



HAL
open science

De la perception sociale à l'intégration multimodale de signaux socioémotionnels : une approche life-span.

Laurence Chaby

► To cite this version:

Laurence Chaby. De la perception sociale à l'intégration multimodale de signaux socioémotionnels : une approche life-span.. Psychologie. Université Paris Descartes, 2020. tel-03981425v1

HAL Id: tel-03981425

<https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-03981425v1>

Submitted on 9 Feb 2023 (v1), last revised 25 Apr 2023 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Paris

Institut de Psychologie – Université Paris Descartes

Habilitation à Diriger des Recherches

Par

Laurence Chaby

De la perception sociale à l'intégration multimodale de signaux socioémotionnels : une approche life-span

Laboratoire : Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR), UMR CNRS 7222

Volume 1 – Note de Synthèse

Soutenance le 03 Juillet 2020, devant le jury composé de :

Pr. Sylvain Moutier	Université de Paris	(Président du jury)
Pr. Hanna Chainay	Université Lumière, Lyon 2	(Rapporteuse)
Pr. Pascal Hot	Université de Savoie Mont Blanc	(Rapporteur)
Pr. Chrystel Besche-Richard	Université de Reims Champagne-Ardenne	(Examinatrice)
Pr. Alessandro Vinciarelli	Université de Glasgow, UK	(Examinateur)
Pr. Mohamed Chetouani	Sorbonne Université	(Invité)
Pr. Nicole Fiori-Duharcourt	Université de Paris	(Garante)

Résumé

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur la perception sociale et l'intégration multimodale de signaux socio-émotionnels, selon une approche lifespan. D'un point de vue théorique, certains de mes travaux ont été menés dans une perspective modulaire et unimodale centrée sur la perception sociale des visages ; d'autres ont été conduits dans une perspective intégrative –liant vision et audition–, en tenant compte des composantes réceptives et expressives des signaux sociaux. Les populations impliquées dans ces recherches étaient des adultes en bonne santé de différents âges, et des patients porteurs de diverses pathologies neurodéveloppementales, neurologiques et neurodégénératives entraînant des difficultés socioémotionnelles.

L'ensemble de ces travaux a permis de faire des progrès sur nos connaissances sur (i) la dynamique cérébrale et les composantes perceptives intervenant dans la perception sociale; (ii) l'existence de processus intégratifs émotionnels – liant vision et audition – qui optimisent le traitement des émotions, notamment chez les personnes âgées ; (iii) la cartographie des situations de perception et de production émotionnelle affectées ou épargnées par les pathologies étudiées, en lien avec les interactions sociales et la qualité de vie des patients et de leurs proches.

La perspective de recherche proposée vise à analyser la place des émotions dans la dynamique des interactions sociales. Dans ce but, il sera proposé (i) un cadre expérimental où le participant se trouvera dans des situations demandant un certain niveau d'engagement social lors d'interactions structurées ou dynamiques ; (ii) un cadre conceptuel de recherche permettant d'analyser, de modéliser voire de prédire les signaux sociaux multimodaux perçus, produits ou échangés par l'humain, qui ne sont pas toujours objectivables avec les seules méthodes de la psychologie.

Mots clés : visages ; émotions ; traitement multimodal ; signaux sociaux ; lifespan

Table des matières

Remerciements	5
Résumé—Abstract	7
Table des matières	9
Première Partie. Notice individuelle	11
Curriculum Vitae	13
Publications	18
Deuxième partie. Synthèse de mes travaux	25
Introduction	27
1. Vue d'ensemble de mon parcours	27
2. Cadre théorique de mes recherches	30
3. Objectifs de mes recherches	33
4. Organisation du document	34
Du signal social à l'intégration multimodale	35
1. Le visage : sommes-nous tous des experts ?	35
1.1. Positionnement de mon travail.....	36
1.2. Comment les visages sont-ils reconnus ?.....	37
1.3. Bases neurales de la perception des visages.....	38
1.4. Peut-on percevoir un visage sans traits faciaux ?.....	40
1.5. De l'importance de la familiarité.....	41
1.6. Perception des visages à l'épreuve de l'âge.....	44
2. De l'importance des expressions faciales	51
2.1. Positionnement de mon travail.....	51
2.2. Tentative d'éclaircissement d'un phénomène multicomponentiel.....	52
2.3. Quels indices émotionnels sont exprimés par un visage ?.....	55
2.4. Comment les émotions sont-elles représentées dans le cerveau ?.....	56
2.5. Quels mécanismes perceptifs en jeu ?.....	58
2.5.1. Contribution respective des traits faciaux ?.....	59
2.5.2. Contribution du traitement configural ?.....	60
2.5.3. Comment regarde-t-on un visage expressif ?.....	63
2.6. Point sur le développement <i>life-span</i>	65
2.6.1. Une émergence précoce dans l'enfance.....	65
2.6.2. Un affinage à l'adolescence.....	66
2.6.3. Pertes et gains au cours du vieillissement.....	67

3. Pour une approche multimodale des processus émotionnels.....	77
3.1. Contexte de mon travail.....	77
3.2. L'intégration multimodale : définition, bases neurales, avantages.....	77
3.3. Implications dans le développement de l'enfant.....	78
3.4. Traitement multimodal chez les enfants avec TSA.....	79
3.4.1. Perception des expressions émotionnelles chez les enfants TSA.....	80
3.4.2. Production des expressions émotionnelles chez les enfants TSA.....	84
3.5. Intégration multimodale émotionnelle à l'âge adulte.....	87
3.6. Intégration multimodale chez des adultes avec gliomes de bas grade.....	88
3.7. Vieillesse émotionnel, une question de modalité ?.....	91
3.8. Aspects perceptifs et expressifs des expressions émotionnelles chez des patients atteints de la maladie Alzheimer.....	93

Troisième partie. Perspectives de recherche 97

1. Vers une meilleure compréhension des liens entre <i>perception</i> des émotions et tendances à l'<i>action</i>.....	101
2. <i>Perception et production</i> des expressions émotionnelles au cours du vieillissement.	103
3. Interaction humain-machine : un petit pas vers un changement de paradigme.....	106
Références.....	108

Deuxième partie

Synthèse de mes travaux

Cette deuxième partie du dossier –après une **vue d’ensemble de mon parcours et la présentation du cadre théorique de mes recherches**– expose la **synthèse de mes différentes contributions de recherches**, depuis la fin de ma thèse jusqu’à aujourd’hui. Elle s’articule autour de trois grands axes : (i) bases neurales et cognitives de la perception des visages, (ii) stratégies perceptives du traitement des expressions faciales au cours de la vie, et (iii) processus et intégration multimodale de signaux socio-émotionnels.

Introduction

1. Vue d'ensemble de mon parcours

Ce Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches propose une synthèse des travaux de que j'ai menés après ma thèse de doctorat (soutenue en octobre 2001), d'abord en tant qu'ATER puis, depuis septembre 2002, en tant que Maître de Conférences à l'Université Paris Descartes (dorénavant Université de Paris). Ils ont été réalisés entre 2001 et 2006 au Laboratoire de Neurosciences Cognitives et Imagerie Cérébrale (LENA, CNRS), entre 2006 et 2011 au Laboratoire de Psychologie et Neuropsychologie Cognitives (LPNcog, Université Paris Descartes), puis depuis 2011, au sein de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR UMR 7222 CNRS, SU) où je mène mes recherches dans le cadre d'une convention Université Paris Descartes – Sorbonne Université.

Dès mes premiers contacts avec la Psychologie, j'ai été fascinée par l'approche pluridisciplinaire du fonctionnement cognitif. En licence j'ai eu la chance de faire un stage de plusieurs mois au Laboratoire de psychologie différentielle dirigé par Jacques Lautrey, et de découvrir ainsi l'approche différentielle et « pluraliste du fonctionnement cognitif » (Lautrey, 2003), qui a l'avantage d'intégrer dans un même cadre théorique l'étude du développement et de la différenciation. J'ai été marquée par cette idée que face à une situation donnée, l'individu peut choisir entre plusieurs stratégies, en fonction de ses préférences individuelles, de son âge ou de sa personnalité. Cette idée que la plupart des fonctions cognitives sont sous-tendues par une pluralité de processus dits 'vicariants' sera évoquée plus tard dans ce mémoire de synthèse.

Après une Maîtrise de Psychologie Cognitive à l'Université Paris Descartes, associée à un certificat de Neurobiologie des Comportements et Neurosciences des systèmes intégrés dans le cadre de la Maîtrise de Neurosciences de l'UPMC, j'ai eu la chance d'être accueillie au Laboratoire de Neurosciences Cognitives et Imagerie Cérébrale (LENA), dirigé par Bernard Renault sur le site de l'Hôpital de la Pitié Salpêtrière². J'ai réalisé mon DEA de Psychologie Cognitive, puis ma thèse en Psychologie dans l'équipe '*Visages et Cognition*' sous la direction de Nicole Fiori-Duharcourt. **En parallèle, j'ai complété ma formation en Neuropsychologie afin d'obtenir le titre de Psychologue.**

Mon travail de thèse a porté sur les bases neurales et cognitives de la reconnaissance des visages au cours du vieillissement. Dans ce contexte, j'ai travaillé sur les visages célèbres ou familiers (proches, soi-même) avec des méthodes de la psychologie expérimentale et des neurosciences cognitives (p. ex., l'électrophysiologie et les potentiels évoqués). A l'époque, peu d'équipes internationales s'intéressaient aux

² Pendant ces années 'LENA', j'ai été plongée dans la recherche pluridisciplinaire, de laquelle il me semble maintenant difficile de m'échapper. Dans ce cadre scientifique dans lequel j'ai eu la chance d'évoluer, j'ai pu me former et m'enrichir lors d'échanges passionnants dans mon équipe avec Bernard Renault, Nicole Fiori, Nathalie George et Boutheina Jemel, mais aussi dans d'autres équipes et notamment auprès de Francisco Varela (Neurobiologiste et Philosophe), Pierre-Marie Baudonnière (Psychologue), Viviane Pouthas (Psychologue), Line Garnerio (Physicienne), Sylvain Baillet (Physicien) ou encore Jacques Martinerie (Ingénieur et Informaticien).

modifications de la capacité de traitement des visages avec l'âge, et les rares recherches à ce sujet concernaient presque exclusivement la mémoire des visages (Bartlett & Leslie, 1986; Maylor, 1990). En outre, l'étude de cette évolution avec l'âge était peu étayée par des arguments provenant de l'électrophysiologie ou de l'imagerie fonctionnelle (Chaby, 2004), ou elle ne concernait que le développement de l'enfant. Pourtant, à l'époque, des travaux suggéraient qu'après une évolution synaptique se poursuivant jusqu'à 15-20 ans, le système nerveux ne maintient son plus haut niveau de performance que pendant une période relativement courte, entre 25 et 40 ans, son efficacité diminuant ensuite progressivement (Robert, 1983). **Mes recherches se sont donc initialement articulées autour de deux grandes questions, en accordant une attention toute particulière à la notion de plasticité et de malléabilité :** (i) Observe-t-on un ralentissement cognitif à partir de 50 ans ? (ii) Le vieillissement est-il synonyme de déclin cognitif et/ou de réorganisations cérébrales ? Mes travaux de thèse ont ainsi montré que la capacité à traiter les visages se modifie dès l'âge de 50 ans, et que ces changements sont associés à des modifications dans la dynamique temporelle de l'activité cérébrale qui épargnent les étapes précoces, et s'accompagnent de réorganisations cérébrales (Chaby, Jemel, George, Renault, & Fiori, 2001; Chaby, Jemel, Renault, & Fiori, 2000).

Après ma thèse, j'ai été recrutée comme Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER), ce qui m'a permis de continuer à étudier les bases électrophysiologique du traitement des visages chez l'adulte sain avec Nathalie George. En 2002, après avoir été qualifiée aux fonctions de maître de conférences en 16^{ème} et 69^{ème} section du CNU, j'ai été recrutée comme Maître de Conférences en Neurosciences à l'Institut de Psychologie (Université Paris Descartes). **J'ai alors développé un axe 'vieillesse' – qui constitue depuis lors un axe majeur de mes recherches** – et je me suis attachée à questionner l'hypothèse selon laquelle le vieillissement ne serait caractérisé que par des pertes, avec l'objectif de voir s'il existe des stratégies ou des réorganisations cérébrales spécifiques chez la personne âgée en bonne santé, et si l'on peut objectiver des processus compensatoires chez des personnes âgées dont les processus cognitifs demeurent efficaces.

J'ai alors orienté mes recherches dans une perspective de développement continu (i.e., dimension *life-span* ; Baltes, Reese, & Lipsitt, 1980; Craik & Bialystok, 2006; Lecerf, de Ribaupierre, Fagot, & Dirk, 2007) avec la volonté d'aborder le fonctionnement cognitif d'un point de vue dynamique en prenant en compte la trajectoire développementale, les différences inter- et intra-individuelles, les stratégies de traitement en mettant en évidence les gains et les pertes qui peuvent survenir tout au long de la vie.

En 2006, j'ai rejoint l'équipe Développement, Dysfonctionnement et Plasticité du Laboratoire de Psychologie et Neuropsychologie Cognitives (LPNcog) dirigé par Henri Cohen, à l'Institut de Psychologie de l'Université Paris Descartes³. **J'ai alors pu initier des collaborations dans un contexte clinique**, notamment avec David Cohen (Pédopsychiatre) et Monique Plaza (Neuropsychologue) **qui m'ont permis de structurer**

³ Des contraintes personnelles ne me permettant pas d'exercer mes fonctions à plein temps, j'exerce une activité à temps partiel (80%) depuis le 01 septembre 2008.

mon domaine de recherche autour de la perception sociale chez des individus sains et des patients qui présentent des troubles du comportement ayant des répercussions dans la vie quotidienne associés à des difficultés du traitement de stimuli sociaux. Dans ce contexte, j'ai encadré plusieurs étudiantes de Master 1 et 2 (Pascale Gilles, Jennifer Corjon, Pauline Narme) en Neuropsychologie qui ont co-signé des publications avec moi. J'ai favorisé le recrutement de Pauline Narme qui a été recrutée comme Maître de Conférences à l'Université Paris Descartes en 2012.

En 2011, en raison de la dissolution du LPNCog en tant qu'UMR, j'ai rejoint l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotique (ISIR-CNRS, dirigé à l'époque par Philippe Bidaud) à l'Université Pierre et Marie Curie, où avec Mohamed Chetouani (science de l'ingénieur), David Cohen et Monique Plaza nous avons créé le groupe 'Intégration Multimodale, Interaction et Signal Social' (IMI2S). Dans ce cadre, ces dernières années, **mes travaux de recherches ont porté sur l'étude des processus émotionnels multimodaux.** Les émotions étant par nature multimodales, nous avons analysé quel était le bénéfice du traitement multimodal d'informations issues de différents canaux sensoriels. Cette question a également été explorée **dans des pathologies qui affectent la dynamique des interactions sociales** : troubles neurodéveloppementaux, troubles neurologiques, maladies neurodégénératives. **J'ai pu mener ces travaux expérimentaux grâce à mon association avec plusieurs services cliniques :**

- Le Service de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent dirigé par le Pr. David Cohen à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière où j'ai collaboré avec David Cohen et Jean Xavier (pédopsychiatres), Monique Plaza (psychologue) ainsi que Charline Grossard (Orthophoniste). Dans ce contexte j'ai encadré plusieurs étudiants sur des travaux chez des enfants atteints de troubles du spectre de l'autisme, avec qui j'ai co-publié : Fabienne Cautru (2011), Léonard Vannetzel (2011), Violaine Vignaud (2013-2014), Rosa Ruggerio (2014) ; j'ai également co-encadré avec David Cohen la dernière partie de la thèse de Marianna Giannitelli (2013-2016) qui a exploré le rôle de l'intégration multi-sensorielle dans la reconnaissance émotionnelle chez des jeunes patients atteints d'une Schizophrénie à Début Précoce.

- Le Service de Neurochirurgie dirigé par le Pr. Alexandre Carpentier où j'ai collaboré avec le Dr. Laurent Capelle (Neurochirurgien) et Monique Plaza (Psychologue). Dans ce contexte j'ai co-encadré avec Monique Plaza le Master 2 (2011) puis la thèse de Viviane du Boullay (2012-2015) qui a notamment analysé les conséquences de tumeurs d'évolution lente (gliomes) sur l'intégration multimodale des émotions, ayant d'emblée compris à quel point des dysfonctionnements ténus pouvaient altérer les interactions et la qualité de vie des patients.

Une collaboration plus ponctuelle (2013-2015) dans le service gériatrique du Dr. Patrick Bocquet en collaboration avec Zoé Belot (Psychologue) où j'ai encadré le Master de Lorraine Templier (2014) sur la prosodie émotionnelle chez des patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

J'ai également poursuivi mon axe de recherche, qui constitue aujourd'hui le fil rouge de mes travaux, sur la perception et la production des expressions faciales dans le vieillissement, en utilisant notamment des outils tels que l'oculométrie. Ces travaux ont pu

aboutir grâce à l'implication de plusieurs étudiants en Master de Psychologie (2014-2016), de Viviane du Boullay (2012-2015) lors de son doctorat, ainsi que celle d'Isabelle Hupont (2016-2017) recrutée en stage post-doctoral⁴ et dont le travail sous ma responsabilité concernait le développement de méthodes d'analyse des signaux oculaires basées sur des approches computationnelles et des analyses automatiques.

Ce bref aperçu de mon parcours scientifique met en évidence ma conception lifespan, multidimensionnelle et intégrative des interactions sociales humaines. Celles-ci requièrent la perception, l'expression, et l'intégration de signaux sociaux multimodaux (visages, expressions faciales, prosodie, etc.) et leurs troubles ont de multiples incidences sur la qualité de vie de l'entourage ainsi qu'un fort impact sociétal.

2. Cadre théorique de mes recherches

Les interactions sociales qui débutent dès la naissance et se poursuivent tout au long de la vie, requièrent la perception, l'expression et l'intégration de signaux sociaux multimodaux et variés (**Figure 2**) et se caractérisent par une réciprocity des actions (Chaby, Chetouani, Plaza, & Cohen, 2012). Elles font intervenir des signaux verbaux (signaux linguistiques, parole) et non verbaux (visages, regards, gestes, distances interpersonnelles, postures, prosodies) qui peuvent être modulés et chargés en émotion (expressions émotionnelles).

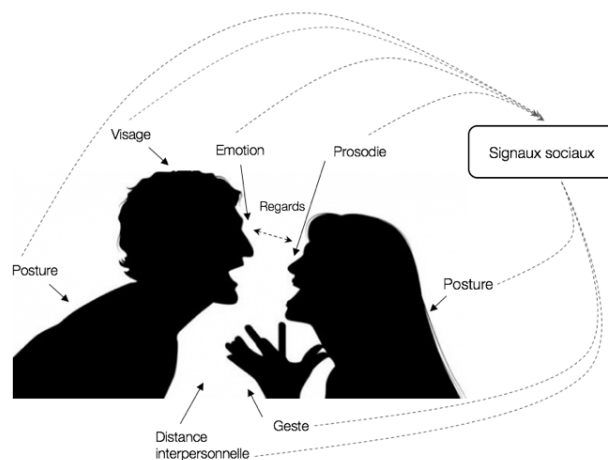


Figure 2. Principaux signaux sociaux non-verbaux (émotionnels ou non) impliqués dans les interactions sociales (adapté de Vinciarelli, Pantic, & Bourlard, 2009).

Les signaux sociaux peuvent être envisagés comme des signaux informatifs ou communicatifs, qui témoignent de l'état intentionnel ou émotionnel de l'émetteur, et dont le traitement, la compréhension, le partage et parfois la prédiction contribuent à la compréhension des intentions et des états mentaux d'autrui. Tout cela constitue le fondement de la cognition sociale humaine, qui permet à chaque personne de tirer profit

⁴ Dans le cadre du projet Européen ASSESSTRONIC ECHORD++ « Robotics for the Comprehensive Geriatric Assessment ».

de son appartenance au groupe (Frith, 2008). Il ne se passe pas un jour sans qu'on n'interagisse avec ses pairs. Il peut s'agir de repérer au milieu d'une foule les personnes qui nous sont familières ou de comprendre que la personne en face de nous est joyeuse, à la vue de son large sourire et de ses yeux rieurs ou en colère en observant son regard noir et sa mâchoire serrée. Ces signaux socio-émotionnels perçus chez l'autre nous permettent de nous ajuster à lui en retour, en régulant nos propres émotions, ce qui marque une forme de plasticité comportementale et oriente notre sociabilité.

La plupart des processus de traitement de ces signaux sociaux, bien qu'extrêmement complexes, sont rapides (quelques centaines de millisecondes) et le plus souvent automatiques et non conscients (Crouzet, 2010; Thorpe, Fize, & Marlot, 1996). Ils jouent un rôle essentiel dès les premières interactions parent-bébé (Feldman, 2003), puis ils se développent de façon graduelle chez l'enfant, lui permettant de construire une base solide pour prendre conscience de soi, de l'autre et interagir avec ses pairs (Hall, Bernieri, & Carney, 2005; Xavier et al., 2017). Chez l'adulte en bonne santé, l'intégration de signaux socio-émotionnels agirait comme un facilitateur de l'affiliation sociale et du bien-être (Izard, 2001; Engelberg & Sjöberg, 2004) et plus tard serait associée à un vieillissement « réussi » (Gross, Richards, & John, 2006; Nimrod & Ben-Shem, 2015). En revanche, le traitement déficient de ces signaux sociaux entraînerait à l'âge adulte une moins bonne interaction avec les pairs (Blair, 2005) et serait associé, dans le grand âge, au retrait social et à la solitude (Steptoe, Shankar, Demakakos, & Wardle, 2013; Szanto et al., 2012). Ces dysfonctionnements ont également une importance clinique particulière, car les difficultés de traitement, de production ou d'intégration des signaux socio-émotionnels constituent des prédicteurs ou des marqueurs d'une altération du fonctionnement social dans les pathologies psychiatriques ou neurologiques (pour revue Chaby & Narme, 2009; Chaby, 2012; Kennedy & Adolphs, 2012)

L'étude des signaux socio-émotionnels constitue un domaine de recherche multidisciplinaire, qui concerne la psychologie (incluant la psychologie cognitive, la neuropsychologie et la psychopathologie), les neurosciences cognitives, ainsi que les domaines du traitement du signal et la robotique. Cependant, les niveaux d'analyses étant différents, il est nécessaire de les caractériser afin de définir dans quel cadre se situent les travaux présentés ici.

