a Gaussian kernel of 12 pixels of standard deviation, transformed them in z-scores and applied a Cluster test (search region=11,429 pixels; arbitrary z-score threshold=2.7; cluster size statistical threshold=277 pixels;  $p<.05$ ,

two-tailed). We did the same with the CIs of the participants in the last performance quartile (best subjects, N=35) and in the two middle performance quartiles (average subjects, fig. 4b, N=70). Statistically significant regions from these subgroup's CIs revealed that the worst participants rely more on the left-eye region whereas the best participants rely more on the right-eye region. A contrast between the last and first quartile CIs confirmed this result (fig. 4c; search region=11,429 pixels; arbitrary z-score threshold=2.7; cluster size statistical threshold=277 pixels;  $p < .05$ , two-tailed). These results cannot be explained by information asymmetries between the two regions; face stimuli had a 50% probability to be mirror flipped on each trial.



**Figure 4.** a) Overall use of information. b) Use of information as a function of sex-discrimination ability quartiles. c) Contrast between the use of information of best (4<sup>th</sup> quartile) and worst (1<sup>st</sup> quartile). Colored blobs represent face areas associated with accurate face-sex discrimination above statistical threshold. Background face outline added to help interpretation.



As grouping subjects in quartile may remove important statistical information, we conducted another, more fine-grained analysis: a full-factorial second-order multiple linear regression between the use of facial information as the independent variables (IV) and face-sex discrimination performance index as the dependent variable (DV). Since we could not use the entire individual CIs as the independent variables —this produces exceeding collinearity between variables— we used the mean of the z-scores in the individual CIs within the left-eye, right-eye and mouth region (i.e. the most important face-sex cues). Four outliers—outside the 95% confidence interval of the residuals—were excluded from the analysis. The model explained 13% of the ability variance ( $r^2=.1346$ ;  $F(6, 129)= 3.34$ ;  $p=.0043$ ; with no significant interaction). Only two regression coefficients of the model were significantly associated with performance: the right-eye z-scores were positively correlated with performance ( $b_{\text{right-eye}}=0.1844$ ;  $t(129)=2.23$ ;  $p=.0276$ ) while the left-eye z-scores were negatively correlated with performance ( $b_{\text{left-eye}} =-.286$ ;  $t(129)=-3.4156$ ;  $p=.0009$ ). The regression coefficient corresponding to the mouth area did not reach statistical significance ( $b_{\text{mouth}}=-0.0943$ ;  $t(129)=-1.14$ ;  $p=.256$ ). Lastly, a similar analysis was carried out between the use of facial information as IVs and individual average response time as DV. Here, only one regressor was significantly linked to the relative speed of a participant's responses: the use of mouth region, with a positive beta coefficient of .2419 ( $r^2=.1071$ ;  $F(6, 132)=2.6387$ ;  $p=.0189$ ; with no significant interaction;  $b_{\text{RTmouth}} =.2419$ ;  $t(129)=2.8869$ , $p=.0045$ ;  $b_{\text{right-eye}} = -.0925$ ;  $t(129)=-1.0900$ , $p=.2777$ ;  $b_{\text{left-eye}} =-.1463$ ;  $t(129)=-1.7137$ , $p=.0889$ ). This suggests that participants with slower processing of face-sex information tended to use the mouth region more.

To summarize, both analyses revealed a systematic variation in the use of eye facial information from unskilled to skilled face-sex recognizers: the worst participants rely more on the left-eye region whereas the best participants rely more on the right-eye region. However, it remains a possibility that this systematic variation in use of information is non-causally linked to face-sex recognition.

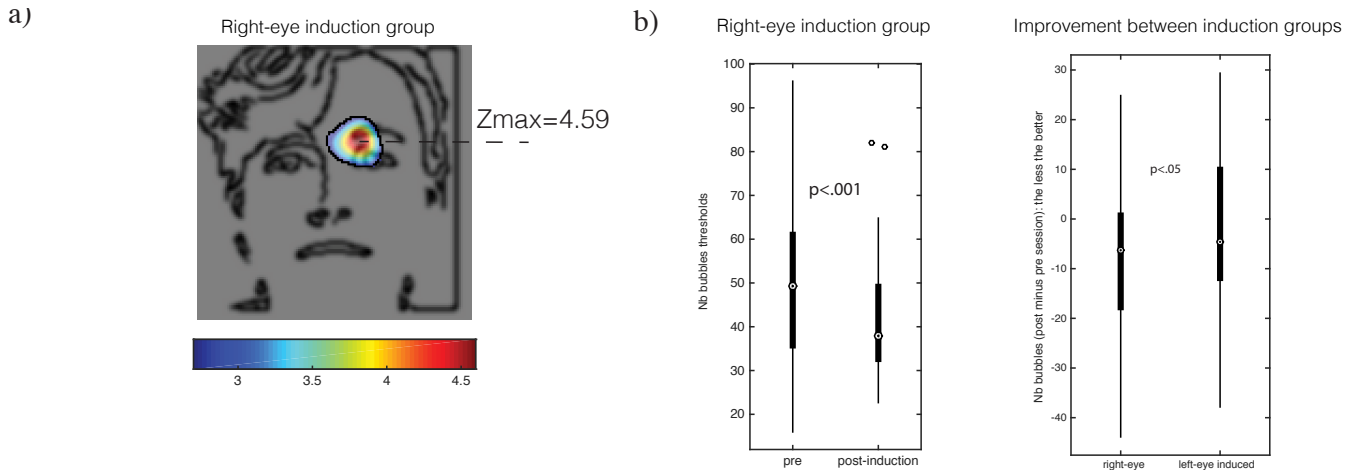
*Comparison of ability and use of information in pre- and post-induction phases.*

In the induction phase, two groups of 50 randomly selected individuals were induced to use either the left or the right-eye by eliminating the sex information in the non-target eye. The debriefing sessions indicated that no participant reported seeing anything unusual in the stimuli and, even after being asked explicitly, no participant were aware of the manipulation of eye information during the induction phase.

To test whether we successfully induced the use of the target eye regions, we contrasted the post- and pre-induction CIs in each induction group. In the right-eye induction group, a significant blob in the right-eye region confirmed the induction of a greater use of the target eye (Cluster test; search region=11,429 pixels; arbitrary z-score threshold=2.7; cluster size statistical threshold=277 pixels;  $p < .05$ , two-tailed; fig. 5). In the left-eye induction group, however, no blob attained statistical significance. We confirmed both results by contrasting the mean of the z-scores within the target eye region for each group: a two-way ANOVA with mean target-eye usage as DV and induction group (left-eye induction, right-eye induction) and experimental phases (pre-induction, post-induction) as independent variable displayed a significant interaction ( $F(1,98)=6.21$ ,  $p=.0144$ ). Post-hoc comparisons showed that individuals from the right-eye induction group increased their use of the right-eye (one-tailed paired-samples t-test,  $M_{\text{pre-induction}}=0.3024$ ;  $SD_{\text{pre-induction}}=.7742$ ;  $M_{\text{post-induction}}=0.6212$ ;  $SD_{\text{post-induction}}=.6789$ ;  $t(49)=2.012$ ;  $p=.0247$ ) and individuals from the left-eye induction group did not change their use of the left-eye between the pre- and post-induction phases (one-tailed paired t-test;  $M_{\text{pre-induction}}=.5294$ ;  $SD_{\text{pre-induction}}=.7737$ ;  $M_{\text{post-induction}}=.2787$ ;  $SD_{\text{post-induction}}=.8867$ ;  $t(49)=1.52$ ;  $p=.9325$ ).