La psychologie a beaucoup évolué ces dernières décennies dans sa façon de concevoir les signaux de la communication non-verbale, de prendre en compte la représentation des autres et d'analyser les processus cognitifs impliqués dans le comportement social des individus (De Jaegher, Di Paolo, & Gallagher, 2010; Frith & Frith, 2012). Les centres d'intérêt des études sont divers : les unes sont centrées presque exclusivement sur les informations fournies par le visage –perception d'autrui, rôle de la direction du regard dans les inférences sur autrui, reconnaissance des expressions faciales– ; les autres sont centrées sur la reconnaissance de la personne en tant que telle, à travers son visage, sa voix, sa posture, son apparence générale et des informations sémantiques sur elle, par exemple sa profession. Enfin les dernières études, les plus nombreuses –peut-être en raison de la place prépondérante qu'occupent aujourd'hui les émotions dans l'espace social– concernent la « cognition chaude » ou « cognition sociale »

et portent plus spécifiquement sur l'étude de la capacité à traiter, à inférer des émotions chez autrui ou à produire des émotions en réponse à autrui ou à différentes situations et stimuli. Ces distinctions fournissent un cadre théorique pour étudier les relations de ces processus cognitifs avec l'activité cérébrale, en postulant l'intervention de réseaux différents. Par ailleurs, sur le plan clinique, des difficultés dans les dimensions affectives et sociales ont largement été documentés en neuropsychologie et psychopathologie, notamment dans les troubles neurodéveloppementaux, tels que les troubles du spectre de l'autisme (Baron-Cohen, Leslie, & Frith, 1985), certains troubles psychiatriques, tels que la schizophrénie (Penn, Sanna, & Roberts, 2008), différentes affections neurologiques consécutives à des traumatismes crâniens ou encore des pathologies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer (voir Chaby et Narme, 2009). Compte tenu de l'implication des troubles de la cognition sociale sur la vie sociale, professionnelle et affective des patients, leurs évaluations est un enjeu du diagnostic différentiel et de la remédiation.

En neurosciences, les fondements neurologiques du « cerveau social » ont été explorés chez l'Homme et chez le primate non humain à partir des années 90 (Dunbar, 1998). Un nouveau domaine de recherche, **les 'neurosciences affectives et sociales' a émergé à l'interface des neurosciences cognitives et de la psychologie sociale**. Ralph Adolphs a publié en 1999 un article de synthèse princeps sur la question du cerveau social « *Social cognition and the human brain* » (Adolphs, 1999) et la popularité de ce domaine s'est ensuite rapidement développée. Il s'agissait de proposer une conception du cerveau social, en cherchant à comprendre et à modéliser comment le traitement de signaux sociaux, voire l'interaction sociale elle-même est implémentée dans des circuits neuronaux spécifiques (e.g., Ochsner & Lieberman, 2001; Adolphs, 2003; Cacioppo & Cacioppo, 2013; Frith & Wolpert, 2004). Pour simplifier, il est possible de décomposer, comme l'a fait Michaël Green, les mécanismes impliqués dans les interactions sociales en différents processus (voir Green, Horan, & Lee, 2015) :

- La perception sociale (*social perception*), qui est au cœur de mes travaux, se réfère aux aspects de perception de signaux sociaux à partir notamment des entrées visuelles et auditives (visages, regards, corps, gestes, voix, distances interpersonnelles).
- L'inférence sociale (*social inference*) renvoie à des aspects d'interprétation de nos propres connaissances comme de celles des autres, tels que l'interprétation des états mentaux d'autrui ou 'mentalisation'.
- Le partage d'expérience (*experience sharing*) comprend les processus de 'résonance motrice' (*mimicry*, imitation spontanée) ainsi que le 'partage émotionnel', qui fait référence aux sentiments de partage et de compréhension affective (empathie affective) et témoigne de mécanismes intersubjectifs (Decety, 2010; Decety & Jackson, 2004).
- L'expérience émotionnelle (*emotion experience*) correspond à l'expérience subjective ainsi qu'aux expressions émotionnelles observables (faciales, vocales, gestuelles) et à la régulation des émotions (*emotion regulation*), jouant également des rôles clés dans les interactions sociales, lesquelles sont le plus souvent chargées en émotions.

Plus récemment, les sciences computationnelles se sont également emparées de l'étude des interactions sociales. Le « **traitement des signaux sociaux** » (**Social Signal Processing**) (Vinciarelli et al., 2009) est ainsi devenu un domaine émergent – à l'interface de la psychologie et des sciences de l'ingénieur – qui cherche à analyser, modéliser ou prédire les signaux sociaux produits et échangés par l'humain et qui ne sont pas toujours objectivables avec les méthodes de la psychologie ou des neurosciences. Il s'agit par exemple d'analyser à partir de flux vidéo, l'activation des muscles faciaux dans les visages, ou à partir de flux audio l'activité vocale comme la prosodie. Il s'agit également de développer des outils spécifiques qui pourraient mimer des comportements humains afin de stimuler des comportements sociaux dans un environnement contrôlé, en psychologie expérimentale, dans le domaine de la robotique sociale ou encore dans le monde virtuel (Chetouani, Boucenna, Chaby, Plaza, & Cohen, 2017).

Ainsi, les signaux sociaux et leur rôle dans les interactions sociales constituent aujourd'hui un sujet de premier plan scientifique et sociétal, leurs bases cérébrales sont en train d'être mises en évidence, et ils commencent à être implémentés dans des robots dits « sociaux ». Puisqu'une part importante de mes enseignements en Licence et Master de Psychologie et de mes recherches porte sur ce sujet depuis de nombreuses années, il me semble intéressant dans ce mémoire de faire une rétrospective des travaux sur le sujet à la lumière de mes apports expérimentaux. **Il s'agira ainsi d'établir une sorte « d'archéologie du savoir » (Foucault, 1969), non pas en fouillant dans la multitude des données à la manière d'un archéologue, mais en tentant de rapporter et comprendre comment mes apports expérimentaux d'hier peuvent prendre un nouvel éclairage aujourd'hui grâce à cette masse de travaux plus récents. Ainsi, témoignant de mon évolution, parallèle à l'évolution des connaissances, mes travaux sont passés d'une vision initialement modulaire et unimodale centrée sur la perception des visages, à une prise en compte intégrative et « multiniveaux » des informations socioémotionnelles, en tenant compte de toute la richesse des signaux sociaux (visage, voix, posture), tant sur le plan perceptif qu'expressif, et en intégrant la perspective tant individuelle que sociale.**

3. Objectifs de mes recherches

Les objectifs de mes recherches sont multiples et visent principalement à :

- Comprendre les mécanismes cognitifs de la perception et de la production des signaux sociaux émotionnels ou non, uni- et multimodaux.
- Comprendre la dynamique – entre gains et pertes – des adaptations stratégiques de la perception sociale dans une perspective *life-span*.
- Cartographier les situations de perception et production émotionnelles affectés ou épargnés par des pathologies neuro-développementales, neurologiques ou neurodégénératives
- Proposer des protocoles d'évaluation ou de prise en charge de personnes atteintes de dysfonctionnements neuro-développementaux, neurologiques ou neurodégénératifs affectant leurs comportements et leurs interactions sociales

4. Organisation du document

Ce manuscrit vise à présenter mes différentes contributions de recherches. Il est organisé de façon thématique plus que chronologique.

Je présente d'abord la synthèse de mes différentes contributions de recherche dans la section intitulée « *Du signal social à l'intégration multimodale* ».

- Dans le premier chapitre, intitulé « **Le visage : sommes-nous tous experts ?** » je présente mes travaux sur la dynamique cérébrale et les traitements cognitifs de la perception des visages chez l'adulte sain, jeune et âgé.
- Dans le deuxième chapitre intitulé « **De l'importance des expressions faciales** », j'aborde les modifications perceptives liées au traitement des émotions au cours de la vie, notamment dans le cadre du vieillissement en bonne santé mais aussi de la maladie de Parkinson.
- Dans le troisième chapitre intitulé « **Pour une approche multimodale des signaux sociaux** » sont présentés mes travaux chez l'adulte sain et chez des patients qui présentent des troubles du comportement ou des interactions sociales.

La dernière partie de ce manuscrit est consacré à la présentation des projets de recherches que je souhaite développer et qui viseront à mieux comprendre –dans une perspective lifespan– la place des émotions dans la dynamique des interactions sociales.

Du signal social à l'intégration multimodale

1. Le visage : sommes-nous tous des experts ?

Assis dans l'herbe, vous avez enfin un peu de temps pour vous. Il fait beau. Perdu dans vos pensées, vous contemplez le ciel bleu et les quelques nuages, quand soudain ce nuage là-haut, cette forme naissante, vous fait penser à un visage – oui un visage de profil. Vous souriez, mais le nuage passe et vos pensées aussi. Le temps de rêver est trop court!

L'être humain est équipé pour repérer, reconnaître, identifier et mémoriser un nombre considérable de visages, dès la naissance et tout au long de la vie. Le visage humain a d'abord fasciné les artistes et la représentation du visage dans l'art a beaucoup évolué au fil des siècles (**Figure 3**). L'art du portrait existe depuis des millénaires et, si chaque visage est unique, chacune de ses représentations l'est tout autant, traduisant une intention ou une émotion. Ni l'apparition de la photographie, ni celle des smartphones et des réseaux sociaux, n'ont freiné cette surreprésentation du visage. Nous passons finalement une bonne partie de notre temps à regarder des visages, et c'est certainement l'une des raisons pour lesquelles la perception des visages est devenue à partir des années 80 (Bruce & Young, 1986a) un important domaine de recherche en psychologie cognitive, en neuropsychologie et en neurosciences (Hecaen & Angelergues, 1962; Benton & Van Allen, 1968; Bruce & Young, 1998; Haxby, Hoffman, & Gobbini, 2000; Pfütze, Sommer, & Schweinberger, 2002; Rossion, 2014). C'est également devenu un domaine important à partir des années 2000 dans le domaine du traitement du signal et de l'intelligence artificielle (Viola, Jones, & others, 2001; Zafeiriou, Zhang, & Zhang, 2015). Dans la vie quotidienne, la discrimination et la reconnaissance des visages constituent un défi pour le système visuel, tous les traits du visage ayant un arrangement spatial similaire : deux yeux, un nez et une bouche dans un contour ovale. Pourtant, nous pouvons percevoir individuellement chaque visage, ce qui nous permet de lui assigner une identité, le plus souvent correctement et rapidement. Ainsi, nous sommes capables de repérer le visage d'un proche dans une foule et parfois de reconnaître une personne dans la rue après être restés des années sans l'avoir vue (pour revue, Young & Burton, 2018). Nous pouvons également extraire des informations précises de nos interlocuteurs, comme le sexe, l'âge, les intentions ou l'état émotionnel et nous nous formons des impressions sur l'état de leur santé, leur attractivité ou parfois leur personnalité. Tous ces aspects rendent les visages fascinants. Sommes-nous vraiment experts en traitement des visages ? Comment le devient-on ? Quels substrats cérébraux sont mis en jeu ? Cette expertise est-elle fragile ? Peut-on la perdre, notamment en vieillissant ?



Figure 3. Exemples de visages. **a.** Portrait de femme issu de la base de visages FACES (Ebner et al., 2010) utilisée parmi d'autres pour les recherches en psychologie ; **b.** Portrait de Néfertiti datant de l'Égypte antique, sculpté par Thoutmôsis (vers -1345) ; **c.** Portrait peint par Arcimboldo (1590) ; **d.** Portrait de Marilyn Monroe de Andy Warhol en version 'pixélisée' collage par Nick Smith, série Psycology (2015) ; **e.** Photo de 'visage' perçu dans un objet du quotidien, phénomène connu sous le nom de paréidolie ou illusion d'optique qui consiste à associer une forme ambiguë (nuage, tâche, objet) à une forme familière comme le visage (<http://facesinplaces.blogspot.f/>) ; **f.** Émoticône représentant un visage symbolique

1.1. Positionnement de mon travail

Je n'ai jamais travaillé sur les visages en pensant qu'ils constituent une catégorie « spéciale » de stimuli qui serait plus importante que d'autres objets visuels. Pourtant, à partir des années 90, la question « *Why faces are and are not special?* » (Diamond & Carey, 1986) a suscité de nombreux débats et nombre d'auteurs se sont demandé si les visages, par comparaison avec d'autres objets visuels, sollicitaient des mécanismes visuels spécifiques, probablement en raison de leur importance sociale (e.g., Ellis & Young, 1989; Barry, Johnston, & Scanlan, 1998; Riddoch, Johnston, Bracewell, Boutsen, & Humphreys, 2008; Bukach & Peissig, 2010; Leibo, Mutch, & Poggio, 2011; Hoehl & Peykarjou, 2012; McKone & Robbins, 2012).

Mon intérêt pour la recherche sur les visages a d'abord émergé au sein de l'équipe 'Visages et Cognition' du Laboratoire de Neurosciences Cognitive et Imagerie Cérébrale (LENA-CNRS, Paris), pendant et après ma thèse, puis j'ai apprécié l'intérêt du visage en tant que stimulus social ayant une grande importance tout au long de notre vie (Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997). Le visage en tant que stimulus a en effet une haute valeur 'écologique'. Il est traité de façon universelle depuis la naissance jusqu'à la mort, il est donc central pour les recherches dans une perspective *life-span*. C'est également un vecteur pour l'expression des émotions et la communication non verbale. Il présente de nombreux intérêts cliniques car des troubles de la cognition sociale peuvent en affecter le traitement.

Mes premiers travaux de recherche sur la perception des signaux sociaux ayant porté sur le traitement de la configuration faciale et sur les activités cérébrales qui lui sont associées, cette première section sera consacrée aux modalités de la reconnaissance des visages, familiers ou non, et plus particulièrement au traitement de la configuration faciale.

Dans ce contexte, la *reconnaissance des visages* fera référence à la façon dont un visage particulier est individualisé, étant porteur de l'identité de la personne, dans différentes situations (par exemple, quand il s'agit de retrouver quelqu'un dans une foule), et cela malgré la variabilité de l'image liée, par exemple, à des différences de perspective, de taille ou d'éclairage. Je parlerai de *perception des visages* pour désigner la perception des visages en tant qu'objet visuel par comparaison à celle d'autres objets visuels (maison, voiture, etc.).

1.2. Comment les visages sont-ils reconnus ?

Chez l'Homme, la reconnaissance d'un visage repose davantage sur les relations entre les traits les plus saillants du visage que sur les traits eux-mêmes (yeux, nez, bouche, cheveux). Le concept de 'traitement configural' rend compte du fait que les visages diffèrent à la fois par leurs traits caractéristiques (mes yeux sont différents des vôtres) et par les relations spatiales existant entre ces traits (la distance entre mes yeux est différente de la distance entre les vôtres). De nombreuses études ont montré que les distances qui séparent les traits sont aussi importantes que les traits eux-mêmes pour la reconnaissance et la discrimination des visages (e.g., Rhodes, 1988; pour revue Maurer, Le Grand, & Mondloch, 2002; Baudouin, Chambon, & Tiberghien, 2009; Piepers & Robbins, 2012; Tanaka & Gordon, 2012). Deux arguments majeurs démontrent, dans les études expérimentales, l'importance de cette variable spatiale et l'importance du traitement configural des visages (voir Baudouin et al., 2009)

Bien que les visages puissent être rencontrés dans des orientations autres que la verticale, la perception de visage à l'endroit est le mode par défaut de perception du visage. Des modifications expérimentales de ce mode de présentation et de son traitement ont été un des premiers arguments pour démontrer l'importance du traitement configural des visages. Par exemple, il est bien établi que le traitement des visages est affecté par l'inversion (i.e. rotation de 180° dans le plan vertical) du visage, phénomène connu sous le nom '*d'effet d'inversion*'. Des études ont démontré que la reconnaissance des visages était bien plus perturbée par l'inversion que celle d'autres catégories de stimuli comme, par exemple, les chevaux ou les maisons (Yin, 1969; Carey & Diamond, 1977).

Un second argument implique notre sensibilité aux '*informations relationnelles*' dans le visage, qui concernent les relations de distance entre les traits faciaux. Des études princeps sur ce sujet ont mis en évidence qu'il était possible de distinguer de très subtils changements de distance entre les traits faciaux (p. ex., écartement-rapprochement des yeux, écartement-rapprochement des yeux et de la bouche), dans les limites de l'acuité visuelle –environ une minute d'angle visuel– (Haig, 1984; Tanaka & Sengco, 1997). Il est également observé qu'un visage devient 'grotesque' par des modifications exagérées de la distance entre les traits faciaux (e.g., écartement des yeux), mais ces changements ne sont pas perçus si le visage est inversé à 180° (Searcy & Bartlett, 1996; Leder & Bruce, 1998; Leder, Candrian, Huber, & Bruce, 2001).

1.3. Bases neurales de la perception des visages

Selon l'hypothèse de la 'spécificité' du traitement des visages, il existerait chez l'être humain des réseaux neuronaux sélectivement impliqués dans la perception des visages *per se*. Initialement, des études en électrophysiologie utilisant des enregistrements intracrâniens (e.g., Allison, Puce, Spencer, & McCarthy, 1999) ou des potentiels évoqués (e.g., Bentin et al., 1996; Bötzel et al., 1995; George et al., 1996) ont suggéré chez l'être humain l'existence de mécanismes de traitement cérébraux sélectifs pour les visages (pour revue, Rossion, 2014). Les premières études en potentiels évoqués (PE) ont permis d'identifier des activités électriques enregistrées entre 120 et 200 ms après la présentation d'un visage (schématique ou photographie) par comparaison à des figures sans signification. Si l'on ne parle aujourd'hui pratiquement que de « la N170 », c'est d'abord sur une composante positive dans les régions centro-pariétales du scalp, au niveau du vertex, la VPP (*Vertex Positive Potential*) (Jeffreys, Tukmachi, & Rockley, 1992 ; Jeffreys, 1996) que les travaux ont porté. Par la suite, l'intérêt s'est déplacé sur les négativités temporales et en particulier « la N170 » (George et al., 1994; Bentin et al., 1996) qui est devenue, depuis, le marqueur le plus utilisé, de la perception des visages. La N170, qui culmine approximativement à 170 ms post-stimulus dans les régions occipito-temporales du scalp, reflèterait les premières étapes de catégorisation d'un visage en tant que visage et contribuerait par la suite à l'identification individuelle du visage (Figure 4a; pour revue voir Rossion & Jacques, 2011; Rossion, 2014)

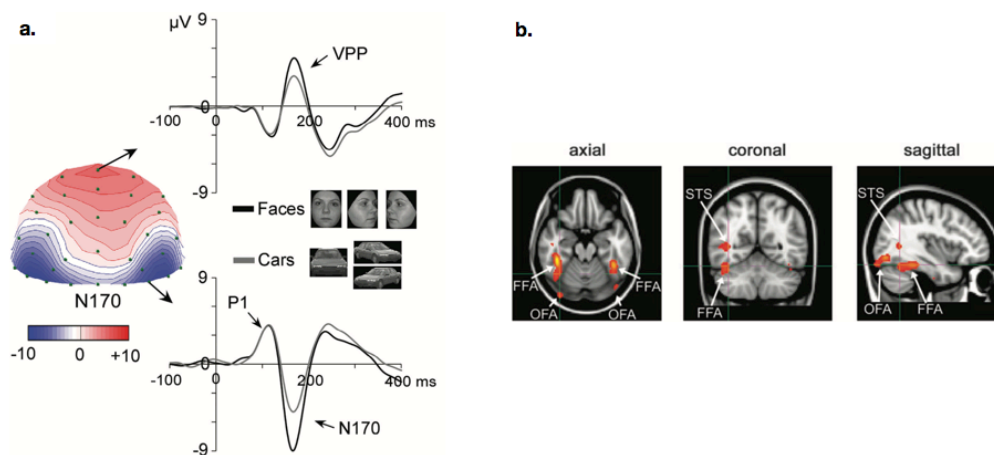


Figure 4. a. N170 (dans les régions inféro-temporales) et VPP (au vertex) plus amples en réponse à des présentations de visages que de voitures. D'après Rossion et Jacques (2011) ; b. Localisation des régions cérébrales spécifiques des visages : aire fusiforme des visages (*face fusiform area*, FFA), aire occipitale des visages (*occipital face area*, OFA) et sillon temporal supérieur (*superior temporal sulcus*, STS). D'après Davies-Thompson, Newling, & Andrews (2012).

Par la suite, de nombreuses études en neuroimagerie fonctionnelle ont mis en évidence différentes régions du cerveau impliquées, de façon sélective, dans le traitement des visages. Les premières études, réalisées dans les années 90, en Tomographie par Émission de Positons (TEP), ont mis en évidence une forte activation des régions du cortex occipito-temporal ventral chez les participants regardant des visages (Sergent, Ohta, & MacDonald, 1992; Haxby et al., 1994), corroborant ainsi les études de cas de patients prosopagnosiques (Bodamer, 1947; Hecaen & Angelergues, 1962; pour revue Barton, Corrow, & Dalrymple, 2016) et les études en électrophysiologie chez le singe macaque (Desimone, Albright, Gross, & Bruce, 1984; pour revue Freiwald, Duchaine, & Yovel, 2016).

Puis, dès les premières études en Imagerie par Résonance Magnétique (IRMf), c'est une zone plus spécifique du gyrus fusiforme latéral (**Figure 4b**), qui a été décrite comme une région « sensible aux visages » (Puce, Allison, Gore, & McCarthy, 1995), puis comme « l'aire fusiforme des visages », la FFA (Kanwisher et al., 1997; Kanwisher & Yovel, 2006). La FFA été identifiée comme répondant de façon plus importante aux visages qu'à d'autres objets visuels 'non-faciaux' et contribuerait de façon clé au processus de reconnaissance des visages (voir Haxby, Hoffman, & Gobbini, 2000). Plus tard, d'autres études ont montré que le traitement du visage dépend d'un réseau plus large, composé de plusieurs modules cérébraux, qui semblent – comme la FFA – dédiés au traitement des visages (**Figure 4b**), notamment la zone occipitale des visages (OFA, Gauthier, Skudlarski, Gore, & Anderson, 2000; Davies-Thompson et al., 2012; pour revue Pitcher, Walsh, & Duchaine, 2011), qui serait impliquée dans le traitement perceptif précoce des traits faciaux, et le sillon temporal supérieur (STS, Puce, Allison, Bentin, Gore, & McCarthy, 1998) qui serait impliqué dans le traitement des aspects changeants du visage – regard, expression, mouvement des lèvres – (pour revue, Axelrod & Yovel, 2015; Liu, Harris, & Kanwisher, 2010; Pitcher, Walsh, & Duchaine, 2011). Ainsi, ces trois régions (FFA, OFA, STS) sont considérées comme formant un système de base (*Core System*) impliqué dans le traitement visuel des visages (Haxby et al., 2000; Duchaine & Yovel, 2015).

Il convient de préciser que d'autres espèces animales non-primates sont capables de discriminer les visages humains, notamment celles qui possèdent un néocortex, et qui ont été domestiquées et ont pu subir une pression évolutive pour reconnaître les humains, telles que les chiens (Huber, Racca, Scaf, Virányi, & Range, 2013), les chevaux (Stone, 2009) ou les vaches (Rybarczyk, Koba, Rushen, Tanida, & De Passillé, 2001). D'autres études ont montré que ces capacités existent aussi chez des animaux sans néocortex, comme les pigeons, vivant dans des zones urbaines au contact d'humains (Jitsumori & Makino, 2004). Enfin, une étude publiée en 2016, a montré que certaines espèces de poissons, notamment le poisson-archer⁵, dépourvues de néocortex et de tout contact avec les humains, étaient capables d'apprendre à discriminer des visages (Newport, Wallis, Reshitnyk, & Siebeck, 2016).