Did this change in the use of facial information translated into better individual performance? A comparison of the performance improvements (i.e. the difference between pre- and post-induction phases) in both groups revealed a greater improvement in the right-eye induction group ( $M=-7.97$ ;  $SD=16.50$ ) than in the left-eye induction group ( $M=-2.21$ ;  $SD=15.45$ ; one-tailed independent t-test;  $t(98)=1.80$ ;  $p=0.037$ ). Moreover, the right-eye induction group fared better after compared to before the induction (one-tailed paired-samples t-test;  $M_{\text{pre-induction}}=48.94$ ;  $SD_{\text{pre-induction}}=16.77$ ;  $M_{\text{post-induction}}=40.97$ ;  $SD_{\text{post-induction}}=13.43$ ;  $t(49)=3.412$ ;

$p=6.5 \times 10^{-4}$ ). The performance of the left-eye induction group, however, did not differ between the pre- and post-induction phases ( $M_{\text{pre-induction}}=45.82$ ;  $SD_{\text{pre-induction}}=16.65$ ;  $M_{\text{post-induction}}=43.60$ ;  $SD_{\text{post-induction}}=16.22$ ;  $t(49)=1.01$ ;  $p=.16$ ).



**Figure 5.** Impact of the implicit induction procedure on a) the use of facial information and b) individual face-sex discrimination performance. a) the right-eye induction group post- versus pre-induction CI contains a significant cluster in the target area. b) right-eye induced participants performed better after compared to before induction and improved more than the left-eye induced participants.

## Discussion

We revealed, for the first time, that the use of specific facial information not only predicts but also causes better face-sex categorization in neurotypical individuals. We began by measuring the default use of local facial information during a face-sex discrimination task using *Bubbles* (Gosselin & Schyns, 2001). We showed that the use of the right eye from the observer's perspective is positively correlated with performance whereas the use of the left eye is negatively correlated with performance. Next, we implicitly induced participants to increase their use of either the left or the right eye by eliminating the sex cues in the non-target eye region. The induction was successful for the right-eye induction participants but not for the left-eye induction ones. The successful induction was accompanied, as expected, by a greater

improvement in the performance of the right-eye induction participants than in the left-eye induction participants. This is the first clear evidence for a causal link between the use of specific information and face recognition ability.

Why would the use of the *right-eye* cause better recognition performance? It is tempting to interpret this left versus right use of information from a hemispheric lateralization perspective. Indeed, parafoveal visual inputs are first processed in their respective contralateral hemisphere (i.e. the left-eye in the image first passes through the right-hemisphere; Yovel, Tambini & Branman, 2004). Yet, such an interpretation is seemingly at odd with a classic right hemisphere (RH) dominance hypothesis for face processing, considering that it would predict that *left-eye* usage produces higher performance (Rhodes, 1985). A more promising hypothesis worth exploring is that face-sex recognition is a particular case of face processing ability. Both behavioral and brain data (e.g. Mason & Macrae, 2004) have indeed showed that face identification is processed more asymmetrically in favor of the RH while face-sex discrimination recruits more bilateral cortical structures. An increase in right-eye usage in normal RH lateralized individuals may thus enhance face-sex discrimination performance by further recruiting the bilateral areas that are specific to the tasks.

The weak effects observed in previous face recognition training studies have been attributed to the high heritability of face recognition ability because it implied little possible influence of environmental/experimental factors on this capacity (Wilmer, 2017). DeGutis and coll. (2014), for example, required three weeks to train their subjects and produced moderate effects on individual recognition ability. The fact that we managed to increase individual performance within an hour of training suggests, on the contrary, that this ability is not entirely settled; there is still room for improvements both in normal face recognition capacity and in the experimental training procedures that enables modification of this ability. While crucial questions regarding real-world and task generalization remains unanswered, our induction procedure shows promises as a mean for individuals specifically impaired in face recognition (developmental prosopagnosics, Duchaine & Nakayama, 2006) and professionals relying on strong face processing (e.g. police officers, security agents, customs officials) to improve their abilities.



## References

- Brunsdon, R., Coltheart, M., Nickels, L., & Joy, P. (2006). Developmental prosopagnosia: A case analysis and treatment study. *Cognitive Neuropsychology*, 23(6), 822-840.
- Chauvin, A., Worsley, K. J., Schyns, P. G., Arguin, M., & Gosselin, F. (2005). Accurate statistical tests for smooth classification images. *Journal of vision*, 5(9), 1-1.
- DeGutis, J. M., Bentin, S., Robertson, L. C., & D'Esposito, M. (2007). Functional plasticity in ventral temporal cortex following cognitive rehabilitation of a congenital prosopagnosic. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(11), 1790-1802.
- DeGutis, J., Wilmer, J., Mercado, R. J., & Cohan, S. (2013). Using regression to measure holistic face processing reveals a strong link with face recognition ability. *Cognition*, 126(1), 87-100.
- DeGutis, J., Cohan, S., & Nakayama, K. (2014). Holistic face training enhances face processing in developmental prosopagnosia. *Brain*, 137(6), 1781-1798.
- Duchaine, B., & 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(4), 576-585.
- Dupuis-Roy, N., Fortin, I., Fiset, D., & Gosselin, F. (2009). Uncovering gender discrimination cues in a realistic setting. *Journal of Vision*, 9(2), 10-10.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision research*, 41(17), 2261-2271.
- Innes, B. R., Burt, D. M., Birch, Y. K., & Hausmann, M. (2016). A leftward bias however you look at it: Revisiting the emotional chimeric face task as a tool for measuring emotion lateralization. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 21(4-6), 643-661.
- Jeffreys, D. A. (1996). Evoked potential studies of face and object processing. *Visual Cognition*, 3(1), 1-38.
- Konar, Y., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2010). Holistic processing is not correlated with face-identification accuracy. *Psychological Science*, 21(1), 38-43.

- Pachai, M. V., Sekuler, A. B., & Bennett, P. J. (2013). Sensitivity to information conveyed by horizontal contours is correlated with face identification accuracy. *Frontiers in psychology, 4*.
- Royer, J., Blais, C., Gosselin, F., Duncan, J., & Fiset, D. (2015). When less is more: Impact of face processing ability on recognition of visually degraded faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(5), 1179.
- Russell, R. (2003). Sex, beauty, and the relative luminance of facial features. *Perception, 32*(9), 1093-1107.
- Russell, R., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2009). Super-recognizers: People with extraordinary face recognition ability. *Psychonomic bulletin & review, 16*(2), 252-257.
- Schmalzl, L., Palermo, R., Green, M., Brunsdon, R., & Coltheart, M. (2008). Training of familiar face recognition and visual scan paths for faces in a child with congenital prosopagnosia. *Cognitive Neuropsychology, 25*(5), 704-729
- Tardif, J., Duchaine, B., Morin Duchesne, X., Cohan, S., Blais, C., Fiset, D., Royer, J., Nakayama, K., & Gosselin, F. (submitted). Use of face information varies systematically from developmental prosopagnosics to super-recognizers.
- Watson, A. B., & Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. *Attention, Perception, & Psychophysics, 33*(2), 113-120.
- Wang, R., Li, J., Fang, H., Tian, M., & Liu, J. (2012). Individual differences in holistic processing predict face recognition ability. *Psychological science, 23*(2), 169-177.
- Wilmer, J. B. (2017). Individual Differences in Face Recognition: A Decade of Discovery. *Current Directions in Psychological Science, 26*(3), 225-230.

## DISCUSSION GÉNÉRALE

L'étude présentée dans ce mémoire a d'abord révélé que l'utilisation d'information visuelle moyennée d'un large échantillon de 140 individus était décomposable en plusieurs stratégies qualitativement distinctes. Ces stratégies sont capables de prédire (c.-à-d. qu'elles sont *corrélées* à) l'habileté des individus à la tâche. L'utilisation d'un modèle de régression multiple de second ordre a confirmé ce lien corrélationnel et a démontré que ces différentes stratégies visuelles expliquaient une quantité significative (~13%) de la variation de performance en discrimination faciale du sexe. Ces résultats s'ajoutent ainsi aux rares corrélats découverts à ce jour de l'habileté en reconnaissance faciale dans une population saine (c.-à-d. l'utilisation de la structure horizontale des stimuli faciaux : Pachai et coll., 2013; la qualité du codage dans les dimensions du *face-space* : Dennett et coll., 2012; Rhodes et coll., 2014 ; et les processus holistiques : DeGutis et coll., 2013 ; Richler, Floyd & Gauthier, 2015, mais voir Konar et coll., 2010).

Nous sommes ensuite allés au-delà des liens corrélationnels trouvés jusqu'ici. En *induisant* l'utilisation de la stratégie visuelle corrélée à une habileté supérieure (c.-à-d. l'utilisation de l'information faciale provenant de l'œil droit d'un visage), il a été possible de révéler que l'utilisation de cette représentation faciale n'est pas un épiphénomène d'une performance supérieure ; celle-ci a un impact *causal* et bénéfique sur la performance en reconnaissance faciale du sexe lorsque son utilisation est induite chez des individus sains. Ceci constitue la seule autre démonstration d'un facteur causal de l'habileté en reconnaissance faciale découvert chez une population saine après DeGutis et coll. (2014), et établit pour la première fois que



l'utilisation d'une représentation faciale spécifique cause une meilleure performance en discrimination faciale.

L'induction de l'utilisation de l'œil gauche a échoué chez l'autre groupe de participants. Nous pensons que cet échec peut être attribuable à une compétition de cette induction avec l'apprentissage perceptif —l'augmentation graduelle de l'habileté à extraire l'information pertinente à la tâche par l'expérience (Gibson, 1969 ; Herzog & Fahle, 1997; Guggenmos, Wilbertz, Hebart & Sterzer, 2016). En effet, il était prédit que l'utilisation de l'œil gauche diminuerait la performance des participants. Il est aussi possible que l'augmentation d'utilisation d'information désirée chez ce groupe ait été trop optimiste considérant le biais déjà présent des individus dans la population normale pour l'information provenant de l'œil gauche du visage (Schyns, Bonnar & Gosselin, 2002; Rousselet et coll., 2014; Ince et coll., 2016; voir aussi Innes, Burt, Birch & Hausmann, 2015 pour une revue des données suggérant un biais pour l'hémichamp gauche des visages). Ceci suggère qu'il est plus réaliste de modifier la SV d'individus pour une stratégie supérieure à celle qu'ils utilisent déjà, ou, à tout le moins, pour une qui diffère de celle qu'ils utilisent spontanément.

Concernant la relation corrélacionnelle trouvée entre l'utilisation de l'œil gauche, de l'œil droit et la performance, on peut se demander si ce lien a pu être forcé par une analyse par définition basée sur un *a priori* (la régression), ou si cette asymétrie dans les stratégies visuelles utilisées émergerait plutôt de façon naturelle dans la population saine. Autrement dit, pour comprendre plus en profondeur la mise en place de cette relation, il serait intéressant de déterminer si les

différences d'utilisation entre l'œil droit et gauche comptent pour une partie importante de la variation des stratégies visuelles entre individus normaux.

À cette fin, il est possible de tirer profit d'algorithmes de classification automatiques non supervisés, aussi appelés *clustering analysis* ou *unsupervised clustering* (Parson, Haque, Liu, 2004). Comparée à l'analyse de régression de second ordre où nous « forçons » la relation entre la variation de performance avec des *a priori* et des hypothèses spécifiques en tête, cette technique d'analyse est plutôt basée sur la relation naturelle entre les données. En effet, comme leur nom l'indique, les algorithmes non supervisés sont utilisés dans l'optique d'une recherche de bas en haut (*bottom-up*) afin de faire émerger des patrons naturels à partir de données multidimensionnelles —dans notre cas les ICs— sans l'intervention d'*a priori* théoriques de l'expérimentateur (Jain, 2010 pour une revue sur le *clustering*).

Nous avons utilisé cette technique lors d'une analyse supplémentaire portant sur la relation entre les ICs (SV) individuelles de l'échantillon de 140 participants. Ceci nous a permis de révéler que près de 80% de la variance présente dans les stratégies visuelles utilisées entre les participants était attribuable à la tension entre l'utilisation de l'œil droit et de l'œil gauche du visage (voir figure 6, p.42, pour une explication détaillée du processus d'analyse). En effet, le regroupement (*clustering*) d'individus par leur stratégie visuelle (IC individuelle) a montré que seuls deux sous-groupes (*clusters*) étaient en réalité discriminables par cette utilisation d'information dans notre échantillon ; le sous-groupe A (N=69) utilisait significativement l'œil gauche du visage tandis que le sous-groupe B (N=77) utilisait significativement l'œil droit et la bouche (pixel test,  $tP=3.49$ ,  $p=.05$ ). Notons également que le sous-groupe A utilisant

l'œil gauche était significativement moins performant à la tâche que le sous-groupe B, qui lui utilisait l'œil droit du visage ( $Mean_A = 49.26$ ,  $SD_A = 14.3883$  ;  $Mean_B = 44.26$ ,  $SD_B = 13.3$  ;  $F(1,138) = 4.36$ ,  $p = .03$ ). Par cette recherche basée sur les patrons d'organisation au sein des données, cette analyse de classification automatique fait la démonstration que la relation trouvée par la régression est une composante importante et naturelle des variations de stratégies visuelles utilisées au sein de la population normale, variations qui pourraient référer à des différences de représentations entre individus.