⁵ Une espèce de poissons (*Toxotes chatareus*) avec de bonnes capacités visuelles, capables d'expulser des jets d'eau par la bouche pour déloger ses proies (p. ex., insectes) sur des feuilles.

1.4. Peut-on percevoir un visage sans traits faciaux ?

Revenons au traitement des visages chez l'Homme. Dans les années 2000, l'une des questions en suspens était de savoir si la dynamique cérébrale sous-jacente au traitement des visages, notamment cet 'effet N170' (ou M170 en MEG, Liu, Higuchi, Marantz, & Kanwisher, 2000) pour les visages –comparativement à d'autres objets visuels– reflétait vraiment la perception d'un stimulus en tant que visage ou reflétait, en réalité, plutôt des différences de plus bas niveau (par exemple, taille, luminance, contraste ou fréquence spatiale) entre les différentes catégories d'objets visuels, connues pour moduler l'amplitude des potentiels évoqués précoces.

C'est dans ce contexte, qu'en 2005, avec Nathalie George (George, Jemel, Fiori, Chaby, & Renault, 2005), je me suis intéressée à la perception de visages, même en l'absence de traits faciaux, afin d'examiner la dynamique cérébrale de la perception consciente de visages. Pour cela nous avons utilisé des figures ambiguës en deux tons (noir et blanc) de Mooney (1957), dérivées de photographies de visages obtenues sous un éclairage asymétrique. Ces figures, utilisées dans des études en psychologie (e.g., Dolan et al., 1997; McKone, 2004), ont l'intérêt de montrer qu'un pattern visuel simple peut être appréhendé d'emblée comme un visage quand il est présenté à l'endroit, même en l'absence d'indices faciaux apparents, et qu'il ne l'est plus quand il subit un renversement à 180°, ce qui abolit toute perception consciente de visage (voir Figure 5a).

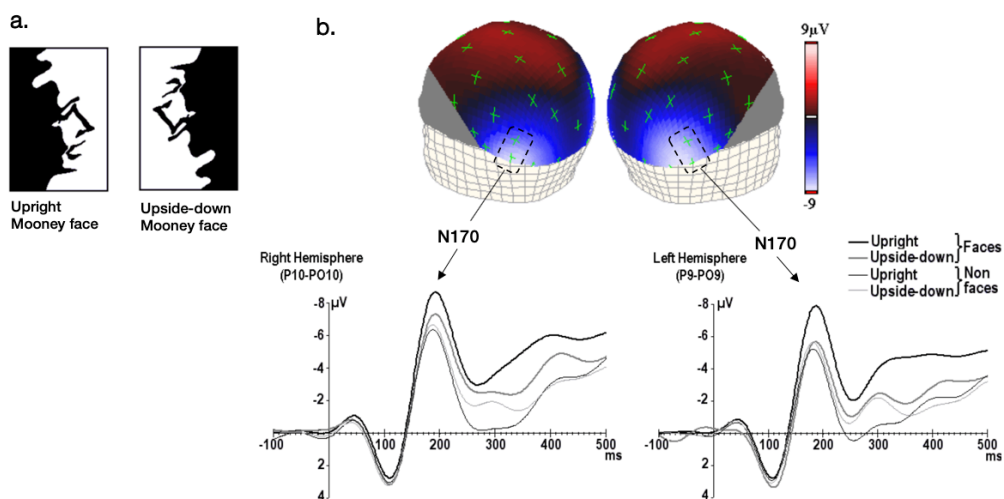


Figure 5. a. Exemple de figures de Mooney à d'endroit (*Upright*) et à l'envers (*Upside-down*) ; **b.** En haut, cartes de potentiels évoqués pour les figures de Mooney perçues comme visages au moment du pic de la N170 (visible en bleu sur les électrodes P10-PO10 -à droite- et P9-PO9 -à gauche-). En bas, décours temporels des activités occipito-temporales pour les figures de Mooney à l'endroit/envers, perçues comme visages ou non, sur les électrodes P10-PO10 moyennées et P9-PO9 moyennées. Adapté de George et al., (2005).

- George, N., Jemel, B., Fiori, N., Chaby, L. & Renault, B. (2005). Electrophysiological correlates of facial decision: Insights from upright and upside-down Mooney-face perception. *Cognitive Brain Research*, 24(3), 663-673.

Dans cette étude en électrophysiologie, nous avons présenté à des jeunes adultes (20-30 ans), des figures de Mooney à l'endroit ou à l'envers ; les participants devaient indiquer s'ils percevaient un visage (ou non) dans l'image présentée. Les potentiels évoqués (PE) étaient indexés en fonction de la catégorisation consciente du stimulus en tant que visage ou non. Les résultats de cette étude ont montré que les activités occipito-temporales sont plus amples lorsque les stimuli sont perçus comme visages que lorsqu'ils sont perçus comme des formes dénuées de signification (**Figure 5b**). De plus cet effet est observé entre 140 et 440 ms post-stimulus pour les figures à l'endroit et entre 340 et 440 ms post-stimulus pour les figures à l'envers. Ce délai physiologique est accompagné d'un délai comportemental, les réponses « visages » étant retardées de 120 ms pour les stimuli à l'envers par comparaison aux stimuli à l'endroit. **Ces résultats importants sur la dynamique temporelle du traitement des visages ont été parmi les premiers (George, Jemel, Fori, Chaby & Renault, 2005) à montrer la sensibilité particulière de la N170 à la 'perception' des visages en tant que tels, même en l'absence de traits faciaux clairement identifiables (Eimer, 2012; Latinus & Taylor, 2005).**

Par la suite, d'autres travaux ont confirmé ce résultat en utilisant des images des tableaux d'Arcimboldo, dans lesquels des portraits peints sont constitués d'éléments organiques (fruits, légumes, végétaux). Comme pour les figures de Mooney, l'image du tableau d'Arcimboldo présentée à l'endroit, et perçue comme visage par les participants, évoque une N170 nette, mais son amplitude diminue sensiblement lorsque l'orientation de l'image est inversée et que le visage n'est plus perçu comme tel (Caharel et al., 2013; Rossion & Jacques, 2011). Aujourd'hui, après de nombreuses observations dans la littérature, la N170 –ou plus précisément 'l'effet N170'– peut être considérée comme reflétant des processus de haut niveau, c'est-à-dire **la 'signature' de la perception d'un stimulus comme étant un visage**. Poussant cette idée plus loin, il a été montré que même un stimulus simple pouvait évoquer un effet N170 dès lors que le participant avait été incité à voir un visage dans la forme présentée et interprétait consciemment cette forme comme un visage (Bentin & Golland, 2002; Bentin, et al., 2002; Churches, Baron-Cohen, & Ring, 2009; Proverbio & Galli, 2016). En d'autres termes, dès qu'un stimulus contient assez d'éléments pour être interprété comme un visage, la N170 est plus ample, culmine quelques millisecondes plus tôt, présente une topographie occipito-temporale et une latéralisation hémisphérique droite plus marquée (pour revue Rossion, 2014; Hinojosa, Mercado, & Carretié, 2015) ; c'est ce qui ferait qu'elle serait « spécifique » des visages.

1.5. De l'importance de la familiarité

L'idée selon laquelle nous acquérons naturellement une expertise dans la reconnaissance des visages que nous rencontrons, paraît intuitivement assez évidente. Elle est d'ailleurs devenue, à partir des années 2000, l'une des questions théoriques les plus présentes dans la littérature sur la reconnaissance des visages. Dans cette perspective, l'expertise acquise progressivement au cours des années pour individualiser les visages, nous rendrait très performants dans la vie quotidienne pour reconnaître les visages. Cependant l'expertise pour les visages dépend entre autres de leur familiarité (voir, Gauthier et al., 2000; Hancock & Rhodes, 2008).

Le concept de ‘familiarité’ est central dans notre compréhension de la reconnaissance des visages en tant que signal social. Le fait que la perception des visages familiers et celle des visages non familiers diffèrent à plusieurs égards est connu depuis longtemps et a été souligné dans différents modèles théoriques dès la fin des années quatre-vingt (Bruce & Young, 1986; Young & Burton, 2017; Kramer, Young, & Burton, 2018). Typiquement, dans des tâches de mémoire (e.g., Ellis, Shepherd, & Davies, 1979) ou d’appariement perceptif (e.g., Bruce, Henderson, Newman, & Burton, 2001), les visages familiers sont traités plus rapidement et avec plus de précision que les visages non familiers. Par exemple, les premières études sur la mémoire des visages ont montré que de légers changements dans la pose ou l’éclairage du visage nuisaient à la mémorisation des visages non familiers (e.g., Hill & Bruce, 1996) et que la reconnaissance déclinait pour les visages non familiers en cas de différence entre la photo d’étude et celle de test (Estudillo & Bindemann, 2014).

La reconnaissance de visages ‘très familiers’ semble particulièrement robuste (Bruce, Henderson, Newman, & Burton, 2001b). Au cours du temps, plusieurs auteurs ont fait l’hypothèse que, chez l’adulte, les visages familiers seraient représentés dans un espace facial multidimensionnel (*face-space*) nécessitant d’activer la représentation du visage pour qu’il soit reconnu. Il a d’abord été proposé que les visages soient codés sous forme de représentations individuelles (*exemplar-based coding*) élaborées à partir des multiples expériences que la personne aurait eues avec le visage (Valentine, 1991). Puis, il a été proposé que les visages soient codés comme une déviation par rapport à un visage ‘moyen’ (*norm-based coding*), lequel servirait de norme perceptive pour la personne (Jeffery, Read, & Rhodes, 2013; Rhodes & Jeffery, 2006). Ainsi, nous pouvons reconnaître les visages des personnes qui nous sont familières (proches, collègues, personnes célèbres) malgré le temps qui passe et les changements d’orientation, d’éclairage, de coupe de cheveux ou de lunettes (Jenkins, White, Van Montfort, & Mike Burton, 2011), car nous nous construisons une représentation de la façon dont son visage peut varier. Sur le plan expérimental, il a été montré que nous pouvons tolérer une importante dégradation des photographies (Burton, Bruce, & Hancock, 1999) ou distorsions de l’image (Hole, George, Eaves, & Rasek, 2002) des personnes familières ou célèbres ; ces transformations ont très peu d’effet sur notre capacité à reconnaître ces visages. Ces capacités à reconnaître les visages familiers malgré des changements d’éclairage, de pose, d’orientation ou des dégradations d’image, ont par exemple été mises en évidence avec des vidéos de faible qualité issues de caméras de surveillance (Burton, Wilson, Cowan, & Bruce, 1999).

Alors que nous sommes généralement efficaces pour reconnaître des visages familiers, la plupart d’entre nous éprouvent plus de difficultés qu’on pourrait le penser pour reconnaître des *visages non familiers*, dont nous n’avons finalement qu’une expérience perceptive limitée. Dans des tâches d’apprentissages de nouveaux visages, même un changement minime sur le visage entre la phase d’étude et celle de test (par ex., point de vue, pose, éclairage) réduit drastiquement la performance (Bruce, 1982; Hill, 1997; Longmore, Liu, & Young, 2008). Soulignons qu’il ne s’agit pas d’un simple problème de mémoire –qui joue par ailleurs un rôle crucial, par exemple dans les témoignages oculaires (Wells & Olson, 2003; Megreya & Burton, 2008)– car le même type de difficultés peut se manifester dans des tâches simples d’appariement perceptif et ce malgré un temps

d'exposition illimité (Bruce et al., 1999; Bindemann & Sandford, 2011). Cependant, les résultats de ces études ne sont pas univoques puisque qu'il a été observé de bons niveaux de performances chez des jeunes adultes, dans l'appariement de visages non-familiers (Rossion & Michel, 2018) issus du test classique d'identification de visages non-familiers, développé par Benton, BFRT (Benton & Van Allen, 1968). Cependant, lorsque la variation entre les photos est importante (pose, éclairage, distance de prise de vue, date à laquelle la photo a été prise ou appareils photos différents), la tâche devient très difficile (Logie, Baddeley, & Woodhead, 1987; Johnston, Hill, & Carman, 1992). Essayez vous-même cette tâche particulièrement convaincante proposée en 2011 par Jenkins (voir **Figure 6**), qui consiste simplement à trier les photographies par identité et à décider combien de personnes différentes sont présentes parmi quarante photographies (Jenkins et al., 2011).



Figure 6. Exemple de tâche de tri de visages non-familiers en différentes identités. Ici, un tableau de 40 photographies de visages sont présentées au participant qui doit indiquer combien il perçoit d'identités différentes. D'après Jenkins et al. (2011).

Tous les participants surestiment le nombre d'identités avec des réponses allant de trois à seize identités différentes, neuf étant la réponse la plus fréquente ; en réalité il n'y a que deux identités⁶, les participants confondent généralement les différences dans l'image avec des différences d'identités.

En somme, alors que l'expertise acquise pour les visages devrait nous permettre facilement et rapidement de déterminer si deux photos montrent des individus identiques ou différents, il semble que notre capacité à réaliser cette tâche dépende de la familiarité avec les visages. Cela est observé malgré notre expérience quotidienne récurrente des visages, en personnes, sur des photographies ou des vidéos et avec différentes variations dues à des changements de conditions d'éclairage ou de pose (voir Young & Burton, 2018). En définitive, l'expertise pour les visages serait donc une forme d'effet de familiarité.

⁶ Les deux identités A et B se répartissent selon le pattern suivant pour chaque ligne : ABAAABABAB; AAAAABBBAB; BBAAABBAA; BABAABBBBB

1.6. Perception des visages à l'épreuve de l'âge

Je considère le visage comme un signal social idéal pour comprendre des mécanismes plus importants qui sous-tendent le développement humain. Dans cette section, je soutiendrai qu'une approche *lifespan* de la perception des visages peut éclairer certains débats actuels sur la perception des visages chez les adultes, en psychologie et en neurosciences cognitives. Je ne traiterai pas les questions théoriques sur les origines du développement de ces compétences de reconnaissance des visages, ni sur leur détermination génétique ou liée à l'expérience visuelle intensive (Farah, Rabinowitz, Quinn, & Liu, 2000; Pascalis & Kelly, 2009). En psychologie du développement, il est admis que la capacité à traiter et reconnaître les visages est précoce et se développe tout au long de la vie, avec une forte croissance lors de la petite enfance, un affinement au cours de l'enfance et l'adolescence, puis un haut niveau de performance à l'âge adulte (Lawrence et al., 2008; Pascalis & Kelly, 2009). **Dans cette section, il s'agit de montrer mes contributions concernant les changements –perceptifs et cérébraux– qui se produisent après l'âge de 50 ans (Chaby & Narme, 2009).**

Il est couramment admis que les performances en reconnaissance des visages s'améliorent considérablement entre l'enfance et l'âge adulte, à tel point que dans les années quatre-vingt-dix, les capacités des enfants étaient qualifiées de 'déficientes' par rapport à celles des adultes (Carey, Schonen, & Ellis, 1992). La trajectoire développementale de l'amélioration des performances a été interprétée comme dépendant de changements dans les stratégies de traitement perceptif des visages. Le développement tardif de cette compétence, lié aux processus de maturation cérébrale, a d'ailleurs été considéré comme un argument en faveur de la notion d'expertise pour les visages (Diamond & Carey, 1986). L'une des questions était de savoir si les stratégies perceptives observées chez le jeune adulte (20-25 ans) lui sont spécifiques, ou sinon, à partir de quel âge elles apparaissent chez l'enfant.

Les premières données développementales (Carey & Diamond, 1977; Carey, 1981) ont montré que les enfants s'appuyaient uniquement sur un traitement local centré sur les traits et qu'ils avaient besoin d'une dizaine d'années d'expérience des visages pour traiter les relations entre les traits du visages, et donc acquérir les caractéristiques du traitement configural adulte. C'est seulement après une exposition répétée aux visages que l'enfant pourrait utiliser le traitement configural pour reconnaître les visages et, ainsi, obtenir des performances équivalentes à celles des adultes. Cette vision a été l'objet de nombreuses discussions. Certains ont attribué les moindres performances des enfants à une immaturité cognitive générale plutôt qu'à une immaturité spécifique du traitement des visages (Want, Pascalis, Coleman, & Blades, 2003). D'autres ont avancé que les enfants d'âge préscolaire et scolaire utilisaient des stratégies perceptives déjà présentes chez l'adulte, notamment des informations de type configural (e.g., Brace et al., 2001; McKone, Kanwisher, & Duchaine, 2007; Pellicano, Rhodes, & Peters, 2006). Enfin, en prenant en compte à la fois les performances et les stratégies perceptives utilisées, certains ont postulé que dès les premiers mois les enfants utilisent les mêmes processus que les adultes pour traiter les visages, mais avec une moindre sensibilité perceptive, le développement optimal prenant en effet plusieurs années (Baudouin, Gallay, Durand, &

[Robichon, 2010](#); [De Heering et al., 2016](#); [Freire & Lee, 2001](#); [Mondloch, Pathman, Maurer, Le Grand, & de Schonen, 2007](#); [Mondloch & Thomson, 2008](#); [Wieser & Brosch, 2012](#)).

Sur le plan neuronal, les premières études réalisées en TEP ont permis d'observer vers l'âge de 2 à 3 mois, les premiers signes de spécialisation corticale pour les visages, au niveau du cortex temporal ventral droit ([Tzourio-Mazoyer et al., 2002](#)). Par la suite, des études en spectroscopie proche infrarouge (NIRS) ont également fourni une preuve de la mise en place précoce de circuits cérébraux dédiés aux visages ([Otsuka, 2014](#)). Cependant, bien que précocement fonctionnelle, la spécialisation cérébrale pour les visages mettrait du temps à se développer, les travaux dans ce domaine suggérant qu'elle se poursuit tout au long de l'enfance jusqu'à l'adolescence, voire même jusqu'à l'âge adulte. Les études en IRMf, qui se sont focalisées sur les changements au niveau de la FFA (*face fusiform area*), ont rapporté une augmentation de la spécialisation de cette région pour les visages entre l'enfance et l'âge adulte ([Golarai et al., 2007](#); [Scherf, Behrmann, Humphreys, & Luna, 2007](#)). Ces résultats suggèrent que certaines régions comme l'OFA (*occipital face area*), le LO (*lateral occipital cortex*) et le STS (*superior temporal sulcus*) sont précocement matures et répondent déjà préférentiellement aux visages, tandis que la FFA continue sa maturation jusqu'à un âge avancé.

Les premières études en PE, permettant de suivre la dynamique développementale des réponses aux visages, ont montré que les nourrissons de 6 mois différencient les visages des objets ([de Haan & Nelson, 1999](#)) et les visages humains des visages de singes ([de Haan, Johnson, & Halit, 2003](#)). Cependant, les réponses sont en général moins nettes et moins latéralisées que chez les adultes. Par ailleurs, les réponses aux visages, précurseurs de la N170 chez l'adulte, ont été observées vers 300 ms post-stimulus chez le bébé de quelques mois ([de Haan, Pascalis, & Johnson, 2002](#)), puis vers 270 ms à 4 ans et environ 200 ms vers l'âge de 14 ans ([Taylor, McCarthy, Saliba, & Degiovanni, 1999](#)).

Finalement, il semble que la région impliquée dans le traitement des visages soit particulièrement plastique et qu'elle continue à se développer bien après l'adolescence, jusqu'à environ 25 ans. Début 2017, une étude marquante de l'équipe de Grill-Spector ([Gomez et al., 2017](#), voir **Figure 7**) réalisée en combinant IRM quantitative (IRMq) et fonctionnelle (IRMf) chez des enfants (5-12 ans) et des adultes (22-29 ans), a mis en évidence que le gyrus fusiforme impliqué dans le traitement des visages continuait de se développer dans l'hémisphère droit (volume et prolifération microstructurale) jusqu'à l'âge adulte (+12% de tissus cérébral), et que ces résultats étaient corrélés aux performances de reconnaissance des visages. En revanche, une autre région voisine du cortex temporal ventral, le sillon collatéral, impliqué dans le traitement des lieux, ne changeait pas au cours du développement. De façon intéressante, ces données laissent à penser différemment le développement du cortex au cours du développement life-span, et au-delà, suggèrent que les visages pourraient avoir un statut spécial qui nécessiterait une puissance de traitement supplémentaire.

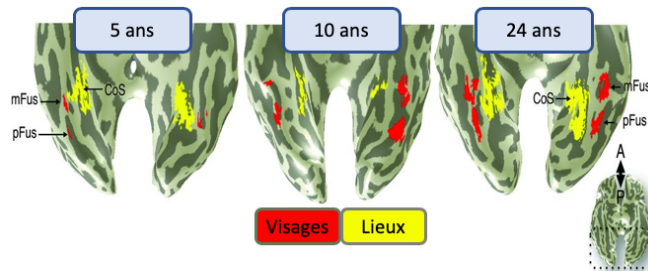


Figure 7. Régions du cortex temporal ventral impliquées dans le traitement des visages (en rouge) et des lieux (en jaune), chez des enfants (5 ans, 10 ans) et adultes (24 ans). *pFus/mFus* gyrus fusiforme postérieur/médial ; *CoS*, sillon collatéral. D'après Gomez et al. (2017).

L'idée que les personnes âgées puissent avoir des difficultés particulières à reconnaître les visages n'est pas surprenante dans la mesure où une telle plainte est souvent rapportée dans cette population. En 2009, j'ai publié une revue de question sur le sujet (Chaby et Narme, 2009). Pendant de nombreuses années, les travaux sur la reconnaissance des visages au cours de la vie adulte, et notamment après l'âge de 60 ans, ont été focalisés sur la mémoire des visages qui permet en particulier de discriminer des visages nouveaux de ceux déjà vus. De multiples études à partir des années 90, ont rapporté que les personnes âgées éprouvaient des difficultés à mémoriser des visages, avec une augmentation du nombre de fausses reconnaissances (Bartlett & Fulton, 1991; Crook & Larrabee, 1992; Searcy, Bartlett, & Memon, 1999; Boutet & Faubert, 2006; Edmonds, Glisky, Bartlett, & Rapcsak, 2012) ou des difficultés d'accès au nom (« *J'ai son nom sur le bout de la langue* »). L'accès aux informations biographiques (profession, loisirs) étant généralement préservée (Lott et al., 2005; Maylor, 1990). Par la suite, d'autres travaux en neurosciences cognitives et en psychologie, utilisant des tâches et des stimuli variés, ont indiqué que des changements dans la façon de traiter les visages avec l'âge pourraient se situer à un niveau plus perceptif.