**Figure 6.** Utilisation d'information des sous-groupes (*clusters*) A ( $N=69$ ) et B ( $N=77$ ) émergeant d'une procédure de classification non supervisée. L'IC de chaque participant était d'abord divisée en 25 ( $5 \times 5$ ) quadrants d'égales dimensions qui prenaient chacun la valeur moyenne des pixels qu'il contenait sur l'espace de l'IC. Ces matrices  $5 \times 5$  étaient ensuite décomposées par une Analyse par Composante Principale (*PCA*) ; 7 des 25 composantes ont été choisies selon la règle de Kaiser (les *eigenvectors*  $> 1$ ) et un seuil de 80% de variance cumulée. Chaque individu avait ainsi un score sur chacune des 7 composantes. La *city block distance* (moyenne absolue de la différence entre les coordonnées) était ensuite calculée entre chaque pair d'observation individuelle, et le nombre de *clusters* optimal était finalement établi selon la méthode de *ward* et une valeur de silhouette maximale —comme implémentée par les fonctions *MATLAB linkage* et *evalclusters*. Seulement deux sous-groupes ou *clusters* d'individus optimalement dissimilaires sur leurs stratégies visuelles ont émergé de cette procédure. Ces *clusters* sont référés en tant que sous-groupes A et B.

## **Interprétation du lien causal entre la représentation de l'œil droit et la performance**

L'habileté en reconnaissance faciale dépend nécessairement de l'information faciale utilisée pour une tâche donnée. Ceci émerge du fait qu'il existe un contenu informationnel qui discrimine de manière optimale deux catégories (ou plus) dans toute tâche de reconnaissance visuelle (p. ex. la bouche pour la reconnaissance faciale émotionnelle de la surprise, les yeux pour la reconnaissance juste de la colère, *et cetera*; Smith et coll., 2005). Toutefois, nos résultats ne sont pas explicables par l'utilisation optimale de l'information telle que révélée par un observateur idéal (Gosselin et Schyns, 2001; Dupuis-Roy et coll., 2009). En effet, deux régions avec un contenu informationnel identique —l'œil gauche et droit du stimulus facial— ont ici été liées de façon opposée à l'habileté en reconnaissance faciale. Si ces résultats ne peuvent être expliqués par des écarts émergeant de sources purement physiques provenant des stimuli, ils doivent être compris selon les facteurs cognitifs et cérébraux (tels que des différences représentationnelles) qui permettent l'extraction et le traitement de cette information par les observateurs humains.

Ces variations entre représentations/stratégies visuelles pourraient-elles émerger de différences de latéralisations hémisphériques entre individus ? Notons d'abord que nos stimuli n'étaient pas présentés de façon tachistoscopique et que les régions de l'œil gauche et droit ne peuvent donc être assimilées à des entrées visuelles provenant de l'hémichamp gauche et droit, respectivement (p. ex. Rastatter & Loren, 1988). Malgré tout, il a été démontré sous des conditions presque identiques aux nôtres que les régions occipito-temporales de cerveaux sains traitent l'information de la région des yeux de façon controlatérale jusqu'à ~200ms après

la présentation du stimulus (Schyns et coll., 2003 ; Smith et coll., 2009 ; Smith, Gosselin & Schyns, 2012; Rousselet et coll., 2014; Ince et coll., 2016). Ceci est attribuable aux croisements des projections visuelles au chiasme optique faisant en sorte que les stimuli présentés dans l'hémichamp gauche sont traités d'abord par l'hémisphère droit, et *vice versa*. En prenant en compte ces considérations de même que les innombrables démonstrations neuroscientifiques montrant une dominance de l'hémisphère droit pour les tâches impliquant des visages (p. ex. Meadows, 1974; Yovel, 2008; Haxby, 2011), il aurait été évident de prédire qu'une plus grande utilisation de l'œil *gauche*, et non l'œil droit serait liée causalement à la performance. Cette hypothèse de l'hémisphère droit (*Right-hemisphere Hypothesis*) semble également s'accorder avec une littérature comportementale ayant montré un biais à répondre qu'un visage soit plus émotif lorsqu'il est présenté dans l'hémichamp gauche (*left-hemiface bias*, voir Innes, Burt, Birch & Hausmann, 2015 pour une revue) ainsi qu'avec des études qui ont utilisé le *divided visual field paradigm* (DVF, la technique consiste à présenter des stimuli suffisamment rapidement et en périphérie pour que leur traitement soit attribuable à l'HG ou l'HD, voir Bourne, 2006) ou l'oculométrie (*eye-tracking*, e.g. Butler et coll., 2005).

Il est d'abord important de souligner que ce que l'on veut dire par dominance hémisphérique dans ces études est qu'*en moyenne*, à travers la population normale, les individus tendent à avoir une plus forte activation/recruter plus significativement les zones visuelles corticales de l'HD en comparaison à celles de l'HG pendant qu'ils exécutent une tâche impliquant des visages. Ainsi, ces résultats signifient seulement que l'humain semble avoir un biais fonctionnel généralisé pour le traitement de l'information faciale au sein de l'HD —donc provenant de l'hémichamp gauche—, *mais pas que cette stratégie soit la meilleure ni la plus*

*efficace pour le traitement de cette information faciale.* En effet, contrairement à l'objet du présent mémoire, ces études ne se sont pas intéressées aux différences individuelles présentes pour ces biais cérébraux ou ont même considéré ces variations comme du bruit expérimental. Rappelons ici que le peu d'études s'étant intéressé au lien entre activation cérébrale et variations d'habiletés en reconnaissance faciale dans une population saine (Huang et coll., 2014; Furl et coll., 2011) a par ailleurs trouvé que la performance en reconnaissance faciale était liée à une plus grande sélectivité d'activation pour les visages au sein de régions spécifiques (l'OFA et le FFA) *dans les deux hémisphères* (le coefficient de corrélation était même un peu plus élevé dans l'hémisphère gauche dans l'étude de Huang et coll., 2014, et non pas pour l'HD). Cette relation bilatérale avec la performance a été observée conjointement avec une asymétrie classique du signal en faveur de l'hémisphère droit quand elle était moyennée à travers l'échantillon complet.

Il est ainsi possible de constater que nos données *moyennées* indiquent que la stratégie générale des 140 individus repose sur les yeux du visage (un léger biais pour l'utilisation de l'œil gauche n'a pas atteint la signification statistique<sup>1</sup>, voir aussi des résultats similaires dans Schyns, Bonnar & Gosselin, 2002; Butler et coll., 2005; Rousselet et coll., 2014 ; Ince et coll., 2016; Innes et coll., 2015).