Une grande partie de mes travaux de doctorat s'est attachée à cette question, dans une série d'études en potentiels évoqués (Chaby, Jemel, George, & Fiori, 1999; Chaby et al., 2001, 2000; Chaby, Jemel, Renault, & Fiori, 1999). A l'époque, l'altération éventuelle des premières étapes de l'identification des visages (i.e., l'encodage perceptif) au cours du vieillissement, n'avait jamais été testé. Il n'avait pas non plus été vérifié si les capacités des personnes âgées étaient amoindries de la même façon lorsqu'il s'agit de reconnaître des visages plus ou moins familiers (personnes célèbres, proches) et si ce dysfonctionnement était associé à un ralentissement généralisé ou affectant seulement certaines étapes du traitement des visages. Dans ce cadre, nous avons montré, sur le plan comportemental, que des difficultés perceptives et un ralentissement pouvaient apparaître dès l'âge de 45-50 ans lors du traitement de visages célèbres, les difficultés étant réduites pour les visages de proches. Ce résultat était accompagné, sur le plan électrophysiologique, par une réduction de l'amplitude et une augmentation des latences des potentiels tardifs impliqués dans la tâche chez les adultes plus âgés. En revanche, la latence de la N170, reflétant la catégorisation du stimulus en tant que visage (on parle aussi d'encodage perceptif), n'était pas affectée chez les participants plus âgés, ce qui suggère que les étapes de traitement visuel précoce des visages familiers sont préservées et que le ralentissement n'est pas généralisé (pour revue, Chaby, 2004).

A la suite de ces études, je me suis intéressée aux réorganisations cérébrales du traitement de visages familiers chez des adultes qui vieillissent 'bien'. En 2003, dans un travail que nous avons réalisé avec Nathalie George, Bernard Renault et Nicole Fiori, nous avons enregistré l'activité électrique cérébrale de jeunes adultes de 20-35 ans et d'adultes âgés de 45-60 ans, sans trouble cognitif, lors d'une tâche simple de perception de visages très familiers (Chaby, George, Renault, & Fiori, 2003). La tâche étant réussie à plus de 85% par les deux groupes de participants, nous nous sommes surtout focalisés sur la dynamique électrophysiologique des changements cérébraux qui pouvaient s'opérer chez des adultes plus âgés, au niveau de l'onde N170 spécifique de l'encodage perceptif des visages, enregistrée au niveau occipito-temporal. Nos travaux ont montré (**Figure 8**), comme c'est classiquement le cas chez les jeunes adultes, que la N170 était latéralisée et plus ample au niveau de l'hémisphère droit, par rapport à l'hémisphère gauche (ce qui appuie l'hypothèse de la dominance de l'hémisphère droit pour le traitement des visages). De façon plus surprenante, nous avons mis en évidence que dès l'âge de 50 ans, des changements intéressants s'opèrent dans la dynamique de l'activité cérébrale en réponse aux visages. Alors que la latence de la composante N170 n'était pas modifiée avec l'âge, confirmant nos travaux antérieurs (Chaby et al., 2001), son amplitude était plus élevée et n'affichait plus cette asymétrie en faveur de l'hémisphère droit. **Il s'agissait alors de la première étude en électrophysiologie démontrant l'existence, dès l'âge de 50 ans, de mécanismes de réorganisations cérébrales (réduction de l'asymétrie hémisphérique et recrutement cérébral plus important), et ceci dès les premières étapes du traitement perceptif des visages.**

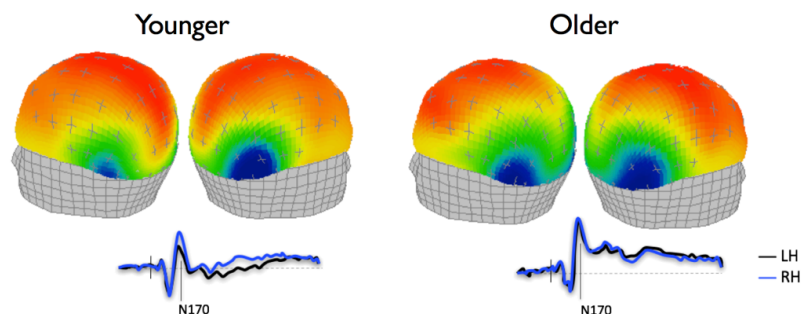


Figure 8. Corrélat électro-physiologique du traitement perceptif de visages familiers chez des jeunes adultes (Younger, 20-35 ans) et des adultes plus âgés (Older, 45-60 ans). En haut, cartes de potentiels évoqués au moment du pic de la N170. En bas, décours temporels des activités inféro-temporales (dans l'hémisphère gauche, LH en noir et l'hémisphère droit, RH en bleu) enregistrées sur les électrodes temporales T5 et T6. Adapté de Chaby et al., 2003.

- Chaby, L., George, N., Renault, B. & Fiori, N. (2003). Age-related changes in brain responses to personally known faces: an event-related potential (ERP) study in humans. *Neuroscience Letters*, 349, 125-129.
- Chaby, L., (2004). Le vieillissement. In Renault (eds), *L'imagerie cérébrale fonctionnelle électrique et magnétique*. Editions Hermes, Collection Sciences Cognitives, Paris, France, 2004. pp 235-249.
- Chaby, L., & Narme, P. (2009). Processing facial identity and emotional expression in normal aging and neurodegenerative diseases. *Geriatr Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 7, 31-42.

Ces résultats étaient compatibles avec le modèle HAROLD (*Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults*), publié un an plus tôt par Roberto Cabeza, reposant sur les données d'études en imagerie fonctionnelle dans des tâches de mémoire, qui suggérait que les changements d'activation liés à l'âge se manifestent principalement par une diminution de la latéralisation hémisphérique (Cabeza, 2002; Dolcos, Rice, & Cabeza, 2002). Nos résultats ont par la suite été confirmés par d'autres études en EEG mettant également en évidence une absence d'effet de l'âge sur les latences des ondes précoces reflétant le traitement perceptif des visages, mais un effet sur des étapes plus tardives du traitement, après 200 ms (Gao et al., 2009; Pfützte et al., 2002; Wiese, Komes, & Schweinberger, 2012). Cependant quelques études ont par la suite fait état de résultats contradictoires (Rousselet et al., 2009; Daniel & Bentin, 2012). Pendant les dix années qui ont suivi la publication de notre étude, d'autres travaux ont confirmé qu'un cerveau vieillissant 'en bonne santé' pouvait conserver un certain niveau de plasticité fonctionnelle, notamment en recrutant des régions cérébrales supplémentaires afin de préserver un niveau satisfaisant de performance comportementale, en particulier pour traiter des stimuli très familiers (Greenwood, 2007; Berlinger et al., 2010).

Cependant, la reconnaissance de visages non-familiers est plus vulnérable, plus sensible au vieillissement, et fait l'objet d'une plainte fréquente chez la personne âgée (Chaby et Narme, 2009). Ces difficultés ont été mises en évidence avec de nombreux paradigmes incluant des formats (dessins, photos) et des temps de présentations variés, dans des tâches d'appariement, de reconnaissance 'oui/non' ou de dénomination (Boutet & Faubert, 2006; Habak, Wilkinson, & Wilson, 2008; Hildebrandt, et al., 2011). Plusieurs mécanismes ont été proposés au fil du temps pour expliquer ces déficits. Les premières explications se sont concentrées sur l'hypothèse de troubles cognitifs plus généraux (Hildebrandt et al., 2011) ou de difficultés perceptives de bas niveau (p. ex., baisse de l'acuité visuelle, réduction de la sensibilité au contraste) et qui apparaissent en général dès l'âge de 50 ans (Owsley, et al., 1981; Neargarder, et al., 2003).

Dans la continuité de mes travaux précédents, j'ai fait l'hypothèse que les difficultés des personnes âgées pour reconnaître un visage seraient plutôt liées à des déficits dans l'encodage des informations configurales du visage. Les jeunes adultes sont experts dans la reconnaissance des visages parce qu'ils analysent les visages à partir de leur configuration, en privilégiant les relations entre les différents traits les constituant (distance entre les yeux ou entre les yeux et la bouche...). Dans ce contexte, l'altération du traitement configural au cours du vieillissement conduirait à un appauvrissement des représentations des visages perçus et entraîneraient une confusion lors de la comparaison des représentations perçues et des représentations stockées. Avec Pauline Narme⁷ (Chaby, Narme, & George, 2011), nous avons réalisé des expériences sur la reconnaissance des visages non-familiers chez des adultes jeunes (20-30 ans) et âgés (65-80 ans). Dans une tâche dite 'des jumeaux' (**Figure 9**), nous avons demandé aux participants de différencier des paires de visages dont nous avons modifié la distance entre les traits (déplacement de ± 12 pixels), selon l'axe horizontal (distance entre les yeux

⁷ Travail de recherche de master 1 sous ma direction

augmentée ou diminuée) ou vertical (distance yeux-bouche augmentée ou diminuée). Les visages étaient présentés à l'endroit et à l'envers (rotation de 180° dans le plan vertical) afin de tester la sensibilité des personnes âgées à l'effet d'inversion, marqueur de la sensibilité au traitement configural.

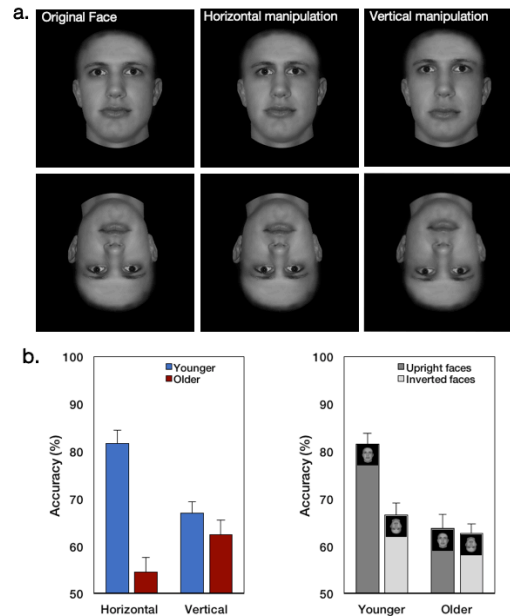


Figure 9. a. Photographie originale (*Original face*) modifiée par écartement/rapprochement des traits selon un axe horizontal (*Horizontal manipulation*) ou vertical (*Vertical manipulation*). Les visages sont présentés à l'endroit ou à l'envers. b. Pourcentages de bonnes réponses des participants adultes jeunes (*Younger*) et âgés (*Older*) dans chaque condition expérimentale. Adapté de Chaby et al., 2011.

Nous avons montré que les adultes jeunes étaient capables de distinguer avec facilité ces variations très fines de la configuration faciale horizontale (région des yeux) ou verticale (région yeux-nez-bouche) sur des visages à l'endroit et qu'ils présentaient un « effet d'inversion » classique (i.e. diminution des identifications correctes) quand les visages étaient présentés à l'envers. Au contraire, chez les adultes âgés nous avons mis en évidence une moindre sensibilité à ces variations (notamment dans la région des yeux) associée à une plus grande difficulté à différencier les visages. En outre, les participants âgés ne présentaient pas « d'effet d'inversion » suggérant ainsi que la reconnaissance des visages pourrait dépendre d'un traitement analytique plus que d'un traitement configural (comme chez les patients prosopagnosiques, voir Ramon & Rossion, 2010). Ainsi, bien que l'impact de changements perceptifs liés à l'âge soit en général peu visible dans la vie quotidienne, les personnes âgées conservant généralement une bonne expertise des visages, des difficultés peuvent apparaître quand il s'agit d'identifier des visages à distance, dans de mauvaises conditions d'éclairage ou quand ils sont vus sous différents angles (pour revue Boutet, Taler, & Collin, 2015). **J'ai ainsi participé à montrer que les adultes âgés ont davantage de difficultés que les jeunes adultes pour détecter les changements de la configuration faciale spécialement dans la région des yeux** (voir aussi Slessor et al., 2013).

- Chaby, L., Narme, P. & George, N. (2011). Older Adults' Configural Processing of Faces: Role of Second-Order Information. *Psychology and Aging*, 26(1), 71-9.

Points Clés

« Les visages, sommes-nous tous experts »

- Des différences comportementales dans la perception des visages apparaissent dès l'âge de 50 ans.
- Ces changements concernent plus spécifiquement le traitement de visages non familiers, celui des visages familiers étant généralement préservé.
- Les difficultés de traitement perceptif concernent le traitement de la configuration faciale, en particulier pour la région des yeux.
- Des mécanismes de réorganisations cérébrales sont mis en place dès les premières étapes du traitement perceptif des visages, même en l'absence de difficultés comportementale.

2. De l'importance des expressions faciales

Face à nous, autrui est d'abord un visage. Mais le visage n'est pas seulement un *objet* social qui fournit des indications sur l'identité, l'âge ou le genre d'autrui. Il oriente également l'interaction sociale en jouant le rôle de médiateur de la relation à l'autre et de la communication interpersonnelle, notamment au travers des expressions faciales. Pourquoi ? Avant tout parce que, **plus qu'un simple objet, le visage est aussi un sujet.**

Pour un philosophe moraliste comme Emmanuel Levinas, dont la philosophie gravite autour du souci de l'autre, le visage recèle ainsi une dimension « éthique ». Le visage n'est pas seulement une réalité à observer « *comme un objet* » telle qu'elle s'offre à nous, c'est aussi une « *voix* » qui silencieusement commande et qu'il importe de ne pas faire taire (Levinas, 1982). **Ainsi, s'il importe de ne pas faire taire les visages, il faut arriver à comprendre comment écouter leurs messages !**

« C'est lorsque vous voyez un nez, des yeux, un front, un menton, et que vous pouvez les décrire, que vous vous tournez vers autrui comme vers un objet. La meilleure manière de rencontrer autrui, c'est de ne pas même remarquer la couleur de ses yeux ! Quand on observe la couleur des yeux, on n'est pas en relation sociale avec autrui. La relation avec le visage peut certes être dominée par la perception, mais ce qui est spécifiquement visage, c'est ce qui ne s'y réduit pas. »

Emmanuel Levinas, Éthique et Infini, 1982.

2.1. Positionnement de mon travail

Si l'idée que les expressions faciales informeraient d'abord le récepteur – i.e. celui ou celle qui observe – des états internes de l'émetteur a longtemps été ancrée dans la littérature (Ekman, 1993; Keltner & Ekman, 2000), **j'envisage avant tout les modifications des traits faciaux comme relevant d'un comportement expressif, d'une action**, où l'émetteur produit (volontairement ou non) un message (qui peut parfois être sur-joué et artificiel, simulé dans le but de tromper ou encore de cacher) en direction du récepteur (voir Frijda, 1986, 2005; Sander, 2015). Dans ce contexte où les émotions, d'une certaine façon, sont publiques plus qu'internes, **j'ai depuis 2009 centré mes recherches sur la façon dont les humains décodent les expressions faciales émotionnelles d'autrui**, en essayant d'analyser leurs représentations perceptives. Particulièrement intéressée par le neuro-développement et la plasticité du cerveau, **j'ai principalement axé mes travaux sur les modifications perceptives liées au traitement des émotions au cours de la vie, notamment dans le cadre du vieillissement en bonne santé et, a contrario, de plusieurs pathologies neurologiques qui affectent le comportement émotionnel et les relations à l'autre.**

2.2. Tentative d'éclaircissement d'un phénomène multicomponentiel

La recherche sur les émotions a connu un engouement pluridisciplinaire, notamment avec le développement des « sciences affectives » au début des années 2000 sous l'impulsion de Klaus Scherer et David Sander ([Rimé, 2016](#); [Sander, 2013](#); [Sander & Scherer, 2014](#); [Scherer, 2005](#)) qui ont misé sur l'interdisciplinarité (notamment la philosophie, la psychologie et les neurosciences, mais également l'informatique et l'intelligence artificielle) et ont défini les émotions comme un phénomène multicomponentiel. On a ainsi pu voir émerger de nombreux débats sur la nature, le nombre, le caractère universel ou la façon de définir les émotions, débats dont je ferai état ici.

Peut-on définir l'émotion ? Étant donné la complexité des émotions il a fallu du temps pour arriver à un consensus autour des caractéristiques qui définissent le concept d'émotion. Il semble néanmoins aujourd'hui qu'on s'accorde globalement pour considérer « l'émotion » comme un phénomène bref, lié à un événement repérable et caractérisé par cinq composantes principales ([Shuman & Scherer, 2014](#); [Sander, 2015](#)) : l'évaluation cognitive (*appraisal*) de la situation déclenchante (c'est à dire le traitement de l'information), les réactions physiologiques (*arousal*) qui correspondent à la composante périphérique (accélération du rythme cardiaque, production de sueur, rougissement, etc.), les modifications expressives d'ordre moteur (expressions faciales, vocales ou posturales qui permettent de communiquer des émotions et des intentions), les tendances à l'action qui renvoient à une disposition à agir de manière spécifique (p. ex., approche, évitement, incapacité de bouger ou '*freezing*'), et enfin l'expérience subjective, qui correspond à la prise de conscience de son état émotionnel (p. ex., verbalisation de l'émotion). Notons toutefois qu'il n'existe pas de consensus total sur une définition de l'émotion. Ainsi, il me semble restrictif de définir les émotions comme des expériences subjectives et donc conscientes, ce qui exclurait les animaux (voir [Adolphs & Anderson, 2018](#)) ou certains patients souffrant de difficultés ou d'une impossibilité à verbaliser leurs émotions ou à se souvenir de leur déclenchement (pour des capacités émotionnelles préservées chez des patients atteints de la maladie d'Alzheimer, voir [Evans-Roberts & Turnbull, 2010](#)). Sans chercher à donner à l'émotion une définition, mes travaux se sont focalisés sur l'émotion en tant qu'évènement dynamique en deux étapes : un mécanisme de déclenchement fondé sur l'évaluation cognitive de l'évènement et la réponse émotionnelle.

Les émotions sont-elles universelles ? Les émotions de bases et notamment les expressions faciales de ces émotions, dans leur dimension de production comme de perception, semblent avoir un statut particulier et ont été initialement décrites comme innées, reconnaissables facilement par tous dans le monde entier, et donc universelles (Darwin, 1872; Ekman, 1993; pour revue Elfenbein & Ambady, 2002). Cependant, même si les émotions sont globalement universelles, elles sont empreintes d'une dimension culturelle dont il faut tenir compte. Dans ce contexte, des expérimentations plus récentes ont montré que le milieu culturel détermine notre manière d'exprimer et de décoder les émotions, notamment pour la joie et la tristesse qui s'expriment et se décodent plutôt par la bouche en occident et par les yeux en orient. Par exemple, en enregistrant les mouvements des yeux de participants européens et asiatiques invités à reconnaître des émotions de base, il a été observé que les participants européens regardaient en moyenne autant les yeux que la bouche, tandis que les participants asiatiques fixaient davantage la région des yeux, même lorsque le visage exprimait la joie (Jack, Blais, Scheepers, Schyns, & Caldara, 2009). Il a également été montré que dans la culture asiatique, la bouche était moins saillante pour transmettre des émotions que dans la culture occidentale (Elfenbein & Ambady, 2003). Cette importance relative des différents traits faciaux influence également la communication virtuelle par écrit, en particulier dans l'utilisation d'émoticônes, cette association de signes de ponctuation imitant une mimique faciale, et permettant d'indiquer l'émotion du locuteur. Ainsi, dans la culture asiatique, la bouche apparaît neutre et il est d'usage de faire varier la forme des yeux, par exemple en utilisant des accents circonflexes pour représenter la joie (^_^) ou la lettre T, symbolisant un œil larmoyant, pour représenter la tristesse (T_T), alors que dans la culture occidentale, le simple changement d'orientation d'une parenthèse permet d'exprimer la joie :-) ou la tristesse :-(tandis que les yeux, représentés par le deux-points, restent neutres (Caldara, 2017).

Peut-on catégoriser les émotions ? L'approche dominante repose sur l'idée que l'expression et la perception d'émotions faciales reposent sur la catégorisation d'un petit nombre de familles d'émotions basiques ou fondamentales⁸ (Ekman, 1992), typiquement entre six et dix et qui seraient facilement reconnues par les êtres humains (Tracy & Robins, 2008). Par conséquent, le traitement des émotions est généralement étudié à l'aide d'images, isolées et statiques, d'émotions prototypiques (par exemple, joie représentée par un visage au large sourire, peur par un visage aux yeux écarquillés) qui maximisent la distinction entre catégories. Ces émotions de base facilement définies par le langage sont des signaux sociaux facilement reconnaissables sur des visages d'âges différents (Ebner & Johnson, 2010), même à une certaine distance (Smith & Schyns, 2009). Cette référence à l'approche catégorielle des émotions, dans laquelle nous nous situerons par la suite, apparaît dans les travaux qui tentent de mesurer la perception des émotions à partir des expressions faciales émotionnelles.

⁸ Le concept d'émotions basiques ou fondamentales, fait référence en réalité à des 'familles' d'émotions qui partageraient des similarités sur le plan de l'évaluation cognitive, des réactions physiologiques, des modifications expressives ou du ressenti subjectif. Il existe ainsi un certain degré de liberté dans l'expression de chaque famille d'émotion, la joie pouvant être associée à cinq ou six expressions différentes, la peur et la colère à plusieurs dizaines (Ekman & Rosenberg, 1997).

Toutefois, notons qu'une grande partie des émotions que nous rencontrons dans la vie quotidienne sont idiosyncrasiques et façonnées par le contexte. Regardez la femme sur la **Figure 10.a**. Est-elle furieuse ? En réalité, l'image **10.b**. révèle une Serena Williams d'une joie extrême après avoir battu sa sœur Venus lors de la finale de l'Open d'Australie en 2017. Cette figure illustre clairement que dans la vie de tous les jours les variables contextuelles sont importantes pour interpréter les émotions sur un visage (Barrett, Mesquita, & Gendron, 2011; Wieser & Brosch, 2012). Au quotidien, les émotions sont également souvent plus subtiles (p. ex., doute, admiration, mépris) que les émotions de base. Cette malléabilité des expressions faciales suggère que chacun peut vivre et exprimer des émotions 'mêlées', composées de plusieurs catégories d'émotions (p. ex., une joie-effrayée dans un manège à sensation, une joie-triste lors de la remise de médaille après une compétition sportive ou une joie-dégoûtée après avoir entendu une blague drôle mais répugnante).

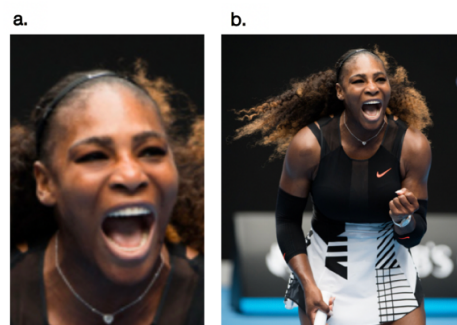


Figure 10. Quelle est l'émotion de cette femme sur la photo de gauche ? **a.** De la colère, de la douleur ? **b.** Replacée en contexte, l'image révèle une joie intense.