1. Une asymétrie d'utilisation d'information similaire a été observée lors d'une analyse supplémentaire de régressions multiples entre les temps de réponses rapides (pour les essais exacts seulement) et les masques de bulles à chaque essai (non inclut dans l'article, Z-max left-eye = 7.78, Z-max right-eye = 6.64 ; 57% de l'échantillon ont un z-score plus élevé dans la région de l'œil gauche versus droit) ainsi que dans l'échantillon indépendant de 107 participants de Dupuis-Roy et coll. (soumis; Z-max left-eye = 6.2, Z-max right-eye = 5.3). Aucune de ces tendances n'a toutefois atteint signification.

Nous avons toutefois pu démontrer à deux reprises que cette stratégie *moyenne* des individus sains (c.-à-d. l'utilisation des deux yeux du stimulus facial) ne révèle pas le traitement optimal en reconnaissance faciale ; la stratégie la plus efficace repose plutôt sur l'utilisation de l'œil droit du visage présenté. Conjointement, ces résultats et ceux obtenus par Huang et coll. (2014; Furl et coll., 2011) appuient la distinction entre une stratégie générale (c.-à-d. moyennée) et une stratégie efficace; ils suggèrent que l'idée classique d'une dominance de l'HD pour la reconnaissance faciale ne s'applique pas nécessairement à la *performance* (c.-à-d. à l'efficacité) en soi. Une hypothèse alternative est que cette dominance de l'HD ne s'applique pas à l'habileté en reconnaissance faciale dans son ensemble (c.-à-d. qu'elle ne s'appliquerait pas à la reconnaissance faciale du genre, par exemple). Il existe en effet des données suggérant que la reconnaissance faciale du genre pourrait être codée selon des mécanismes perceptifs distincts (Schyns, Bonnar et Gosselin, 2002; Joyce et coll., 2006; Dupuis-Roy et coll., 2009; Dupuis-Roy et coll., soumis) qui seraient sous-tendus par des substrats cérébraux qui lui sont propres (Mouchetant-Rostaing, Giard, Bentin, Aguera, & Pernier, 2000). Une étude ayant utilisé à la fois l'IRMF et un paradigme de DVF (Mason et Macrae, 2004) a par exemple observé que le traitement de l'identité faciale était codé asymétriquement en faveur de l'HD tandis que le traitement facial du genre se faisait selon un patron d'activation davantage bilatéral. Une augmentation de l'utilisation de l'œil droit chez nos participants neurotypiques a ainsi pu produire une amélioration de la performance en reconnaissance faciale du sexe en recrutant davantage les régions cérébrales bilatérales liées au traitement spécifique à cette tâche (voir aussi Lovén, Svärd, Ebner, Herlitz & Fische, 2014 pour un rôle spécifique du gyrus fusiforme gauche en discrimination faciale du sexe)

Quoi qu'il en soit, de futures études utilisant des méthodologies d'imagerie cérébrale appropriées (p. ex. Smith et coll., 2009; Smith, Gosselin & Schyns, 2012; Ince et coll., 2016) seront nécessaires pour adresser de front ces différentes pistes afin de mieux comprendre la relation causale démontrée au sein de ce mémoire. À ce niveau, la méthode *Bubbles* semble avoir certaines limites importantes qui sont exacerbées dans son utilisation pour l'étude des différences individuelles. Celle-ci nécessite un nombre élevé d'essais avant d'obtenir des données nettes au niveau individuel —souvent dans les milliers dépendamment des dimensions échantillonnées. De plus, les régressions de second ordre sur les différences individuelles nécessitent un échantillon de participants substantiel. Tout ceci rend d'une part la collecte de donnée plus difficile pour les participants, et prend d'autre part beaucoup de ressources et de temps à exécuter pour les chercheurs. Une technique alternative, abordable et rapide consisterait à utiliser l'électroencéphalographie (EEG) et la méthode de *frequency tagging* (Norcia et coll., 2015) afin de cibler l'intégration individuelle et conjointe des différentes parties d'un visage au sein du cortex (Faghel-Soubeyrand & Gosselin, 2017) sur des cerveaux performants et sous-performants en reconnaissance faciale. Pour approfondir cette relation, il serait aussi intéressant de corrélérer des mesures d'habiletés standardisées (p. ex. *Cambridge Face Memory Test*—CFMT; Duchaine & Nakayama, 2006) à des méthodes d'analyses révélant les différences de représentations visuelles internes au sein du cortex telles que les matrices de dissimilarité développées récemment (Kriegeskorte, 2008; Kriegeskorte & Kievit, 2013; Charest, Kievit, Schmitz, Deca & Kriegeskorte, 2014). À travers ces géométries représentationnelles, il serait par exemple possible de réunir sous un code commun l'information visuelle, la distance relative entre les représentations mentales stockant ces



informations ainsi que les différences de traitement hémisphériques/corticales précises qui sous-tendent une reconnaissance optimale. Il est en effet concevable que la représentation interne de différentes identités ou des deux genres soit plus dissimilaire chez un individu performant, et donc plus facilement discriminable par l'observateur lors d'une tâche perceptive en 2AFC comme celle utilisée dans la présente étude. Il serait tout aussi intéressant de décrire et quantifier les changements (par ex. le type de géométrie et les distances) entre les différentes représentations internes d'un individu qui se verrait induire une stratégie visuelle optimale.

## CONCLUSION

Nous avons pu démontrer pour la première fois que l'utilisation d'une représentation faciale spécifique causait de meilleures performances en reconnaissance faciale. À la date de remise de ce mémoire, une seule étude (DeGutis, Cohan & Nakayama, 2014) a également pu révéler un facteur cognitif causal de la performance en reconnaissance faciale sur des individus neurotypiques (Brundson et coll., 2006; DeGutis et coll., 2007 et Schmalzl et coll., 2008 étant toutes des études de cas). Il semble toutefois évident que des études supplémentaires utilisant des moyens inductifs seront nécessaires pour généraliser la relation causale trouvée ici à d'autres traitements perceptifs faciaux tels que l'identification faciale, la discrimination d'émotions ou la détection faciale (Yovel et Duchaine, 2014; Dobel et coll., 2008; LeGrand et coll., 2006). À ce niveau, plusieurs questions demeurent ouvertes : existe-t-il une stratégie optimale à adopter pour toutes les tâches de reconnaissance faciale ? L'observateur devrait-il plutôt adapter cette stratégie selon les différentes tâches ? La stratégie optimale pourrait se