Ainsi, d'autres visions des émotions se différencient de l'approche catégorielle, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer l'expérience émotionnelle des participants et de décrire les émotions en ayant recours à une approche multidimensionnelle (Posner, Russell, & Peterson, 2005; Russell, 1980). Dans ce contexte, toute expérience émotionnelle pourrait se structurer selon plusieurs dimensions élémentaires ; par exemple la valence de l'expérience subjective (positif/négatif) et le niveau d'activation (*arousal*) associé (forte/faible) qui correspond à l'énergie ressentie (Russell & Barrett, 1999) ou encore par le temps pendant lequel l'émotion persiste (voir Adolphs & Anderson, 2018). Cependant, un espace émotionnel continu avec des catégories d'expressions faciales plus floues, a pour inconvénient de rendre plus compliqués et ambigus à la fois le recueil et l'interprétation des données.

Les recherches chez l'humain se sont largement concentrées sur les expressions faciales des émotions, les études sur les expressions vocales ou posturales étant apparues plus récemment, comme nous le verrons plus tard. Le terme « expression faciale émotionnelle » suppose que le visage s'anime et transmette un signal émotionnel (Darwin, 1872). Dès les années 2000, les recherches sur le traitement des expressions faciales émotionnelles ont connu un développement important en psychologie et en neurosciences, avec des revues de la littérature marquantes consacrées à ce sujet (Adolphs & Anderson, 2018; Calder & Young, 2005; Ekman, 1973, 2003; Haxby & Ida Gobbini, 2007; Keltner & Ekman, 2000b; Wood, Rychlowska, Korb, & Niedenthal, 2016).

2.3. Quels indices émotionnels sont exprimés par un visage ?

Les expressions faciales qui sont le vecteur principal de la communication non-verbale entre les individus, s'appuient sur les aspects changeants du visage (Ekman, 1993; Schirmer & Adolphs, 2017). Les indices émotionnels exprimés par le visage sont principalement engendrés par les contractions et décontractions de muscles faciaux spécifiques qui induisent des changements rapides du visage, généralement de l'ordre de 250 millisecondes à quelques secondes (Ekman, 2003). Ainsi, différentes émotions peuvent être véhiculées avec de légères modifications de la position des sourcils, de la dynamique d'ouverture ou de contraction des paupières ou encore de la pression des lèvres. Pour autant, nous déduisons les émotions à partir du visage habituellement rapidement et sans effort (Dimberg, Thunberg, & Grunedal, 2002; Tracy & Robins, 2008).

Les travaux scientifiques sur les expressions faciales remontent au milieu du 19^e siècle, avec les travaux du neurologue français Guillaume-Benjamin Duchenne (Duchenne, 1862) sur l'électrostimulation des muscles faciaux impliqués dans la production des expressions faciales, suivis par ceux de Charles Darwin qui, en 1872, publia '*The Expression of the Emotions in Man and Animals*' dans lequel il affirma l'importance des expressions faciales pour la communication en décrivant les variations du visage liées aux émotions (Darwin, 1872). Au 20^e siècle, dans les années 60, le psychologue Silvan Tomkins postula que les émotions sont le premier moteur motivationnel de l'homme et que les rétroactions fournies par les muscles faciaux pourraient conduire à l'expérience subjective de l'émotion.

Par la suite, Paul Ekman, élève de Tomkins, mit au point une approche objective pour le codage des expressions faciales reposant sur une annotation précise du mouvement des muscles faciaux (Ekman & Friesen, 1978; Ekman, Friesen, & Hager, 2002). Son système, appelé FACS (*Facial Action Coding System*), largement reconnu et utilisé aujourd'hui, permet de décomposer chaque expression faciale en unités d'action observables (*Action Units*⁹, AU) et liées anatomiquement à la contraction de muscles faciaux spécifiques (voir **Tableau 1**). Ce système de codage définit 46 AUs dont la combinaison permet de décrire de nombreuses expressions faciales. Des paramètres d'intensité peuvent également spécifier le niveau de contraction musculaire. La dynamique temporelle d'une expression est décrite par l'*onset*, l'*apex* et l'*offset* qui correspondent respectivement au début, à l'apogée et à la fin de l'apparition de l'expression. Typiquement, une expression faciale telle que la joie, implique généralement la présence de l'AU6 (joues remontées/yeux plissés), l'AU12 (lèvres étirées) et l'AU25 (bouche ouverte), tandis que l'expression de colère implique l'AU4 (rapprochement des sourcils), l'AU5 (remontée paupière-sourcils), l'AU7 (tension de la paupière), l'AU23 (tension des lèvres) et l'AU24 (pincement des lèvres).

⁹ Par exemple, lorsque le muscle *frontalis (pars medialis)* se contracte, on observe une remontée visible de la partie interne des sourcils, qui est alors dénommée AU1 (voir Tableau 1)
















Région	AU	Photo AU	Nom AU	Joie	Peur	Colère	Triste	Dégout	
Haut (yeux)	1		Remontée de la partie interne des sourcils		x		x		
	2		Remontée de la partie externe des sourcils		x				
	4		Abaissement et rapprochement des sourcils		x	x	x		
	5		Ouverture entre la paupière supérieure et les sourcils		x	x			
	6		Remontée des joues – yeux plissés	x					
	7		Tension de la paupière			x			
	9		Plissement de la peau du nez vers le haut					x	
	10		Remontée de la partie supérieure de la lèvre					x	
	Bas (bouche)	12		Étirement du coin des lèvres	x				
		15		Abaissement des coins externes des lèvres				x	
17			Élévation du menton				x	x	
20			Étirement externe des lèvres		x				
23			Tension refermant les lèvres			x			
24			Pincement des lèvres			x			
25			Ouverture de la bouche et séparation des lèvres	x	x				

Tableau 1. Présentation de 17 parmi les 46 *Action Units* (AU) les plus fréquemment impliquées dans les émotions de bases : 7 se situent dans la région du haut du visage (région des yeux) et 7 dans la région du bas du visage (région de la bouche). Ces 17 AUs sont habituellement retrouvées dans la littérature sur les expressions faciales et les bases de données de visages émotionnels (p. ex., Flykt, Lundqvist, Flykt, & Öhman, 1998; Langner et al., 2010; Wegrzyn, Vogt, Kirecliglu, Schneider, & Kissler, 2017). Photos de visages tirées de <https://imotions.com>.

2.4. Comment les émotions sont-elles représentées dans le cerveau ?

Dans la mesure où les humains peuvent rapidement et sans effort détecter et catégoriser les expressions faciales d'autrui, la question clé a été de savoir si les attributs faciaux liés à l'**identité** et aux **expressions émotionnelles** étaient traités ensemble ou séparément dans des régions cérébrales spécialisées, puis de savoir comment les émotions sont représentées dans le cerveau.

A partir des années 2000, deux grands modèles neurocognitifs influents, issus de travaux en psychologie cognitive (Bruce & Young, 1986b) et des études en neuroimagerie fonctionnelle, ont proposé que le traitement des visages repose sur un réseau hiérarchique distribué composé d'un 'système central' (*core system*) et d'un 'système étendu' (*extended system*), constitué de différents modules fonctionnels impliqués dans le traitement des différents types d'informations relatives au visage (Haxby, Hoffman, & Gobbini, 2000; Adolphs, 2002). Dans le système central, localisé au niveau occipito-temporal, les attributs faciaux invariants, liés à l'identité, sont analysés dans les régions comprenant la zone occipitale des visages (OFA) et l'aire fusiforme des visages (FFA) au niveau du gyrus fusiforme (**pour une revue sur les différents systèmes cérébraux impliqués dans la reconnaissance des visages et des émotions, voir Chaby & Narme, 2009**), tandis que des attributs variables comme les expressions faciales sont traités au niveau du sillon temporal supérieur (STS). Un système étendu impliquant d'autres régions clés, comme l'amygdale, l'insula et les régions préfrontales, agirait de concert avec le système central dans la reconnaissance des expressions faciales (voir Haxby & Gobbini,

2012). D'autres études en IRMf ont par la suite confirmé la sensibilité du gyrus fusiforme (FG) et de la FFA pour l'identité (Winston, Henson, Fine-Goulden, & Dolan, 2004; Yovel & Kanwisher, 2005) ainsi que celle du STS pour les expressions faciales et la direction du regard (Andrews & Ewbank, 2004; Harris, Young, & Andrews, 2012; Said, Moore, Norman, Haxby, & Todorov, 2010). Cette relative indépendance des traitements de l'identité et de l'expression a cependant été remise en cause, lorsqu'il a été montré que l'activité de la FFA était plus importante en réponse aux visages expressifs qu'aux visages non-expressifs (e.g., Vuilleumier, Armony, Driver, & Dolan, 2001; Vuilleumier & Pourtois, 2007) et que le STS était sensible aux répétitions de l'identité faciale (e.g., Fox, Moon, Iaria, & Barton, 2009). Des études plus récentes suggèrent une interaction fonctionnelle entre ces différentes régions (Fisher, Towler, & Eimer, 2016; Wegrzyn et al., 2015).

Par ailleurs, au moins trois types de représentations différentes des émotions dans le cerveau ont été décrites, ce qui montre l'importance et la complexité des traitements émotionnels en lien avec le comportement humain.

Selon une approche localisationniste, en lien avec l'approche discrète et catégorielle des émotions, il a été suggéré à partir de plusieurs méta-analyses d'études en IRMf que les substrats neuronaux impliqués dans le traitement d'expressions faciales différentes étaient en partie dissociables (Hamann, 2012; Phan, Wager, Taylor, & Liberzon, 2002; Vytal & Hamann, 2010). Ainsi, dans une méta-analyse (Hamann, 2012), « la joie » a été associée au gyrus temporal supérieur (STG) et au cortex cingulaire antérieur (ACC) ; « la tristesse » au gyrus frontal médian gauche (medFG) et au noyau caudé gauche ; « la colère » au gyrus frontal inférieur gauche (leftIFG) et au gyrus parahippocampique droit ; « la peur » à l'amygdale bilatérale, au cervelet droit et à l'insula droite, enfin « le dégoût » à l'insula bilatérale. Il semble néanmoins qu'il n'existe pas de lien exclusif entre une structure cérébrale et une émotion de base, les structures impliquées variant d'une étude à l'autre. Pour résumer, les études en neuroimagerie n'ont pu identifier des profils spécifiques récurrents d'activités neuronales pour chaque grande catégorie d'expressions faciales.

Selon une approche constructiviste, dérivant des modèles dimensionnels des émotions, les émotions seraient 'construites' à partir de processus psychologiques indépendants (e.g., attention, langage, contexte, expérience passée). Dans ce cadre, des méta-analyses (Lindquist, Wager, Kober, Bliss-Moreau, & Barrett, 2012; Wager et al., 2015) ont révélé que les catégories d'émotions ne seraient pas contenues dans une région ou un système en particulier, mais qu'elles seraient représentées par de multiples patterns spatio-temporels, sous forme de configurations dans plusieurs réseaux cérébraux, parfois partagés entre différentes émotions (Figure 11) ou modalités émotionnelles (visuelles, auditives) et qu'elles seraient plutôt codées en terme de valence et de niveau d'activation.



Figure 11. Carte d'intensité pour les 5 émotions de base issue d'une méta-analyse de 148 études. D'après Wager et al., 2015.

Enfin, une approche computationnelle¹⁰ (**Figure 12**) –utilisant des méthodes d'apprentissage automatique à partir de données de neuroimagerie (IRMf) couplées à des données comportementales– a suggéré que si les contractions-relâchements des muscles faciaux pouvaient être considérés comme les briques élémentaires permettant d'exprimer « directement » des émotions comme d'autres signaux de la communication non-verbale, au niveau cérébral, le sillon temporal supérieur postérieur (pSTS), aurait pour rôle de résoudre le « problème inverse », c'est à dire de détecter simplement les actions faciales –en additionnant des séries de mouvements musculaires clés du visage– pour interpréter visuellement les émotions (Du, Tao, & Martinez, 2014; A. M. Martinez, 2017; Srinivasan, Golomb, & Martinez, 2016).

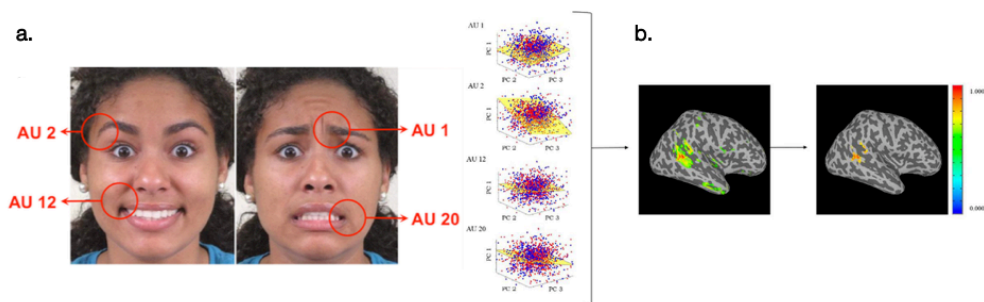


Figure 12. a. Les participants voyaient des blocs d'images avec des unités d'actions (AUs) présentes ou non présentes ; b. Observation de patterns différents dans le pSTS permettant de détecter la présence ou absence de chaque AU dans les images.

Cette approche computationnelle est intéressante en ce qu'elle suggère que le cerveau agirait finalement plus comme un détecteur de contractions musculaires faciales – essentielles pour interpréter le comportement du visage – que comme un classifieur d'une émotion en particulier.

2.5. Quels mécanismes perceptifs en jeu ?

Les recherches sur la perception des émotions utilisent le plus souvent le même paradigme de base : les participants sont confrontés à des stimuli émotionnels présentant différentes expressions et il leur est demandé d'identifier l'émotion en indiquant le label auquel chaque expression est associée. Dans ce type de paradigme –à choix forcé– les émotions sont traduites par une liste de descripteurs catégoriels familiers (joie, peur, etc.) parmi lesquels les participants doivent choisir l'étiquette la plus appropriée. Cette méthodologie est un standard, non seulement dans les études sur la perception des expressions émotionnelles chez l'adulte en bonne santé, mais aussi dans les recherches développementales ou cliniques que nous aborderons ultérieurement.

Dans ce contexte expérimental, il a été montré que, chez le jeune adulte, la reconnaissance des expressions faciales est rapide et requiert un minimum de ressources cognitives (Tracy & Robins, 2008). Cependant, le taux de reconnaissance varie en fonction

¹⁰ L'approche computationnelle repose sur l'utilisation d'algorithmes et de simulation numériques pour modéliser les principes qui font fonctionner notre cerveau.

de l'émotion : la joie (seule expression positive) est généralement identifiée rapidement et presque à la perfection, suivie par la colère, tandis que la peur, la tristesse et le dégoût, vraisemblablement moins prototypiques peuvent être plus difficiles à décoder (Gosselin & Kirouac, 1995; Kirouac & Doré, 1983; Matsumoto & Ekman, 2004). Afin de rendre compte des mécanismes perceptifs qui régissent l'identification des expressions faciales émotionnelles, les recherches se sont d'abord focalisées sur la valeur informative des différents traits ou régions du visage pour l'expression et le décodage des différentes catégories d'émotions. D'autres travaux ont suggéré que le traitement de l'information lors de la reconnaissance émotionnelle impliquerait également un traitement configural du visage expressif, lié au traitement des relations spatiales entre les traits faciaux.

2.5.1. Contribution respective des traits faciaux ?

De nombreux travaux ont été consacrés à la contribution respective des traits faciaux responsables de l'expression et du décodage des expressions faciales, notamment des parties supérieure ou inférieure du visage et de leurs traits mouvants que sont les yeux et la bouche. Si plusieurs études suggèrent que les yeux sont importants car ils donnent accès aux pensées ainsi qu'à l'état mental et émotionnel d'autrui (voir, Emery, 2000), d'autres travaux suggèrent que la bouche serait la plus informative au niveau du diagnostic émotionnel (Calvo & Nummenmaa, 2008).

Les premiers travaux, s'appuyant sur la présentation de parties isolées ou de l'ensemble de visages émotionnels (schématiques), sont contradictoires. Certains avancent que la région des yeux serait plus importante que la bouche pour reconnaître l'ensemble des expressions faciales (Buzby, 1924; Dunlap, 1927), voire que la région des yeux serait suffisamment informative pour la reconnaissance des expressions faciales (Guilford & Wilke, 1930). D'autres indiquent que la reconnaissance des expressions faciales serait meilleure lorsque l'ensemble du visage est présenté (Coleman, 1949). Enfin, certains apportent une position plus nuancée suggérant qu'aucune des deux moitiés du visage n'est dominante et que le visage entier ne donne pas toujours lieu aux meilleures reconnaissances (Hanawalt, 1944). Il est surtout apparu, dans des études utilisant des photographies de visage entier ou de moitié de visage que les différences variaient principalement en fonction de l'émotion exprimée : la joie et le dégoût seraient facilement identifiables à partir de la moitié inférieure du visage tandis que la colère, la peur et la tristesse seraient plutôt identifiables à partir de la partie supérieure du visage (Beaudry, Roy-Charland, Perron, Cormier, & Tapp, 2014; Calder, Young, Keane, & Dean, 2000). D'autres méthodes, reposant sur le paradigme des « bulles » (Gosselin & Schyns, 2001; Smith, Cottrell, Gosselin, & Schyns, 2005) par occlusions partielles de certaines parties du visage expressif (i.e., en appliquant des filtres ou masques aléatoires ne permettant de voir que des parties très limitées du visage) suggèrent que certaines régions du visage sont utilisées pour catégoriser de façon optimale les expressions faciales de base (**Figure 13**) : la région de la bouche pour la joie et la surprise, la région des yeux pour la peur et la colère, tandis que les plis nasogéniens ou frontaux constitueraient les régions les plus pertinentes pour reconnaître respectivement le dégoût ou la tristesse. Il ressort de ces différentes études que la région de la bouche semble constituer un trait distinctif pour l'expression de

joie, celle des yeux pouvant être impliquée dans différentes émotions comme la tristesse, la peur ou la colère serait moins discriminante (Beaudry et al., 2014; Eisenbarth & Alpers, 2011). Par ailleurs, dans environ 10% des essais on observe des confusions entre l'expression de peur et la surprise, l'expression neutre et la colère (Palermo & Coltheart, 2004), ou la colère et le dégoût (Jack et al., 2009), ce qui s'expliquerait par le fait que ces expressions peuvent être décrites par un ensemble d'action units (AUs) qui se chevauchent en partie (voir **Tableau 1**).

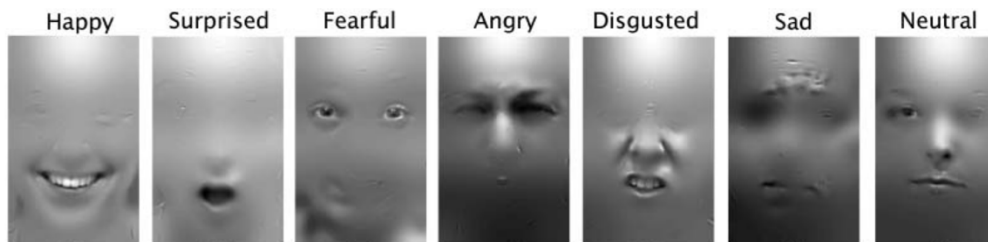


Figure 13. Régions diagnostiques, révélées par le paradigme des bulles, qui semblent clés pour catégoriser correctement l'expression du visage pour chaque émotion de base. D'après Smith et al., 2005.

2.5.2. Contribution du traitement configural ?

L'identification d'une émotion sur un visage pourrait ne pas reposer uniquement sur le traitement de traits faciaux spécifiques, mais également, au moins en partie, comme pour le traitement de l'identité, sur un traitement de type configural, lié à la prise en compte des relations spatiales entre les traits faciaux. Plusieurs études se sont attachées au rôle de la configuration faciale qui semble jouer, chez l'adulte, une fonction non négligeable dans la reconnaissance des expressions faciales.

En présentant des visages expressifs dans leur orientation usuelle ou à l'envers (ce qui limite le traitement complet des relations entre les traits, McKone et al., 2013), il a été montré que le décodage des expressions faciales est généralement perturbé par l'inversion, ce qui suggère que leur traitement pourrait au moins en partie reposer sur le traitement des informations configurales (Ambadar, Schooler, & Cohn, 2005; Derntl, Seidel, Kainz, & Carbon, 2009; McKelvie, 1995; Prkachin, 2003). De même, chez l'adulte en bonne santé, la présentation de visages expressifs composites¹¹ (par exemple, deux expressions différentes sur chaque moitié de visage, voir **Figure 14**), en générant une nouvelle configuration faciale émotionnelle, perturbe et ralentit le traitement des deux expressions sur chacune des parties du visage, tandis que le non-alignement des deux moitiés permet de rompre la nouvelle configuration faciale et rend opérationnel le décodage des deux expressions différentes (Calder et al., 2000; Chiller-Glaus, Schwaninger, Hofer, Kleiner, & Knappmeyer, 2011; Palermo et al., 2011; Prazak & Burgund, 2014; Tanaka, Kaiser, Butler, & Le Grand, 2012; Tobin, Favelle, & Palermo, 2016).

¹¹ Visages constitués de la combinaison de deux moitiés de visage d'une même personne exprimant deux émotions différentes, de sorte qu'alignées, les deux moitiés créent une nouvelle expression dite 'composite' (Calder et al., 2000)

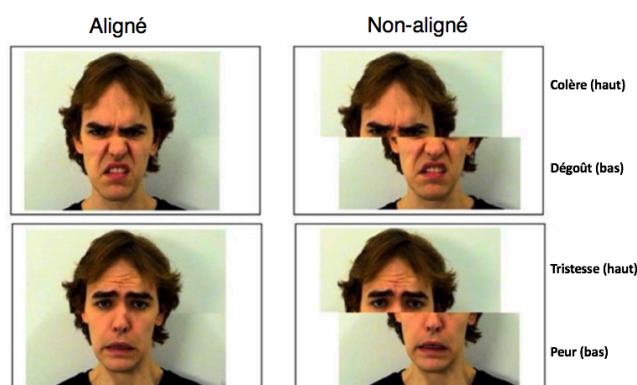


Figure 14. Exemples de visages composites dont les deux moitiés expriment des émotions différentes (colère/dégoût et tristesse/peur) qui peuvent être alignées (gauche) ou non-alignées (droite). La tâche des participants est de reconnaître l'émotion à partir d'une moitié du visage (par exemple, le haut) tout en ignorant l'autre (d'après [Tobin et al., 2016](#)).

Ainsi, bien que certaines expressions telles que la joie et la peur puissent être traitées à partir de caractéristiques locales uniquement – la forme de la bouche pour la joie et la forme des yeux pour la peur –, la reconnaissance des expressions faciales reposerait en partie sur un double codage à partir des caractéristiques locales ainsi que de la configuration globale ([Beaudry et al., 2014](#); [Bombari et al., 2013](#); [Calvo, Nummenmaa, & Avero, 2010](#); [Elsherif, Saban, & Rotshtein, 2017](#)).

Le fait que l'intégration d'informations complexes soit nécessaire à la catégorisation correcte des expressions émotionnelles devient évident lorsque l'on compare les performances d'individus sains à celles de patients souffrant de troubles neurologiques ou psychiatriques avec des troubles des interactions sociales au cœur de la symptomatologie. **Nous avons abordé cette question lors du Master 2 que Pauline Narme a effectué sous ma direction**, en collaboration avec Anne-Marie Bonnet dans le service de neurologie de Bruno Dubois à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, **en analysant le rôle de la configuration faciale dans la reconnaissance des expressions faciales chez des patients atteints de la maladie de Parkinson et des adultes âgés en bonne santé.**

La maladie de Parkinson (MP) est une maladie neurodégénérative caractérisée par une atteinte de la voie dopaminergique nigro-striatale. Bien que les symptômes moteurs dominent le tableau clinique, on observe également des troubles non-moteurs d'ordre notamment comportemental et affectif tels que dépression, anxiété, apathie et autres troubles des rapports sociaux (pour une description plus détaillée des signes cliniques non-moteurs (voir, [Chaby & Narme, 2009](#) ; [Bonnet, Czerniecki, & Hergueta, 2013](#)).

Alors que l'aptitude à reconnaître l'identité faciale semble préservée dans la MP, les études comportementales et d'imagerie fonctionnelle concernant la reconnaissance des émotions ont abouti à des résultats plutôt contradictoires (pour revue, [Gray & Tickle-Degnen, 2010](#)). Certaines ont décrit des troubles émotionnels globaux ([Ricciardi et al., 2017](#)), d'autres ont rapporté une atteinte précoce de la reconnaissance d'émotions spécifiques notamment du dégoût ([Suzuki, et al., 2006](#); [Sedda, et al., 2017](#)) ou de la peur

(Sprengelmeyer et al., 2003; De Risi et al., 2018). Enfin quelques rares auteurs n'ont signalé aucun déficit de reconnaissance des émotions (Adolphs, Schul, & Tranel, 1998; Wabnegger et al., 2015). Ces différences pourraient résulter de disparités dans les tâches utilisées, le type d'émotion étudiée, ainsi que des variables cliniques comme le stade de la maladie, la médication dopaminergique (patient 'on' vs. 'off' dopa ; Sprengelmeyer et al., 2003) ou les comorbidités. Celles-ci pourraient concerner la présence ou non de troubles des fonctions exécutives (McKinlay, et al., 2010; Roussel et al., 2016) ou des fonctions perceptives, comme des troubles visuospatiaux (Flowers & Robertson, 1995; Crucian et al., 2010). Dans le contexte de la vie quotidienne, plusieurs études par auto-questionnaire ont par ailleurs rapporté que de nombreux patients MP signalaient au moins un symptôme visuel, comme une mauvaise appréciation des objets et des distances ou des difficultés de navigation dans leur environnement se traduisant par exemple par le fait de se heurter aux portes (Davidsdottir, Cronin-Golomb, & Lee, 2005; Lee & Harris, 1999).

Nous avons mené une recherche dont l'originalité tient au fait que nous avons questionné à la fois le traitement des émotions faciales et l'intégrité du traitement perceptif dans la maladie de Parkinson. Nous avons posé l'hypothèse que le déficit de reconnaissance des expressions faciales chez les patients MP pourrait être lié à un déficit des capacités de traitement configural. Pour explorer cette hypothèse, trois tâches ont été proposées : (i) une tâche de reconnaissance d'émotions faciales à l'endroit ; (ii) une tâche de reconnaissance d'émotions faciales à l'envers (rotation à 180°) pour évaluer l'effet d'inversion du visage sur la reconnaissance des expressions faciales ; (iii) une tâche 'des jumeaux' manipulant directement la configuration faciale, issue de Chaby et al., 2011 (section 2.2). Nous avons inclus dans cette étude, dix patients atteints d'une MP idiopathique, âgés de 49 à 76 ans, suivis à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, ainsi que 10 participants contrôle. Les patients MP étaient tous entre le stade 1 à 3 (score de Hoehn and Yahr) de la maladie, sous médication dopaminergique, et sans atteinte cognitive. Les caractéristiques démographiques et l'évaluation neuropsychologique sont détaillées dans Narme, Bonnet, Dubois, & Chaby (2011). L'évaluation comprenait des épreuves visuospatiales (jugement d'orientation de lignes de Benton et subtest des cubes du VOSP).

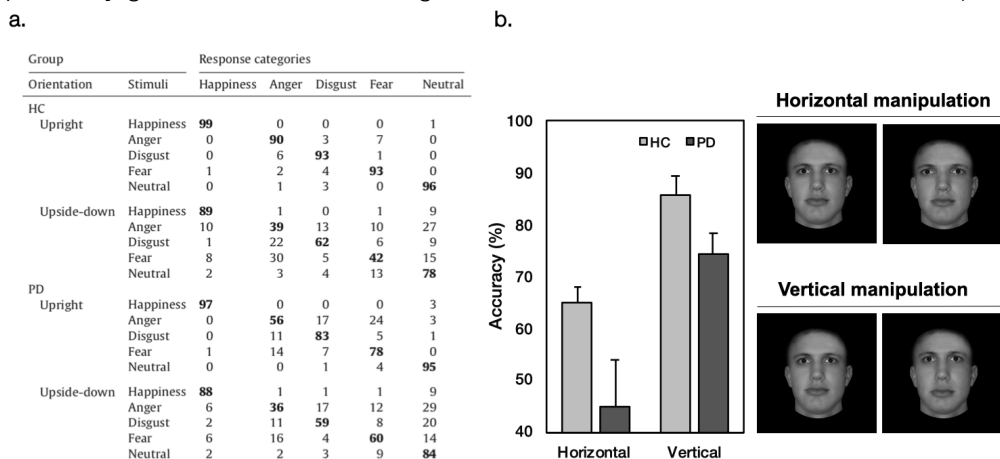


Figure 15. a. Table de contingence avec les pourcentages de réponse correctes et d'erreurs commises pour chaque catégorie d'émotion, à l'endroit (*upright*) et à l'envers (*upside down*), chez les participants contrôle (HC) et les patients atteints d'une MP ; b. Pourcentage de bonnes réponses des participants à la tâche des jumeaux comprenant des modifications de la configuration faciale selon l'axe horizontal et vertical.

De façon concordante avec des études précédentes (e.g, [Martinez-Corral et al., 2010](#)), nous avons montré que les patients MP présentaient des difficultés spécifiques pour identifier la colère et la peur, et à un moindre degré le dégoût (**Figure 15a**). Les résultats obtenus avec les tâches configurales ont permis de suggérer l'existence d'une altération du traitement configural du visage chez ces patients. L'effet d'inversion était aboli ou d'ampleur réduite, en particulier pour les émotions à propos desquelles les patients présentaient des déficits de reconnaissance (**Figure 15a**). De plus, contrairement au groupe contrôle, les patients MP présentaient des difficultés à discriminer des modifications configurales sur les visages (tâche des jumeaux, **Figure 15b**), à la fois au niveau de l'axe horizontal et de l'axe vertical (distance yeux-bouche). A noter que les patients ne présentaient pas de déficits visuo-spatiaux. **Nous en concluons que les difficultés à traiter les modifications de distances entre les traits faciaux (i.e., altération du traitement configural), notamment sur un axe vertical yeux-bouche, pourrait être un élément central dans les difficultés des patients MP à discriminer finement les aspects changeants du visage, et donc les expressions faciales, dans la vie quotidienne.** Ainsi, cette étude de certains déficits chez ces patients MP témoigne de ce que le traitement configural participe à la reconnaissance des expressions faciales.

- [Narme, P., Bonnet, A.M., Dubois, B., Chaby, L. \(2011\). Understanding facial emotion perception in Parkinson's disease: the role of configural processing. *Neuropsychologia*, 49\(12\), 3295-3302.](#)

2.5.3. Comment regarde-t-on un visage expressif ?

Des technologies non-invasives telles que l'oculométrie, reposant sur l'enregistrement des mouvements des yeux avec une haute résolution temporelle, généralement entre 50 et 200 Hz ([Holmqvist, Nyström, & Mulvey, 2012](#); [Kennedy, 2016](#)), ont aidé à mieux comprendre le rôle des aspects perceptifs dans le traitement des expressions faciales. Elles permettent notamment d'appréhender la complexité du comportement oculaire des individus en enregistrant précisément les fixations, qui correspondent au maintien du regard pendant au moins 100 ms sur des zones d'intérêt (AOI)¹² ou les saccades, mouvements oculaires entre deux fixations ([Salvucci & Goldberg, 2000](#)), ouvrant ainsi une fenêtre incomparable sur les processus cognitifs sous-jacents ([Just & Carpenter, 1976](#)). L'oculométrie, qui apporte des informations quantitatives sur l'efficacité de la prise d'information, se caractérise par une composante spatiale (p. ex., localisation des fixations), une composante temporelle (p. ex., temps de fixation brut, pourcentage de temps passé dans une AOI) et une composante stratégique (p. ex., nombre de fixations, lieu de la première fixation, parcours oculaire, etc.). Ces différents niveaux permettent d'objectiver les éventuelles difficultés de traitement du stimulus et/ou de la tâche à accomplir.

La façon dont les individus regardent les visages a suscité un grand intérêt scientifique depuis de nombreuses années ([Yarbus, 1968](#)). Chez les occidentaux, l'exploration visuelle de visages non-expressifs dans des tâches de reconnaissance de l'identité est

¹² Dans la plupart des études, les régions d'intérêt sont définies sur le matériel expérimental, et sont utilisées afin de quantifier le nombre ou la durée des fixations dans chaque zone ou aire d'intérêt (*area of interest*, AOI).

généralement stéréotypée avec un profil d'exploration triangulaire, environ 70% des fixations étant orientées vers les yeux, le reste vers le nez et la bouche (Henderson, et al., 2005; Mehoudar, Arizpe, Baker, & Yovel, 2014; Walker-Smith, Gale, & Findlay, 2013). Pour les visages expressifs, la reconnaissance de la joie, qui est généralement la mieux et la plus vite identifiée, nécessite un temps d'exploration court avec peu de fixations, tandis que la reconnaissance de la peur, plus difficile, nécessite des temps d'exploration plus longs et le plus grand nombre de fixations (Guo, 2012).

La région des yeux serait fixée plus longtemps que les autres régions du visage, indépendamment de la catégorie émotionnelle (Spezio, Adolphs, Hurley, & Piven, 2007). Si les yeux sont fréquemment la zone de première fixation sur le visage expressif (Eisenbarth & Alpers, 2011), on ne sait pas encore combien de fixations sont nécessaires pour décider de l'émotion exprimée par un visage, alors qu'il a été que décider si un visage est familier ou non peut être réalisé en seulement deux fixations (Hsiao & Cottrell, 2008). Plusieurs études, en comparant les fixations dans deux régions d'intérêt (AOI) – les yeux et la bouche – pour différentes catégories d'émotions, ont montré que les fixations étaient en majorité dirigées vers les yeux pour reconnaître la peur, la colère et la tristesse (Eisenbarth & Alpers, 2011; Scheller, Büchel, & Gamer, 2012) et vers la bouche pour reconnaître la joie et le dégoût (Beaudry et al., 2014; Schurgin et al., 2014). D'autres études (Figure 16), en analysant l'emplacement des premières fixations et la proportion du temps passé sur trois régions d'intérêt (yeux, nez, bouche) ont mis en évidence l'importance de la région des yeux pour la détection de la colère et la tristesse, et celle de la région de la bouche pour la détection de la joie et de la peur (Bombari et al., 2013). La région du nez n'est généralement pas considérée comme un trait expressif diagnostique et son rôle est rarement discuté (Buchan, Paré, & Munhall, 2007).



Figure 16. Cartes de chaleur représentant la distribution des fixations de l'ensemble des participants pour des visages exprimant la joie, tristesse, colère et peur (d'après Bombari et al., 2013). La barre du bas indique les régions les plus fixées (en rouge foncé) jusqu'aux régions les moins fixées (en bleu foncé).

En outre, il semble que les patterns de fixation sur des régions dites diagnostiques (yeux ou bouche) pourraient dépendre de l'intensité de l'expression, voire de la tâche. En effet, il a été montré que c'est surtout la reconnaissance d'expressions subtiles qui serait facilitée par la fixation des yeux (avec une moindre contribution de la bouche), tandis que la reconnaissance d'expressions à leur apex dépendrait moins de la fixation d'une région en particulier (Vaidya, Jin, & Fellows, 2014). Par ailleurs, lorsque la tâche requiert de rechercher une émotion en particulier sur le visage plutôt qu'une tâche classique de catégorisation d'émotions à choix forcé, on n'observe pas de patterns de fixation spécifiques de la région du visage (Schurgin et al., 2014).

2.6. Point sur le développement *life-span*

Les compétences de traitement des expressions faciales sont centrales tout au long de la vie (Somerville, Fani, & McClure-Tone, 2011). La capacité de décoder des expressions faciales s'acquiert au cours de l'enfance, s'affine progressivement jusqu'à la fin de l'adolescence et serait un bon prédicteur de l'avenir social et des compétences scolaires et relationnelles de l'enfant (Izard et al., 2001). Chez l'adulte, l'aptitude à identifier correctement les expressions émotionnelles joue également un rôle central –tout au long de la vie– sur les relations sociales et la qualité de vie (Carton, Kessler, & Pape, 1999; Fischer, Manstead, & others, 2008; English & Carstensen, 2014).

2.6.1. Une émergence précoce dans l'enfance

Dès la naissance, lors de leurs premières interactions, les nourrissons sont attirés par les visages expressifs s'ils sont souriants (Farroni, Menon, Rigato, & Johnson, 2007) et manifestent de la détresse ou détournent le regard si le visage devient soudainement inexpressif (*still face*) (Tronick, 1982). La première année correspond à une période d'amélioration de la vue, d'intérêt pour les visages dans un contexte d'interaction sociale, et de développement des conduites de référénciation sociale comme celle qui consiste à observer l'expression du visage de l'adulte avant de se lancer ou non dans une activité (Feinman, Roberts, Hsieh, Sawyer, & Swanson, 1992). Ainsi, les premières capacités de discrimination visuelle des expressions faciales de base apparaissent vers l'âge de 7 mois (Kotsoni, De Haan, & Johnson, 2001; Kobiella, Grossmann, Reid, & Striano, 2008; pour revue, voir Bayet, Pascalis, & Gentaz, 2014) et jouent un rôle clé dans le développement socio-émotionnel précoce. Toutefois, c'est seulement à partir de l'âge de 2-3 ans, avec le développement des compétences langagières, que l'enfant devient capable de catégoriser des expressions faciales, d'abord sur la base de leur valence (par exemple, positive/négative), puis en termes de catégories discrètes (Gosselin, 2005; Widen & Russell, 2008).

Cette aptitude à reconnaître les expressions faciales se développe de façon graduelle au cours de l'enfance, mais la trajectoire développementale varie en fonction des expressions : l'identification de la joie est la plus facile et la première à apparaître vers l'âge de 3-4 ans, suivie de la tristesse, la colère et la peur vers l'âge de 5-6 ans (Gao & Maurer, 2010). L'identification du dégoût ne semble acquise que plus tardivement, vers l'âge de 6-10 ans (Widen, 2013; Widen & Russell, 2013). Les erreurs les plus courantes commises par les enfants d'âge scolaire consistent à confondre les expressions de colère et de dégoût (Widen & Russell, 2010, 2013) ou de peur et de tristesse (Gao & Maurer, 2010). Ces erreurs diminuent avec l'âge, mais sont aussi commises à l'âge adulte (Jack et al., 2009; Kirouac & Doré, 1983). Enfin, très peu d'études ont exploré la capacité des enfants à identifier l'expression neutre, tâche qui semble difficile avant l'âge de 5-6 ans (Gross & Ballif, 1991; Rodger et al., 2015).

2.6.2. Un affinage à l'adolescence

L'adolescence est une phase de changements significatifs sur le plan socio-émotionnel, non seulement d'un point de vue individuel mais aussi sur le plan relationnel avec les pairs, la famille, l'autorité. Plusieurs études ont montré que les capacités d'identification des expressions faciales dans des tâches de catégorisation à choix forcé continuaient à s'améliorer au cours de l'adolescence, tandis qu'apparier deux visages qui expriment la même émotion est généralement déjà acquis vers l'âge de 10 ans (Bruce et al., 2000).

Il existe un consensus sur le fait que la capacité d'identifier la joie reste stable au cours de l'adolescence, puisqu'elle atteint déjà dans la petite enfance un niveau similaire à celui qu'on observe chez les adultes (Herba & Phillips, 2004; Rodger et al., 2015). Au contraire, la capacité à identifier la tristesse, la colère, le dégoût et l'expression neutre s'améliore pendant l'adolescence, jusque vers 14-15 ans (Kolb, Wilson, & Taylor, 1992; Thomas, De Bellis, Graham, & LaBar, 2007) ; au-delà de cet âge les performances se rapprochent de celles des adultes (Rodger et al., 2015; Rodger, Lao, & Caldara, 2018). Les résultats concernant l'identification de la peur sont plus controversés, mais globalement il s'agit d'une expression encore difficile à identifier à l'adolescence et ce, jusqu'à l'âge adulte (Lenti, Lenti-Boero, & Giacobbe, 1999; Rodger et al., 2015).

Le développement lent de la reconnaissance des expressions faciales, avec une amélioration des performances d'identification entre 8 et 14 ans, a été observé aussi bien avec des photographies de visages statiques (Griffiths, Penton-Voak, Jarrold, & Munafò, 2015) qu'avec des séquences vidéos de visages dynamiques (Montirosso et al., 2010). Cet affinage pendant l'adolescence est généralement attribué à la maturation de l'amygdale et de ses connexions avec le cortex préfrontal (Thomas et al., 2001; Lobaugh, Gibson, & Taylor, 2006) ainsi qu'à celle du gyrus fusiforme (Vuilleumier, Armony, Driver, & Dolan, 2003). Des variations de la réponse neuronale aux différentes expressions faciales au cours du développement (entre l'enfance et l'âge adulte) sont également visibles en EEG ce qui suggère une maturation cérébrale lente (Batty & Taylor, 2006). Cependant, bien que les adolescents soient capables, entre 14 et 18 ans, d'identifier et d'étiqueter correctement les différentes expressions faciales de base présentées à leur maximum d'intensité, quelques travaux ont indiqué qu'ils ne sont pas aussi sensibles que les adultes aux nuances de l'expression faciale véhiculées par des mélanges d'émotions ou à des changements subtils de l'intensité de l'émotion (Thomas et al., 2007; Lawrence, Campbell, & Skuse, 2015).

Ainsi, la trajectoire développementale, lente, du traitement des expressions faciales jouerait un rôle clé dans les relations interpersonnelles des adolescents, période marquée par des phases d'opposition à l'autorité et des difficultés relationnelles avec les parents (Flannery, Montemayor, Eberly, & Torquati, 1993).

2.6.3. Pertes et gains au cours du vieillissement

Viellir affecte-t-il ou préserve-t-il cette capacité de décoder les expressions faciales ? Le groupe vieillissant est souvent associé à des stéréotypes négatifs, l'image des « séniors » étant reliée à une diminution de l'intégrité physiologique et cérébrale (santé fragile, troubles cognitifs, etc.) ainsi qu'à la réduction du nombre de contacts sociaux, aux deuils, conduisant à l'isolement et la solitude (Wenger, Davies, Shahtahmasebi, & Scott, 1996; Victor, Scambler, Bond, & Bowling, 2000). Ces désagréments pourraient constituer une forme de « **déafférentation socio-émotionnelle** ». Pourtant, s'il y a un domaine où les personnes âgées semblent exceller c'est le « **bien-être émotionnel** ». Il a été demandé à des participants âgés de 18 à 95 ans d'évaluer sur plusieurs semaines leur état émotionnel au quotidien (à l'aide de carnets électroniques et de questionnaires d'auto-évaluation). Les résultats ont montré que les adultes âgés ont un meilleur contrôle de leurs émotions que les jeunes adultes, en évitant les situations qui les rendent tristes ou qui les stressent et en se focalisant sur les éléments positifs de leur vie (Carstensen et al., 2000; Mroczek, 2001). **C'est en partant de ce constat paradoxal** – conceptualisé par la suite par Mara Mather en terme de « *emotion paradox in the aging brain* » (Mather, 2012) – **que j'ai développé, à partir de 2009, des recherches sur le traitement des expressions faciales au cours du vieillissement**, notamment en encadrant le travail de recherche d'étudiants en master et en m'intéressant aux pertes et aux gains qui peuvent survenir tout au long de la vie.

A partir des années 2000, on constate un intérêt croissant pour l'étude des effets de l'âge sur l'aptitude à décoder les expressions faciales émotionnelles (voir aussi Moreno, Borod, Welkowitz, & Alpert, 1993). Les résultats de ces études sont généralement cohérents et montrent chez les adultes en bonne santé, des capacités préservées voire améliorées pour identifier la joie et le dégoût, tandis que les capacités d'identification des expressions faciales de peur, de colère et de tristesse diminuent (e.g., Calder et al., 2003; Isaacowitz et al., 2007; Mill, Allik, Realo, & Valk, 2009; pour revue, voir Ruffman, Henry, Livingstone, & Phillips, 2008; Chaby & Narme, 2009; Chaby, 2012; Gonçalves et al., 2018). Ces difficultés apparaîtraient de façon graduelle à partir de l'âge de 40 ans (Calder et al., 2003; Williams et al., 2009). Elles sont habituellement rapportées dans des tâches requérant de dénommer l'émotion exprimée à son *apex* sur des photographies de visages en noir et blanc (e.g., Isaacowitz et al., 2007) ainsi qu'en couleur (Ebner, He, Fichtenholtz, McCarthy, & Johnson, 2011; M. F. Zhao, Zimmer, Shen, Chen, & Fu, 2016). Les difficultés persistent avec des visages dynamiques (Grainger, Henry, Phillips, Vanman, & Allen, 2015) et dans des tâches plus simples d'appariement qui requièrent une simple réponse 'identique/différent' (MacPherson, Phillips, & Della Sala, 2006). Certaines études ont également montré, en manipulant l'intensité de l'émotion (p. ex., par des techniques de morphing), que les sujets âgés peuvent identifier des émotions très subtiles (p. ex., de faible intensité) de dégoût et de joie, mais ont des difficultés pour la tristesse, la colère et la peur même à des niveaux d'intensité élevés (Orgeta & Phillips, 2008). **Ces changements observés avec l'âge, dont les mécanismes sont encore mal connus, sont couramment discutés dans le contexte de trois approches théoriques : socio-émotionnelle, cognitive et neuroscientifique.**

Selon la théorie de la sélectivité socio-émotionnelle (Carstensen, Isaacowitz, & Charles, 1999), chez le jeune adulte dont le futur est ouvert, les motivations sont tournées vers la recherche de nouvelles expériences et l'expansion des réseaux sociaux ; avec l'âge et la conscience aiguë d'un futur plus limité, les adultes âgés ont tendance à orienter leurs choix vers une optimisation du bien-être (voir Sims, Hogan, & Carstensen, 2015). Ainsi, les adultes âgés auraient tendance à se concentrer sur les relations sociales enrichissantes sur le plan émotionnel avec leurs partenaires les plus proches (English & Carstensen, 2014), à éviter les situations négatives et à se focaliser sur les éléments positifs de leur vie affective (e.g., Barber, Opitz, Martins, Sakaki, & Mather, 2016; Carstensen et al., 2000) afin d'optimiser leur état affectif (Reed, Chan, & Mikels, 2014). Ce « biais de positivité » qui désigne un traitement en faveur des stimuli positifs au détriment des stimuli négatifs peut être utilisé pour expliquer, mais en partie seulement, les résultats comportementaux dans les tâches émotionnelles. De façon fascinante, les humains ne seraient pas les seuls à devenir socialement plus sélectifs en vieillissant. En 2016, l'équipe de Julia Fisher (Allemagne) a montré que des primates non-humains (des macaques de Barbarie¹³) deviennent, en vieillissant, plus sélectifs dans leurs interactions sociales, préférant l'interaction avec des singes qui leur sont proches qu'avec des singes moins familiers (Almeling, Hammerschmidt, Sennhenn-Reulen, Freund, & Fischer, 2016).