trouver au centre de la tension entre ces deux pôles — localement sous-optimale, mais globalement la plus efficace à utiliser (Smith et coll., 2005). De façon plus large, il semble aussi important de tester empiriquement le degré auquel l’habileté en reconnaissance faciale est commune (corrélée) à travers ces différentes décisions perceptives (c.-à-d. genre, identité, *et cetera*). Ces questions sur la spécificité de l’habileté et sur l’efficacité des stratégies à adopter pour un traitement optimal deviendront proportionnellement importantes au développement d’interventions ciblant l’habileté en reconnaissance faciale (Wilmer, 2017; Bate et Bennetts, 2014 pour des revues). Au niveau inductif, des études subséquentes pourront tester et comparer l’efficacité de différentes techniques inductives ayant pour but de manipuler l’utilisation d’information visuelle, tel que de faire appel à l’attention spatiale des participants en leur demandant explicitement d’utiliser de l’information faciale spécifique (Adolphs et coll., 2005; Gosselin, Spezio & Adolphs, 2013). Finalement, afin de développer ces techniques, les chercheurs pourraient avoir avantage à emprunter les contributions scientifiques de champs complémentaires tels que le conditionnement classique/instrumental (Thorndike, 1989; Pavlov, 1927; Skinner, 1935; Gormezano & Tait, 1976; Gariépy et coll., 2014) l’apprentissage perceptif (Gibson, 1969; Herzog & Fahle, 1997; Weil et coll., 2010; Guggenmos, Wilbertz, Hebart & Sterzer, 2016) ainsi que la tangente plus récente du *bio-feedback* (Contestabile et coll., 2002; Ordikhani-Seyedlar, Sorensen & Puthusserypady, 2016 pour une revue de l’utilisation du neuro-feedback pour l’attention visuelle). En plus du bénéfice que ces avancées auraient sur les individus avec des déficits de traitement facial (prosopagnosiques développementaux et acquis), ceci pourrait aussi mener à des moyens d’augmenter l’habileté d’individus avec des emplois requérant un traitement facial efficace tel que les policiers, agents de sécurité et agents de la douane.



## Bibliographie

- Adolphs, R., Gosselin, F., Buchanan, T. W., Tranel, D., Schyns, P., & Damasio, A. R. (2005). A mechanism for impaired fear recognition after amygdala damage. *Nature*, *433*(7021), 68-72.
- Andari, E., Duhamel, J. R., Zalla, T., Herbrecht, E., Leboyer, M., & Sirigu, A. (2010). Promoting social behavior with oxytocin in high-functioning autism spectrum disorders. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(9), 4389-4394.
- Bate, S., & Bennetts, R. J. (2014). The rehabilitation of face recognition impairments: a critical review and future directions. *Frontiers in human neuroscience*, *8*.
- S., Cook, S. J., Duchaine, B., Tree, J. J., Burns, E. J., & Hodgson, T. L. (2014). Intranasal inhalation of oxytocin improves face processing in developmental prosopagnosia. *Cortex*, *50*, 55-63.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., & McCarthy, G. (1996). Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of cognitive neuroscience*, *8*(6), 551-565.
- Blais, C., Roy, C., Fiset, D., Arguin, M., & Gosselin, F. (2012). The eyes are not the window to basic emotions. *Neuropsychologia*, *50*(12), 2830-2838.
- Bourne, V. J. (2006). The divided visual field paradigm: Methodological considerations. *Laterality*, *11*(4), 373-393.
- Brown, E., & Perrett, D. I. (1993). What gives a face its gender?. *Perception*, *22*(7), 829-840.
- Bruce, V., & Young, A. (1986). Understanding face recognition. *British journal of psychology*, *77*(3), 305-327.
- Butler, S., Gilchrist, I. D., Burt, D. M., Perrett, D. I., Jones, E., & Harvey, M. (2005). Are the perceptual biases found in chimeric face processing reflected in eye-movement patterns?. *Neuropsychologia*, *43*(1), 52-59.
- Butler, S., Blais, C., Gosselin, F., Bub, D., & Fiset, D. (2010). Recognizing famous people. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*(6), 1444-1449.

- Caldara, R., Schyns, P., Mayer, E., Smith, M. L., Gosselin, F., & Rossion, B. (2005). Does prosopagnosia 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.
- Carey, S., Diamond, R., & Woods, B. (1980). Development of face recognition: A maturational component?. *Developmental Psychology*, *16*(4), 257.
- Contestabile, M. T., Recupero, S. M., Palladino, D., De Stefanis, Abdolrahimzadeh, S., Suppressa, F., & Gabrieli, C. B. (2002). A new method of biofeedback in the management of low vision. *Eye*, *16*(4), 472.
- Charest, I., Kievit, R. A., Schmitz, T. W., Deca, D., & Kriegeskorte, N. (2014). Unique semantic space in the brain of each beholder predicts perceived similarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(40), 14565-14570.
- DeGutis, J. M., Bentin, S., Robertson, L. C., & D'Esposito, M. (2007). Functional plasticity in ventral temporal cortex following cognitive rehabilitation of a congenital prosopagnosic. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(11), 1790-1802.
- DeGutis, J., Wilmer, J., Mercado, R. J., & Cohan, S. (2013). Using regression to measure holistic face processing reveals a strong link with face recognition ability. *Cognition*, *126*(1), 87-100.
- DeGutis, J. M., Chiu, C., Grosso, M. E., & Cohan, S. (2014). Face processing improvements in prosopagnosia: successes and failures over the last 50 years. *Frontiers in human neuroscience*, *8*.
- Diamond, R., Carey, S., & Back, K. J. (1983). Genetic influences on the development of spatial skills during early adolescence. *Cognition*, *13*(2), 167-185.
- Dobel, C., Geiger, L., Bruchmann, M., Putsche, C., Schweinberger, S. R., & Junghöfer, M. (2008). On the interplay between familiarity and emotional expression in face perception. *Psychological Research*, *72*(5), 580-586.
- Domes, G., Kumbier, E., Heinrichs, M., & Herpertz, S. C. (2014). Oxytocin promotes facial emotion recognition and amygdala reactivity in adults with asperger syndrome. *Neuropsychopharmacology*, *39*(3), 698.

- Dreyer, A. M., & Herrmann, C. S. (2015). Frequency-modulated steady-state visual evoked potentials: A new stimulation method for brain-computer Interfaces. *Journal of neuroscience methods*, 241, 1-9.
- Duchaine, B., & 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(4), 576-585.
- Duchaine, B. C., Yovel, G., Butterworth, E. J., & Nakayama, K. (2006). Prosopagnosia as an impairment to face-specific mechanisms: Elimination of the alternative hypotheses in a developmental case. *Cognitive neuropsychology*, 23(5), 714-747.
- Duchaine, B., & Yovel, G. (2015). A revised neural framework for face processing. *Annual Review of Vision Science*, 1, 393-416.
- Dupuis-Roy, N., Fortin, I., Fiset, D., & Gosselin, F. (2009). Uncovering gender discrimination cues in a realistic setting. *Journal of Vision*, 9(2), 10-10.
- Dupuis-Roy, N., Faghel-Soubeyrand, S. & Gosselin, F. (soumis). Time course of the use of chromatic and achromatic facial information for gender discrimination
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1971). Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of personality and social psychology*, 17(2), 124.
- Esins, J. (2015). *Face processing in congenital prosopagnosia* (Vol. 43). Logos Verlag Berlin GmbH.
- Faghel-Soubeyrand, S., & Gosselin, F. (2016). Skilled face recognizers have higher contrast sensitivity in the right hemifield. *PERCEPTION* (Vol. 45, pp. 30-31).
- Faghel-Soubeyrand, S. & Gosselin, F. (2017). Task-modulated integration of facial features in the brain. *Journal of Vision*. 2016; 16(12):72-72. doi: 10.1167/16.12.72
- Furl, N., Garrido, L., Dolan, R. J., Driver, J., & Duchaine, B. (2011). Fusiform gyrus face selectivity relates to individual differences in facial recognition ability. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(7), 1723-1740.
- Gariépy, J. F., Watson, K. K., Du, E., Xie, D. L., Erb, J., Amasino, D., & Platt, M. L. (2014). Social learning in humans and other animals. *Frontiers in neuroscience*, 8.