Selon l'approche cognitive, le déclin avec l'âge de plusieurs fonctions cognitives, telles que l'intelligence fluide (Sullivan & Ruffman, 2004) ou la vitesse de traitement (Orgeta & Phillips, 2008), pourrait interférer avec les capacités de reconnaissance des expressions faciales émotionnelles. Mais, cette hypothèse a été assez vite écartée au profit de celle d'une atteinte plus spécifique, car des études incluant des mesures d'intelligence fluide et cristallisée, de la vitesse de traitement ou encore du niveau d'éducation ont montré que ces variables étaient de faibles prédicteurs des difficultés observées (Homing, Cornwell, & Davis, 2012; Ruffman et al., 2008). Par ailleurs, l'existence de déficits d'identification de certaines émotions négatives (peur, colère, tristesse), et la préservation (joie) voire le gain pour d'autres expressions (dégoût), excluent une explication en termes de déclin cognitif généralisé ou d'une accentuation avec l'âge des difficultés observées chez le jeune adulte ; le dégoût étant l'émotion dont l'identification est la plus tardive au cours du développement est parfois source de confusion chez le jeune adulte (voir pour revue, Chaby, 2012; Chaby & Narme, 2009).

Selon une approche issue des neurosciences sociales, les modifications des capacités d'identification des expressions faciales avec l'âge émaneraient de changements post-perceptifs dans le 'cerveau social'. Le traitement des émotions implique de multiples régions interconnectées du cerveau (Lindquist et al., 2012; Wager et al., 2015) dont certaines sont connues pour être affectées par le vieillissement normal tandis que d'autres sont mieux préservées (St Jacques, Winecoff, & Cabeza, 2013; Ziaei & Fischer, 2016). Par exemple, l'atrophie du cortex préfrontal, notamment de la région orbito-frontale (Resnick, Lamar, & Driscoll, 2007), connue comme marqueur du vieillissement normal, a servi d'argument pour expliquer les difficultés rencontrées par les personnes âgées pour

¹³ Le macaque de Barbarie est le seul primate non-humain présent en Europe (i.e., région de Gibraltar).

identifier certaines émotions faciales, en particulier les visages exprimant la peur (Williams et al., 2006) ou la colère (Baena, Allen, Kaut, & Hall, 2010). En outre, bien que l'amygdale –sensible à la saillance émotionnelle d'un stimulus– ne décline pas aussi rapidement que les régions frontales, certaines études ont observé avec l'âge, une réduction linéaire de son volume (Allen, Bruss, Brown, & Damasio, 2005), ainsi qu'une augmentation de son activation lors du traitement des images positives par comparaison aux images négatives (Mather et al., 2004). Inversement, la préservation de régions sous-corticales comme les ganglions de la base (Grieve, Clark, Williams, Peduto, & Gordon, 2005; Williams et al., 2006) ou de l'insula (Keightley, Chiew, Winocur, & Grady, 2007) pourrait expliquer la stabilité de l'identification du dégoût avec l'âge. J'aimerais pointer ici que d'autres facteurs aussi variés que le patrimoine génétique (par exemple, polymorphisme de l'apolipoprotéine E ; Raz, Rodrigue, Kennedy, & Land, 2009), la santé cardio-vasculaire (Tadic, Cuspidi, & Hering, 2016), l'activité physique (Audiffren, André, & Albinet, 2011; Hayes, Alosco, & Forman, 2014), ainsi que la « réserve cognitive » liée au niveau d'étude ou d'éducation (Stern, 2009) et les interactions sociales (Rook, 2015) pourraient affecter le vieillissement du cerveau, tant positivement que négativement et être impliqués dans le vieillissement du cerveau social et ses variabilités interindividuelles. Ce dernier aspect sera mis en lumière plus tard dans certains de mes travaux et dans mes projets de recherches.

Nous avons émis l'hypothèse que des facteurs perceptifs pourraient expliquer les changements de reconnaissance et d'identification des émotions faciales observés chez les adultes âgés. Étonnamment, peu d'études avaient exploré cette possibilité (voir Orgeta & Phillips, 2008), bien que plusieurs travaux aient indiqué des changements avec l'âge dans la perception visuelle (Faubert, 2002) ou dans le traitement perceptif du visage (Habak et al., 2008; Konar, Bennett, & Sekuler, 2013). En outre, nous avons auparavant montré (Chaby et al. 2011) des difficultés spécifiques avec l'âge pour détecter des changements de la configuration faciale dans la région des yeux (voir également, Boutet & Meinhardt-Injac, 2018; Meinhardt-Injac, Boutet, Persike, Meinhardt, & Imhof, 2017; Slessor, Riby, & Finnerty, 2013). Une autre observation confortait notre hypothèse : les jeunes adultes jugent que les visages en colère avec un regard direct expriment des émotions plus intenses que les mêmes visages avec un regard dévié (Adams Jr & Kleck, 2005), tandis que les adultes âgés ne témoignent pas de telles différences (Slessor, Philips, & Bull, 2010). Dans ce contexte, j'ai cherché à comprendre si les différences d'âge dans les capacités d'identification des émotions pouvaient être liées à des différences dans la façon dont les adultes jeunes et plus âgés regardent les visages émotionnels.

Les indices visuels nécessaires à l'identification d'une expression faciale sont-ils les mêmes chez les adultes jeunes et âgés ? Avec Pascal Gilles et Jennifer Corjon¹⁴, nous avons présenté à des adultes jeunes (20-35 ans) et âgés (65-80 ans) des photographies de visages émotionnels (**Figure 17**). Les participants devaient identifier l'expression à partir du visage entier (*whole*), de la région supérieure (*top*) ou inférieure (*bottom*) du visage (**Figure 17**). Nous avons mis en évidence que lorsque l'émotion est

¹⁴ En Master de Psychologie à l'Université Paris Descartes

présentée sur un visage entier, les adultes âgés ont plus de difficultés que les jeunes pour identifier la colère, la peur, la tristesse et à un moindre degré l'expression neutre, ce n'est jamais le cas pour identifier la joie et le dégoût. Cela confirme des pertes et des préservations avec l'âge dans l'identification des expressions faciales (Ruffman et al., 2008 ; Chaby et al., 2009). Le résultat principal de cette étude est que, quel que soit l'âge, il apparaît plus facile d'identifier la peur et la colère à partir de la région des yeux et la joie et le dégoût à partir de la région de la bouche (Calder et al., 2003, Sullivan, Ruffman, & Hutton, 2007). Cependant, bien que la région des yeux soit habituellement considérée comme le trait saillant pour identifier la colère, la peur et la tristesse, la seule présentation isolée de cette région du visage ne donne pas un avantage aux adultes âgés qui n'améliorent pas leurs performances.

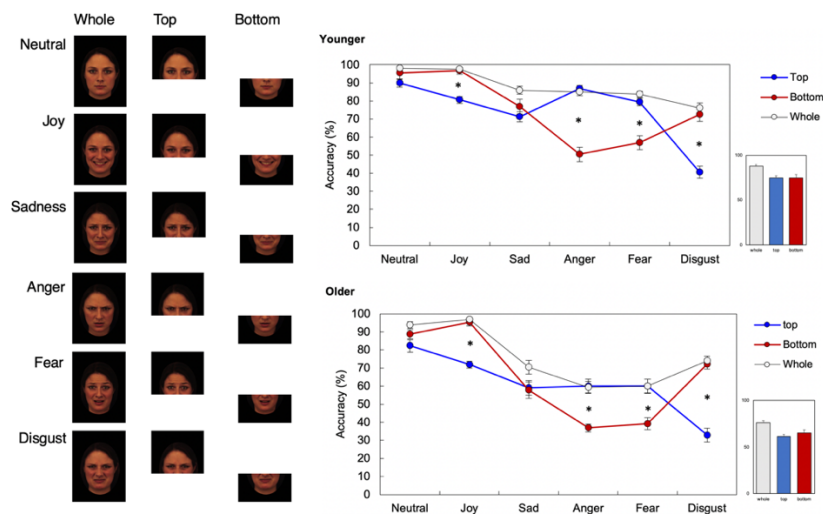


Figure 17. A gauche. Exemple d'un stimulus avec le visage entier (*whole face*), l'hemi-visage supérieur (*top*) ou inférieur (*bottom*), pour différentes expressions faciales (neutre, joie, tristesse, colère, peur, dégoût) ; A droite. Pourcentage de bonnes réponses des participants jeunes (*Younger*) et âgés (*Older*) dans chaque condition (*whole en gris-noir, top en bleu, bottom en rouge*) et pour chaque expression faciale. Voir Chaby et al., (2010).

- **Chaby, L., Gilles, P. & Corjon, J. (2010).** Importance des parties basses et hautes du visage dans la reconnaissance des expressions faciales au cours du vieillissement normal. XIème Colloque International sur le Vieillissement cognitif - JEV, 23-24 Septembre 2010, Liège, Belgique.

Plus récemment, afin d'approfondir la compréhension des mécanismes qui sous-tendent les changements avec l'âge dans la reconnaissance des expressions faciales, j'ai posé la question suivante : **existe-t-il des différences ou similitudes avec l'âge dans les stratégies d'exploration des visages expressifs ?** Dans les premières études en oculométrie, il avait déjà été rapporté que contrairement aux jeunes adultes, les adultes âgés passaient globalement plus de temps à explorer la partie inférieure des visages dans des tâches de reconnaissance de visages expressifs à partir de photographies (Wong, Cronin-Golomb, & Nearing, 2005 ; Sullivan et al., 2007 ; Murphy & Isaacowitz, 2010). Bien que ces résultats laissent supposer que les plus âgés adoptent une stratégie visuelle moins optimale pour extraire l'information clé d'un visage expressif (Lemaire, 2010), une explication complète de ce phénomène n'avait pas encore été établie, d'autant que les

stimuli utilisés étaient généralement peu pertinents socialement pour le groupe âgé (p. ex., utilisation exclusive de visages de jeunes adultes). **J'ai émis l'hypothèse que les changements liés à l'âge pourraient provenir de variations stratégiques visuelles.** En effet, il a été montré qu'une réorganisation du fonctionnement cognitif interviendrait sous la forme de modifications stratégiques, pas toujours favorables aux performances cognitives des individus âgés (voir, [Chaby, 2004](#)). J'ai en particulier cherché –en analysant la dynamique spatio-temporelle du comportement oculaire– à comprendre si les adultes âgés utilisaient le même répertoire stratégique que les plus jeunes mais de façon moins efficace ou s'ils utilisaient un répertoire stratégique différent associé à une 'signature' oculométrique spécifique. J'ai également cherché à déterminer si ces stratégies visuelles pouvaient être modifiées en présence de visages pertinents socialement pour les individus âgés, en utilisant à la fois des visages de leur exogroupe (visages de jeunes adultes) et des visages de leur endogroupe (visages de leur propre groupe d'âge). La plupart des travaux antérieurs ont en effet largement ignoré cet aspect et les résultats de quelques travaux sur la question sont assez contradictoires ([Anastasi & Rhodes, 2005](#); [Ebner & Johnson, 2010](#); [Rhodes & Anastasi, 2012](#)).

L'étude impliquait des jeunes adultes (20-30 ans) et des adultes âgés (60-80 ans) dans une tâche d'exploration libre de visages émotionnels, avec enregistrement oculométrique. La tâche incluait un nombre égal de visages d'adultes jeunes et âgés issus de la base de visages inter-âges d'[Ebner et al., 2010](#). Elle était suivie d'une tâche de reconnaissance à choix forcé des 6 émotions de bases (**Figure 18**). **En matière d'encadrement, ce travail été réalisé grâce à la participation de plusieurs étudiants en Master¹⁵ ainsi que d'Isabelle Hupont, recrutée en stage post-doctoral¹⁶** dont le travail sous ma responsabilité concernait le développement de méthodes d'analyses des signaux oculaires fondées sur des approches computationnelles et automatiques.

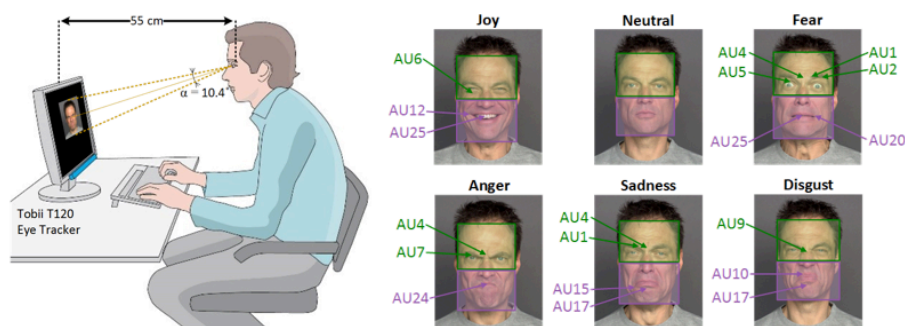


Figure 18. Dispositif expérimental avec système d'eyetracking (Tobii T120) et exemple de stimuli émotionnels (Ebner et al., 2010) avec les aires d'intérêt (AOI) 'upper-face' et 'lower-face' utilisées pour les analyses oculométriques (d'après [Chaby et al., 2017](#))

¹⁵ Mylène Souverain, Elodie Barquilla, Claire Garoche et Caroline Cysique

¹⁶ Projet Européen ASSESSTRONIC ECHORD++ « Robotics for the Comprehensive Geriatric Assessment » (2016-2017)

Sur le plan comportemental (**Figure 19**) nous avons montré que les quelques confusions chez les jeunes adultes se répartissaient entre toutes les émotions, tandis que les adultes âgés confondaient généralement les émotions négatives entre elles.

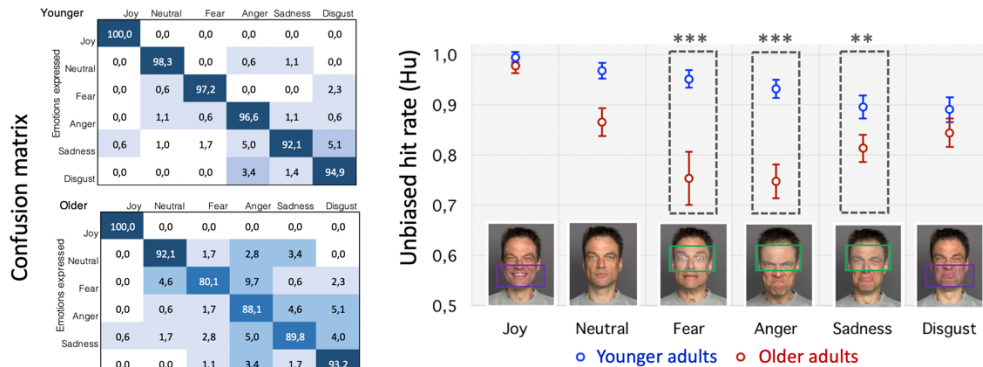


Figure 19. Matrice de confusion (émotion exprimée / émotion perçue) et score non-biaisé (*Unbiased hit rate*, Hu) pour chaque émotion et chaque groupe de participant (*younger adults en bleu, older adults en rouge*).

Après contrôle de ces confusions, il est apparu que les difficultés des adultes âgés concernaient la peur, la colère et la tristesse, avec une préservation des capacités d'identification du dégoût et de la joie. Toutefois nous n'avons pas retrouvé pas d'effet lié à l'endogroupe. De fait, de récentes études confortent l'idée que ce biais favorable de l'endogroupe concernerait plus spécifiquement la reconnaissance de l'identité faciale tandis qu'au contraire l'expression faciale pourrait réduire ce biais (Cronin, Craig, & Lipp, 2018), ou qu'il ne serait observé que chez les jeunes adultes (Craig & Thorne, 2019).

Les analyses classiques du nombre et de la durée des fixations dans les zones d'intérêts (voir Chaby et al., 2017) révèlent que les adultes âgés font plus de fixations et de plus longue durée sur le bas du visage (80% du temps passé à fixer la bouche quelle que soit l'émotion explorée), tandis que chez les jeunes adultes, la stratégie oculaire est influencée par le type de stimulus émotionnel ; ils fixent plus les yeux pour la colère, la tristesse et la peur et davantage la bouche pour la joie ou le dégoût (Sullivan et al., 2007; Wong et al., 2005). De telles analyses sont cependant incomplètes car elles ne prennent pas en compte la dynamique spatio-temporelle des fixations. Il est par exemple possible que les participants aient d'abord pris le temps d'explorer à la fois la partie inférieure et la partie supérieure du visage, puis qu'ils aient choisi une zone donnée sur laquelle se concentrer et/ou que les deux groupes de participants aient porté leur attention sur la même zone du visage pendant une courte période de temps que l'analyse des temps moyens ne peut révéler. Il reste néanmoins que notre analyse de la dynamique spatio-temporelle (**Figure 20**) a révélé que, chez les adultes âgés, le regard est focalisé sur la région du bas du visage pendant toute la durée de d'exploration, tandis que chez les jeunes adultes, le regard est réparti au fil du temps entre la région du haut et du bas du visage de façon plus équilibrée (sauf pour la colère). Nous suggérons qu'il existe –entre les participants de chaque groupe d'âge– un faible consensus sur les stratégies visuelles chez les jeunes adultes et un consensus plus élevé chez les adultes plus âgés, consistant

à fixer le bas du visage, dès les premières millisecondes et pendant toute la durée de d'exploration.

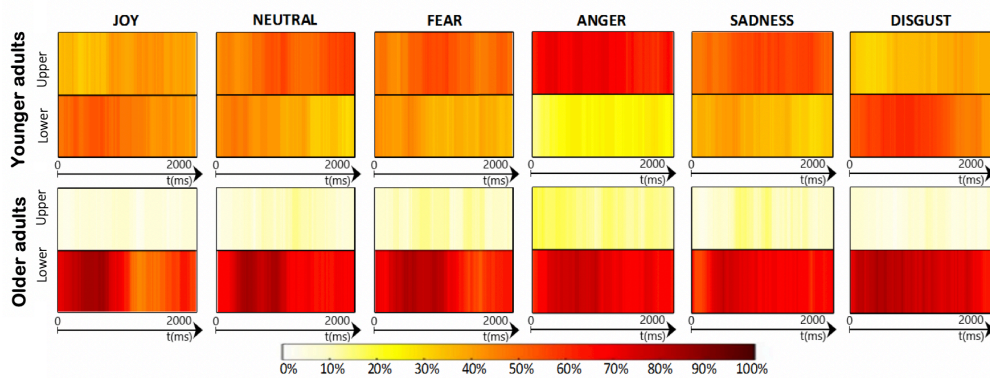


Figure 20. Dynamique spatio-temporelle avec le pourcentage de participants d'un groupe d'âge donné (*younger adults*, *older adults*) qui regardent chacune des aires d'intérêt (*upper* ou *lower*) à chaque période d'échantillonnage sur les 2 secondes de présentation. D'après Chaby et al., 2017

Nous avons enfin réalisé une analyse des patterns oculaires où l'ensemble des données est décrit dans un espace à deux dimensions (voir **Figure 21**) sur lequel chaque point représente l'ensemble de la trajectoire oculaire d'un participant (voir la méthodologie détaillée dans Chaby et al., 2017).

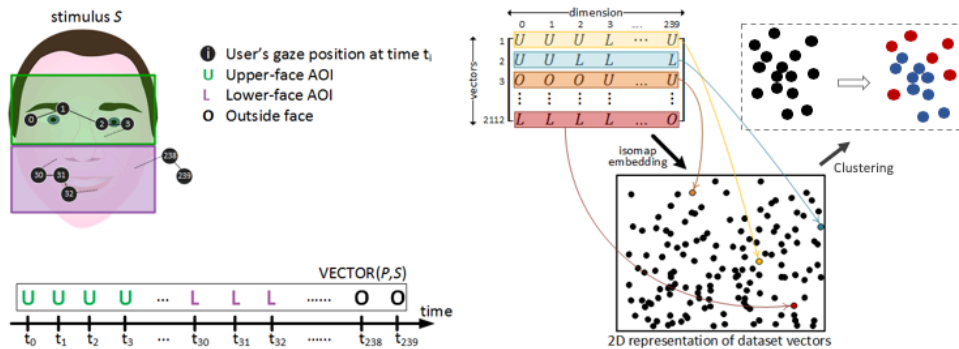


Figure 21. A gauche, méthodologie d'analyse dynamique représentant la séquence temporelle du comportement oculaire de chaque participant P observant le stimulus S pendant 2 secondes : chaque trajectoire visuelle est codifiée comme un vecteur de 240 lettres (2112 vecteurs ont été créés à partir des données) ; A droite, représentation de l'algorithme de réduction des dimensionnalités (*isomap*) pour réduire l'espace à 2D, ce qui permet de visualiser où est placée chaque exploration visuelle de participant pour chaque essai tout en conservant la géométrie des données. Un algorithme non-supervisé (*k-means*) avec une partition en deux clusters ($k=2$) a ensuite été utilisé. D'après Chaby et al., 2017.

Nous avons alors montré que les trajectoires oculaires des adultes âgés sont très regroupées dans l'espace (**Figure 22a**). La séparation des données en deux clusters, met en évidence une séparation claire entre le comportement des adultes jeunes et celui des plus âgés (**Figure 22b**) : 92% des données des adultes âgés appartiennent au cluster 2, tandis que les trajectoires visuelles des jeunes adultes sont plus distribuées entre les clusters 1 et 2.