- Germine, L. T., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2011). Where cognitive development and aging meet: Face learning ability peaks after age 30. *Cognition*, *118*(2), 201-210.
- Gibson, E. J. (1997). An ecological psychologist's prolegomena for perceptual development: A functional approach.
- Gilbert, C., & Bakan, P. (1973). Visual asymmetry in perception of faces. *Neuropsychologia*, *11*(3), 355-362.
- Gormezano, I., & Tait, R. W. (1976). The Pavlovian analysis of instrumental conditioning. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, *11*(1), 37-55.
- Gold, J., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (1999). Identification of band-pass filtered letters and faces by human and ideal observers. *Vision research*, *39*(21), 3537-3560.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision research*, *41*(17), 2261-2271.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2002). RAP: A new framework for visual categorization. *Trends in cognitive sciences*, *6*(2), 70-77.
- Gosselin, F., Spezio, M., & Adolphs, R. (2013). Fear recognition in four patients with focal bilateral amygdala damage. *Journal of Vision*, *13*(9), 584-584.
- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2001). The lateral occipital complex and its role in object recognition. *Vision research*, *41*(10), 1409-1422.
- Grill-Spector, K., Knouf, N., & Kanwisher, N. (2004). The fusiform face area subserves face perception, not generic within-category identification. *Nature neuroscience*, *7*(5), 555.
- Herzog, M. H., & Fahle, M. (1997). The role of feedback in learning a vernier discrimination task. *Vision research*, *37*(15), 2133-2141.
- Huang, L., Song, Y., Li, J., Zhen, Z., Yang, Z., & Liu, J. (2014). Individual differences in cortical face selectivity predict behavioral performance in face recognition. *Frontiers in human neuroscience*, *8*.
- Ince, R. A., Jaworska, K., Gross, J., Panzeri, S., Van Rijsbergen, N. J., Rousselet, G. A., & Schyns, P. G. (2016). The Deceptively Simple N170 Reflects Network Information Processing Mechanisms Involving Visual Feature Coding and Transfer Across Hemispheres. *Cerebral Cortex*, *26*(11), 4123-4135.

- Innes, B. R., Burt, D. M., Birch, Y. K., & Hausmann, M. (2016). A leftward bias however you look at it: Revisiting the emotional chimeric face task as a tool for measuring emotion lateralization. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 21(4-6), 643-661.
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in cognitive sciences*, 4(6), 223-233.
- Haxby, J. V., Guntupalli, J. S., Connolly, A. C., Halchenko, Y. O., Conroy, B. R., Gobbini, M. I., ... & Ramadge, P. J. (2011). A common, high-dimensional model of the representational space in human ventral temporal cortex. *Neuron*, 72(2), 404-416.
- Ince, R. A., Jaworska, K., Gross, J., Panzeri, S., Van Rijsbergen, N. J., Rousselet, G. A., & Schyns, P. G. (2016). The Deceptively Simple N170 Reflects Network Information Processing Mechanisms Involving Visual Feature Coding and Transfer Across Hemispheres. *Cerebral Cortex*, 26(11), 4123-4135.
- Jack, R. E., & Schyns, P. G. (2017). Toward a social psychophysics of face communication. *Annual review of psychology*, 68, 269-297.
- James, W. (1975). *Pragmatism* (Vol. 1). Harvard University Press.
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern recognition letters*, 31(8), 651-666.
- Joyce, C. A., Schyns, P. G., Gosselin, F., Cottrell, G. W., & Rossion, B. (2006). Early selection of diagnostic facial information in the human visual cortex. *Vision Research*, 46(6), 800-813.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of neuroscience*, 17(11), 4302-4311.
- Kosslyn, S. M., Brunn, J., Cave, K. R., & Wallach, R. W. (1984). Individual differences in mental imagery ability: A computational analysis. *Cognition*, 18(1), 195-243.
- Kriegeskorte, N., Mur, M., & Bandettini, P. (2008). Representational similarity analysis—connecting the branches of systems neuroscience. *Frontiers in systems neuroscience*, 2.



- Kriegeskorte, N., & Kievit, R. A. (2013). Representational geometry: integrating cognition, computation, and the brain. *Trends in cognitive sciences*, 17(8), 401-412.
- Le Grand, R., Cooper, P. A., Mondloch, C. J., Lewis, T. L., Sagiv, N., de Gelder, B., & Maurer, D. (2006). What aspects of face processing are impaired in developmental prosopagnosia?. *Brain and cognition*, 61(2), 139-158.
- Lovén, J., Svård, J., Ebner, N. C., Herlitz, A., & Fischer, H. (2013). Face gender modulates women's brain activity during face encoding. *Social cognitive and affective neuroscience*, 9(7), 1000-1005.
- Mason, M. F., & Macrae, C. N. (2004). Categorizing and individuating others: The neural substrates of person perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(10), 1785-1795.
- Maurer, D., Le Grand, R., & Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 255-260.
- McConachie, H. R. (1976). Developmental prosopagnosia. A single case report. *Cortex*, 12(1), 76-82.
- Meadows, J. C. (1974). The anatomical basis of prosopagnosia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 37(5), 489-501.
- Mouchetant-Rostaing, Y., Giard, M. H., Bentin, S., Aguera, P. E., & Pernier, J. (2000). Neurophysiological correlates of face gender processing in humans. *European Journal of Neuroscience*, 12(1), 303-310.
- Murray, R. F., & Gold, J. M. (2004). Troubles with bubbles. *Vision Research*, 44(5), 461-470.
- Murray, R. F., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2005). Classification images predict absolute efficiency. *Journal of Vision*, 5(2), 5-5.
- Nachson, I. (1995). On the modularity of face recognition: The riddle of domain specificity. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 17(2), 256-275.
- Nestor, A., & Tarr, M. J. (2008). Gender recognition of human faces using color. *Psychological Science*, 19(12), 1242-1246.
- Newman, L. (2004). Locke on sensitive knowledge and the veil of perception—four misconceptions. *Pacific Philosophical Quarterly*, 85(3), 273-300.

- Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottareau, B. R., & Rossion, B. (2015). The steady-state visual evoked potential in vision research: a review. *Journal of vision, 15*(6), 4-4.
- Ordikhani-Seyedlar, M., Lebedev, M. A., Sorensen, H. B., & Puthusserypady, S. (2016). Neurofeedback therapy for enhancing visual attention: state-of-the-art and challenges. *Frontiers in neuroscience, 10*.
- Parvizi, J., Jacques, C., Foster, B. L., Withoft, N., Rangarajan, V., Weiner, K. S., & Grill-Spector, K. (2012). Electrical stimulation of human fusiform face-selective regions distorts face perception. *Journal of Neuroscience, 32*(43), 14915-14920.
- Pearl, J. (2003). Causality: models, reasoning and inference. *Econometric Theory, 19*(675-685), 46.
- Pitcher, D., Duchaine, B., Walsh, V., Yovel, G., & Kanwisher, N. (2011). The role of lateral occipital face and object areas in the face inversion effect. *Neuropsychologia, 49*(12), 3448-3453.
- Pancaroglu, R., Hills, C. S., Sekunova, A., Viswanathan, J., Duchaine, B., & Barton, J. J. (2016). Seeing the eyes in acquired prosopagnosia. *cortex, 81*, 251-265.
- Parsons, L., Haque, E., & Liu, H. (2004). Subspace clustering for high dimensional data: a review. *Acm Sigkdd Explorations Newsletter, 6*(1), 90-105.
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes.* (Oxford University Press: London).
- Rastatter, M. P., & Loren, C. (1988). Vocal reaction times to tachistoscopically presented high-and low-frequency verbs: Some evidence for selective minor hemisphere linguistic analysis. *Perceptual and motor skills, 66*(3), 803-810.
- Rescorla, R. A., & Solomon, R. L. (1967). Two-process learning theory: Relationships between Pavlovian conditioning and instrumental learning. *Psychological review, 74*(3), 151.
- Reed, S., Akata, Z., Lee, H., & Schiele, B. (2016). Learning deep representations of fine-grained visual descriptions. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 49-58).
- Richler, J. J., Cheung, O. S., & Gauthier, I. (2011). Holistic processing predicts face recognition. *Psychological science, 22*(4), 464-471.

- Richler, J. J., Floyd, R. J., & Gauthier, I. (2015). About-face on face recognition ability and holistic processing. *Journal of vision, 15*(9), 15-15.
- Rhodes, G., Jeffery, L., Taylor, L., Hayward, W. G., & Ewing, L. (2014). Individual differences in adaptive coding of face identity are linked to individual differences in face recognition ability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 40*(3), 897.
- Rossion, B., Schiltz, C., & Crommelinck, M. (2003). The functionally defined right occipital and fusiform “face areas” discriminate novel from visually familiar faces. *Neuroimage, 19*(3), 877-883.
- Rossion, B., & Jacques, C. (2011). The N170: understanding the time-course of face perception in the human brain. *The Oxford handbook of ERP components, 115-142*.
- Rousselet, G. A., Ince, R. A., van Rijsbergen, N. J., & Schyns, P. G. (2014). Eye coding mechanisms in early human face event-related potentials. *Journal of vision, 14*(13), 7-7.
- Royer, J., Blais, C., Gosselin, F., Duncan, J., & Fiset, D. (2015). When less is more: Impact of face processing ability on recognition of visually degraded faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(5), 1179.
- Russell, R. (2003). Sex, beauty, and the relative luminance of facial features. *Perception, 32*(9), 1093-1107.
- Russell, R., Duchaine, B., & Nakayama, K. (2009). Super-recognizers: People with extraordinary face recognition ability. *Psychonomic bulletin & review, 16*(2), 252-257.
- Schiltz, C., Dricot, L., Goebel, R., & Rossion, B. (2010). Holistic perception of individual faces in the right middle fusiform gyrus as evidenced by the composite face illusion. *Journal of Vision, 10*(2), 25-25.
- Schyns, P. G., & Oliva, A. (1997). Flexible, diagnosticity-driven, rather than fixed, perceptually determined scale selection in scene and face recognition. *Perception, 26*(8), 1027-1038.
- Schyns, P. G., Bonnar, L., & 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., Schweinberger, S. R., & Gosselin, F. (2003). A principled method for determining the functionality of brain responses. *Neuroreport*, *14*(13), 1665-1669.
- Skinner, B. F. (1935). Two types of conditioned reflex and a pseudo type. *The Journal of General Psychology*, *12*(1), 66-77.
- Smith, M. L., Cottrell, G. W., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions. *Psychological science*, *16*(3), 184-189.
- Smith, M. L., Fries, P., Goebel, R., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2009). Feature-driven decomposition of brain measurements—a novel approach to interpreting MEG brain activity during categorization tasks. *Cerebral Cortex*, *19*, 2428-2438.
- Smith, M.L., Gosselin, F., & Schyns, P.G. (2012). Measuring internal representations for behavioral and brain data. *Current Biology*, *22*, 191-196, doi:10.1016/j.cub.2011.11.061.
- Thorndike, E. L. (1898). Review of Animal Intelligence: An Experimental Study of the Associative Processes in Animals.
- Tsao, D. Y., & Livingstone, M. S. (2008). Mechanisms of face perception. *Annu. Rev. Neurosci.*, *31*, 411-437.
- Wang, R., Li, J., Fang, H., Tian, M., & Liu, J. (2012). Individual differences in holistic processing predict face recognition ability. *Psychological science*, *23*(2), 169-177.
- Weil, R. S., Furl, N., Ruff, C. C., Symmonds, M., Flandin, G., Dolan, R. J., ...& Rees, G. (2010). Rewarding feedback after correct visual discriminations has both general and specific influences on visual cortex. *Journal of neurophysiology*, *104*(3), 1746-1757.
- Willenbockel, V., Lepore, F., Bacon, B. A., & Gosselin, F. (2013). The informational correlates of conscious and nonconscious face-gender perception. *Journal of vision*, *13*(2), 10-10.
- Wilmer, J. B. (2008). How to use individual differences to isolate functional organization, biology, and utility of visual functions; with illustrative proposals for stereopsis. *Spatial vision*, *21*(6), 561-579.
- Wilmer, J. B., Germine, L., Chabris, C. F., Chatterjee, G., Williams, M., Loken, E., ... & Duchaine, B. (2010). Human face recognition ability is specific and highly heritable. *Proceedings of the National Academy of sciences*, *107*(11), 5238-5241.

- Wilmer, J. B. (2017). Individual Differences in Face Recognition: A Decade of Discovery. *Current Directions in Psychological Science*, 26(3), 225-230.
- Yang, H., Susilo, T., & Duchaine, B. (2014). The anterior temporal face area contains invariant representations of face identity that can persist despite the loss of right FFA and OFA. *Cerebral Cortex*, 26(3), 1096-1107.
- Yovel, G., & Duchaine, B. (2006). Specialized face perception mechanisms extract both part and spacing information: Evidence from developmental prosopagnosia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(4), 580-593.
- Yovel, G., Wilmer, J. B., & Duchaine, B. (2014). What can individual differences reveal about face processing? *Frontiers in human neuroscience*, 8.