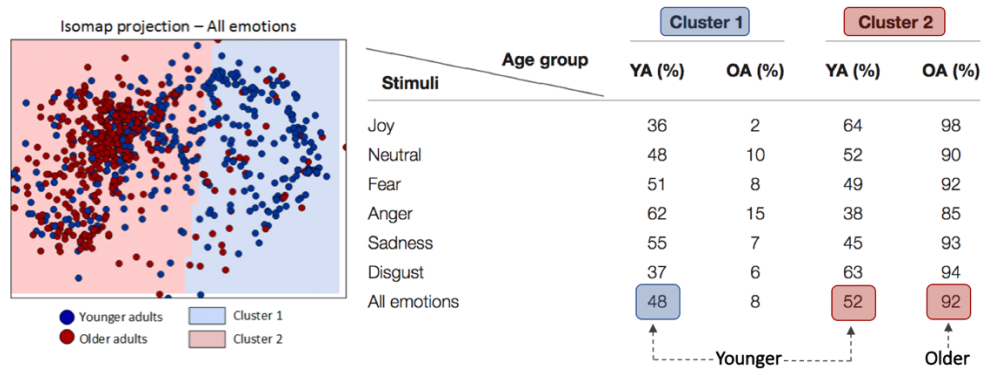


Figure 22. Résultat de l'algorithme de réduction des dimensions et de clustering (k-means ; k=2).

Nous concluons que les adultes jeunes adoptent des stratégies variées (*exploratory-gaze strategy*) qui consistent à explorer de façon répétée les différentes régions du visage et ce, en fonction des différentes émotions. **Au contraire, les adultes âgés adoptent une seule stratégie (*focused-gaze strategy*) consistant à se concentrer uniquement sur la partie inférieure du visage. Nous émettons donc l'hypothèse que ces patterns pourraient constituer une 'signature sociale' distinctive de l'identification émotionnelle dans le vieillissement.** Ce comportement visuel apparaît indépendant de l'émotion ou de l'âge du visage (voir également, [Ciardo, Marino, Actis-Grosso, Rossetti, & Ricciardelli, 2014](#)) et donc de sa plus ou moins grande importance sociale (p. ex., absence de différence liée au traitement de visage de l'endogroupe). L'uniformité du comportement oculaire du groupe âgé peut s'expliquer par des changements sociaux et physiques qui surviennent avec l'âge. Par exemple, il est établi que chez les individus âgés, le contact par le regard est moins fréquent avec leurs partenaires sociaux ([Slessor, Phillips, & Bull, 2010; Slessor et al., 2016](#)). Une autre possibilité est que les adultes âgés se focalisent sur la bouche car elle offre des signaux sociaux pertinents, comme la production de la voix et la lecture labiale lors des interactions sociales. Cela pourrait constituer, une stratégie compensatoire permettant de maximiser la quantité d'information disponible en raison d'une discrète perte auditive ([Cienkowski & Carney, 2002](#)). Ainsi, même si nos stimuli faciaux étaient statiques et les lèvres immobiles, cette stratégie compensatoire acquise ferait de la bouche une caractéristique faciale saillante pour les personnes âgées.

- [Chaby, L., Hupont, J., Avril, M., Luherne-du Boullay, V. & Chetouani, M. \(2017\). Gaze behavior consistency among older and younger adults when looking at emotional faces. *Frontiers in Psychology*, 8:548.](#)

Points Clés :

De l'importance des expressions faciales

- Le constat paradoxal d'une « déafférentation socio-émotionnelle » chez certains adultes âgés et d'un « bien-être émotionnel » chez d'autres nous ont conduit à nous interroger sur les pertes et gains dans le traitement des expressions faciales au cours de du vieillissement.
- Les informations configurales jouent un rôle clé dans l'identification des expressions faciales chez l'adulte âgé.
- Des difficultés d'extraction des informations configurales dans la zone verticale yeux-bouche sont plus importantes dans certaines pathologies, comme la maladie de Parkinson.
- Chez l'adulte âgé, des modifications de stratégie d'exploration oculaire se traduisent par des stratégies moins variables, focalisées sur partie basse du visage.
- Le développement de méthodes computationnelles issues du traitement du signal social permet de mettre en évidence des « signatures » visuelles spécifiques, qui ne sont pas toujours visibles sur le plan comportemental.

3. Pour une approche multimodale des processus émotionnels

3.1. Contexte de mon travail

Dans cette section, j'expose plusieurs de mes travaux réalisés dans la perspective (a) de comprendre les **traitements multimodaux émotionnels (visuo-auditifs) dans leur composante perceptive et productive au cours du développement *lifespan*** (de l'enfance au quatrième âge) ; (b) et d'**en d'appréhender les forces, vulnérabilités ou dysfonctionnements dans certaines pathologies qui affectent la dynamique des interactions sociales** (troubles neurodéveloppementaux ou neurologiques). Les travaux sur ce second aspect ont pu être réalisés grâce à collaboration avec plusieurs services cliniques et ont porté sur différents types de patients : (i) des enfants et des adolescents atteints de troubles du spectre de l'autisme (TSA) dans le service de Psychiatrie de l'Enfant et l'Adolescent (Hôpital de la Pitié-Salpêtrière) dirigé par le David Cohen, (ii) des adultes atteints de gliomes de bas grade (GBG) dans la consultation neurochirurgicale de Laurent Capelle (service de neurochirurgie de l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière), (iii) des patients atteints de la maladie d'Alzheimer, dans le service gériatrique de Patrick Bocquet (Hôpital Corentin Celton, Issy-les-Moulineaux) de 2013 à 2015.

3.2. L'intégration multimodale : définition, bases neurales, avantages

Les interactions sociales, qui nous conduisent à interagir avec un nombre important de personnes différentes, nécessitent la perception, la production et l'intégration de nombreux signaux de nature différente. Dans la vie quotidienne, nous sommes le plus souvent confrontés à une présentation simultanée de signaux sociaux issus des modalités visuelles (visages, gestes, postures) et auditives (vocalisation, prosodie, contenu verbal). Par exemple, pour comprendre les propos d'une personne dans une pièce bruyante, nous faisons appel à notre capacité de décodage des informations visuelles de la région de sa bouche ce qui rehausse l'intelligibilité du signal auditif (Sumbly & Pollack, 1954). L'intégration multimodale désigne le processus par lequel des signaux de différentes modalités sensorielles sont combinés. Lorsque les signaux sensoriels sont congruents, leur intégration présente l'avantage de permettre d'accéder à une perception unifiée et cohérente de notre environnement qu'il est impossible d'obtenir via l'une ou l'autre des modalités prises isolément (Stein et al., 2010), et ils permettent d'utiliser des stratégies compensatoires lorsque des déficits sensoriels affectent une seule modalité (e.g., Frassinetti et al., 2005). De plus, la perception et la production de signaux sociaux sont étroitement liés, et leur intégration constitue une dimension additionnelle de la multimodalité.

Le système nerveux central dispose de mécanismes de traitements spécialisés pour combiner et intégrer toutes ces informations. Des études en neuroimagerie ont montré que différentes régions du cerveau humain (**Figure 23a**) seraient impliquées dans l'intégration de signaux multimodaux, avec des zones de « convergence », notamment au niveau du sillon temporal supérieur postérieur (pSTS), particulièrement impliqué dans l'intégration multimodale des stimuli sociaux (Schirmer & Adolphs, 2017; Stein, Stanford, & Rowland, 2014; Tang, Wu, & Shen, 2016).

D'un point de vue comportemental, la présentation simultanée d'informations congruentes issues de plusieurs modalités sensorielles, permettrait un **gain comportemental** se traduisant par de meilleurs scores d'identification et des temps de réponse plus courts (Collignon et al., 2008; Kreifelts et al., 2007; Klasen et al., 2012). Toutefois, comme il n'est pas exclu que ce gain ne résulte pas d'un simple effet de redondance –les signaux issus de chaque modalité sensorielle pourraient être traités de façon indépendante, sans réelle intégration– on utilise un modèle statistique connu sous le nom de '**race model**'¹⁷ pour tester si l'effet de la redondance des signaux unimodaux reflète ou non une réelle intégration multimodale, selon que la probabilité « observée » en condition multimodale dépasse ou non celle « prédite » par le modèle (Figure 23b) (Molholm et al., 2002; Ulrich, Miller, & Schröter, 2007).

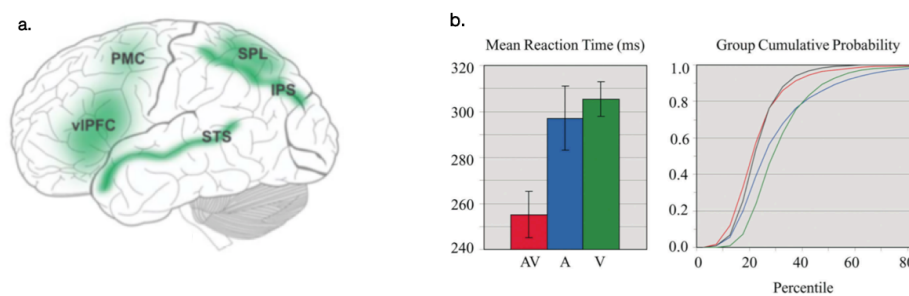


Figure 23. a. Régions cérébrales impliquées dans l'intégration multimodale : SPL–superior parietal lobule ; IP–intraparietal sulcus; STS–superior temporal sulcus; VIPFC– ventrolateral prefrontal cortex; PMC–premotor cortex, Tang et al., 2016. b. Temps de réaction observés en condition audiovisuelle (AV), auditive (A) et visuelle (V). Les distributions audiovisuelles « observées » (rouge) dépassent (i.e., décalage vers la gauche) celles « prédites » par le '*race model*' (noir), reflétant une intégration multimodale, extrait de Molholm et al., 2002.

3.3. Implications dans le développement de l'enfant

Les interactions socioémotionnelles sont fondamentalement multimodales et jouent un rôle crucial dans le développement de l'enfant chez qui la capacité d'identifier et de produire des comportements sociaux, issus des modalités visuelles et auditives, est un aspect clé de la communication sur laquelle se fonde la cognition sociale (Carpendale & Lewis, 2006). Si, au cours du développement du langage, la compréhension précède l'expression, dans le domaine émotionnel, l'identification et la production sont étroitement liées et évoluent en parallèle. Par ailleurs, l'audition et la vision sont complémentaires dans la perception et la production des expressions émotionnelles. Les capacités d'intégration multimodale, tant sur le plan cognitif qu'émotionnel, bien que rudimentaires, émergent de façon très précoce (Lewkowicz, 2014) et se développent par l'exposition répétée à des événements multisensoriels simultanés pendant la petite enfance (Werchan, Baumgartner, Lewkowicz, & Amso, 2018). Par exemple, les nouveau-nés sont fascinés par les visages qui leur parlent et qui les regardent, ce qui est moins le cas en l'absence de parole ou de regard directs (Streri, Coulon, & Guellai, 2013).

¹⁷ Plus formellement, cette méthode permet la comparaison entre les modalités grâce à des calculs de probabilités : si la probabilité de réponse en condition multimodale est significativement plus importante que celle « prédite » par le modèle (i.e., par la somme des probabilités en condition unimodale), on considère qu'il y a violation du '*race model*', ce qui suggère une véritable intégration multimodale (<http://psy.otago.ac.nz/miller>).

3.4. Traitement multimodal chez les enfants avec TSA

Les Troubles du Spectre Autistique (TSA) sont des troubles neurodéveloppementaux qui se caractérisent, entre autres, par des difficultés de la communication et des interactions sociales associées à des comportements stéréotypés et des intérêts restreints, ce qui limite et entrave le fonctionnement dans la vie quotidienne. Sur le plan émotionnel, ces enfants sont connus pour avoir des difficultés à reconnaître et à exprimer leurs émotions (Harms, Martin, & Wallace, 2010). **Depuis 2010, j'ai mené plusieurs études chez des enfants diagnostiqués comme atteints de trouble envahissant du développement non spécifié (TED-NOS)¹⁸ ou de trouble du spectre autistique (TSA) selon le DSM-5.** La sémiologie de ces troubles est polymorphe avec un éventail de déficits qui rend difficile leur diagnostic par les cliniciens. De plus, elle est associée à une comorbidité conséquente, incluant notamment des déficits attentionnels, langagier, ou encore un retard mental (voir Cohen, 2012) ou encore des troubles psychomoteurs tels que des troubles d'acquisition de la coordination (TAC) qui viennent entraver l'expérience interactive de l'enfant (Dziuk et al., 2007; Xavier et al., 2017). Les paradigmes d'études multimodaux – tant du point de vue de la modalité sensorielle (visuelle, auditive), de la composante émotionnelle (perception, production), que des moyens de mesures (caméras, micro, eyetracking) – que j'ai réalisés, ont fait l'objet de deux articles d'opinion : (i) sur l'exploration des comportements socioémotionnels chez les TSA (Chaby et al., 2012), et (ii) sur le développement de la coordination des relations interpersonnelles chez les TSA et dans les TAC (Xavier, Magnat, Sherman, Cohen & Chaby, 2017), ainsi que (iii) d'un chapitre d'ouvrage sur l'intérêt d'utiliser des méthodes computationnelles du traitement du signal social pour mieux comprendre la psychopathologie de ces troubles (Cohen, Chetouani, Chaby, Demouy & Plaza, 2014). L'approche utilisée dans notre équipe consiste, pour enrichir les connaissances sur les TSA, en un travail pluridisciplinaire qui permet d'aborder l'enfant de manière globale, en intégrant différentes perspectives (psychopathologique, développementale, neurocognitive, computationnelle), mais aussi en prenant en compte son expérience interactive au quotidien et les différentes dimensions de son développement (langage, cognition, motricité, émotion).

- **Chaby, L., Chetouani, M., Plaza M., Cohen, D.** (2012) Exploring multimodal social-emotional behaviors in autism spectrum disorders. Workshop on Wide Spectrum Social Signal Processing, ASE/IEEE International Conference on Social Computing, 950-954.
- Cohen, D., Chetouani, M., **Chaby, L.**, Demouy, J., Plaza, M. (2014). Traitement du Signal Social, émotion, Communication et Psychopathologie. In Dupont, A.C. & Gattignol, P. (eds), Emotions Cognitions & Communication. Ortho Edition, Paris, France, pp 29-49.
- Xavier, J., Magnat, J., Sherman, A., Cohen, D., & **Chaby, L.** (2017). A developmental and clinical perspective of rhythmic interpersonal coordination: from mimicry toward the interconnection of minds. *Journal of Physiology - Paris*. 420–426.

¹⁸ Avec le DSM-5 (APA, 2013), les « Troubles du Spectre Autistique » (TSA) ont succédé aux « Troubles Envahissant du Développement » (TED) du DSM-IV-R (2000) et regroupent différents diagnostics tels que le syndrome d'Asperger, le Trouble Autistique, et le Trouble Envahissant du Développement Non Spécifié (TED-NOS) qui représente la prévalence la plus élevée. Avec le DSM-5, certains enfants TED-NOS qui ne présentent pas de comportements stéréotypés ou répétitifs sont généralement mis dans une nouvelle catégorie, le Trouble de la Communication Sociale (*Social Communication Disorders, SCD*). Pour plus de lisibilité, nous parlerons de TSA dans l'ensemble de cette section.

3.4.1. Perception des expressions émotionnelles chez les enfants TSA

Les deux premières études menées sous ma direction ont porté sur **la perception des expressions émotionnelles** ont été réalisées dans le cadre du projet ANR SYNED-PSY (Synchronie, développement précoce et psychopathologie) coordonné par David Cohen.

Les TSA entraînent généralement une altération précoce des relations interpersonnelles, de la communication et du traitement des émotions, qui peut affecter la vie quotidienne (Adrien et al., 1993; Saint-Georges et al., 2013). Les recherches sur les capacités émotionnelle dans les TSA ont exclusivement porté sur la reconnaissance des émotions au travers des expressions faciales (de Wit, Falck-Ytter, & von Hofsten, 2008; Wallace, Coleman, & Bailey, 2008; pour revue Harms, Martin, & Wallace, 2010). Pourtant, on sait qu'au cours du développement typique, la reconnaissance des émotions dans la vie quotidienne passe par notamment par l'intégration de signaux visuels (expressions faciales, corps, posture) et auditifs (voix, prosodie, langage) (De Gelder & Vroomen, 2000; Massaro & Egan, 1996).

Une première étude a été réalisée lors du co-encadrement, avec Monique Plaza de Léonard Vannetzel, psychologue recruté sur le projet ANR (Vannetzel, Chaby, Cautru, Cohen, & Plaza, 2011). L'originalité de cette recherche tient au fait que nous avons pris en compte à la fois le traitement de stimuli émotionnels et non émotionnels, et le traitement de différentes modalités sensorielles (visuelle, auditive et multimodale). Nous avons émis l'hypothèse (i) que les enfants avec TSA traiteraient avec précision les stimuli sociaux non-émotionnels, mais qu'ils auraient plus de difficultés à traiter des stimuli sociaux émotionnels, en particulier sur le plan visuel et (ii) qu'ils compenseraient leurs difficultés visuelles et auditives par une intégration des stimuli multimodaux. Pour éprouver cette hypothèse nous avons proposé deux tâches aux enfants et nous avons évalué leur capacité : (a) à juger les similitudes et dissemblances entre des stimuli sociaux non-émotionnels (*neutral task*) à partir d'indices visuels (visages neutres), auditifs (prénoms entendus) et multimodaux (visages et prénoms présentés simultanément) et (b) à reconnaître la congruence de paires de stimuli sociaux émotionnels (*emotional task*) à partir d'indices visuels (expressions faciales), auditifs (expressions vocales ; e.g. rires, pleurs, cris) et multimodaux (expressions faciales et vocales présentées simultanément). Nous avons inclus dans cette étude 10 enfants TSA¹⁹ âgés de 7 à 13 ans, suivis dans le service de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent, ainsi que 35 enfants au développement typique. L'un des résultats marquants de cette étude (**Figure 24a**) est que les enfants avec TSA ont d'importantes difficultés à traiter les stimuli sociaux émotionnels, que ce soit en situation unimodale, faciale ou vocale, et que cette difficulté contraste très nettement avec leur aisance pour traiter les stimuli sociaux non émotionnels de même nature (i.e. signaux humains, visage ou voix). En outre, il est apparu que les difficultés unimodales n'étaient que partiellement compensées lorsque l'épreuve était proposée sur un mode multimodal. Un autre résultat marquant de cette étude est la forte hétérogénéité dans les résultats des enfants TSA (**Figure 24b**) : 4 enfants TSA ayant des difficultés

¹⁹ Les caractéristiques démographiques et cliniques des enfants sont décrites en détail dans Vannetzel et al. 2011). Les enfants inclus dans l'étude avaient, d'après le DSM-IV-R un tableau de TED-NOS qui représenteraient près de deux tiers des TSA (voir Cohen et al., 2012).

globales dans toutes les tâches neutre et émotionnelle, 3 enfants TSA compensant leurs difficultés unimodales en condition multimodale, 1 enfant avec des difficultés en condition auditive, avec une faible compensation des difficultés en condition multimodale, 2 autres enfants aux profils quasiment similaires à ceux des enfants typiques dans les deux tâches. Notons que certains des enfants atteints d'un TED-NOS répondaient également aux critères de MCDD ou *multiple complex developmental disorders* sont décrits par les cliniciens comme associés à des comportement anxieux et agressifs (Raynaud, 2011; Xavier et al., 2011). De ce fait, nous avons posé l'hypothèse que les variabilités interindividuelles pourraient être liées : (i) à des sous-types d'autisme (i.e., les enfants diagnostiqués comme TED-NOS dans le service) ; (ii) à différents profils socioémotionnels et communicatifs dans la vie quotidienne (Falck-Ytter, Fernell, Gillberg, & Von Hofsten, 2010) que nous n'avons pas explorés dans cette première étude. En réalité, si beaucoup d'études suggèrent que les troubles émotionnels représentent une difficulté fondamentale chez les TSA (Harms et al., 2010; Uljarevic & Hamilton, 2013), d'autres remettent en question ce point de vue (e.g., Homer & Rutherford, 2008). **La nature contradictoire de ces observations nous a amenés à nous demander (i) si les difficultés de traitement des expressions émotionnelles concernaient tous les TSA, (ii) si elles pouvaient s'expliquer par des déficits dans d'autres domaines, et (iii) si elles étaient propres à une modalité sensorielle (p.ex. visuelle, auditive) ?**

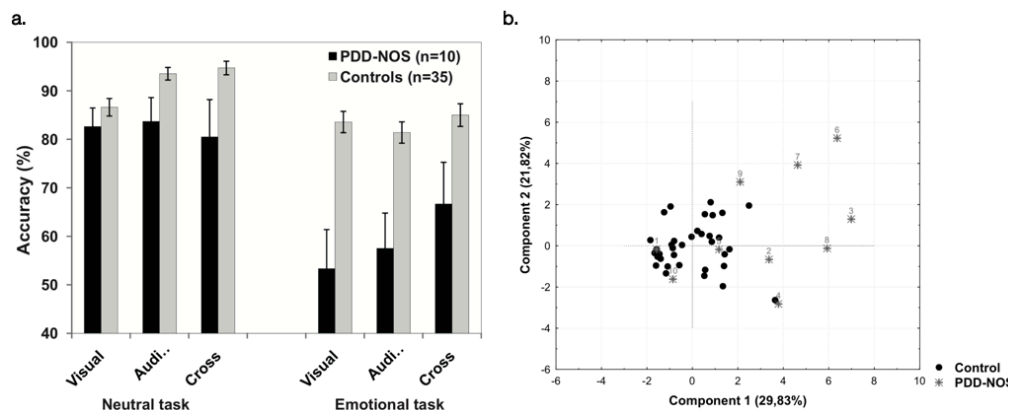


Figure 24. a. Pourcentage de bonnes réponses d'enfants avec troubles du spectre de l'autisme (*PDD-NOS*) et d'enfants typiques (*control*) lors du traitement de stimuli visuels, auditifs et multimodaux non-émotionnels (*neutral task*) ou émotionnels (*emotional task*) ; b. Répartition des enfants typiques (●) et des enfants TSA (*) selon l'axe crossmodal (*component 1*) et l'axe émotionnel (*component 2*) d'après l'analyse en composantes principales (ACP). D'après Vannetzel et al., 2011.

- [Vannetzel, L., Chaby, L., Cautru, F., Cohen, D., & Plaza, M. \(2011\). Neutral versus emotional human stimuli processing in children with pervasive developmental disorders not otherwise specified. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 5\(2\), 775-783.](#)

La deuxième étude a été conçue en collaboration avec Jean Xavier, pédopsychiatre dans le service de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent et a été réalisée sous ma direction par Violaine Vignaud et Rosa Ruggerio²⁰ au cours de leur Master 2. L'objectif était de mieux comprendre les spécificités du traitement des expressions émotionnelles chez des enfants présentant un TSA. **L'originalité tient au fait que nous avons examiné les capacités d'identification des expressions émotionnelles sur le plan visuel, auditif et bimodal (Figure 25a), tout en prenant en compte l'hétérogénéité clinique liée à d'autres comorbidités fréquemment associées aux TSA, telles que les troubles du langage, des stratégies d'exploration visuelle (via un dispositif d'eyetracking), des capacités psychomotrices ainsi que des capacités de socialisation dans la vie quotidienne.**

L'étude impliquait 19 enfants avec TSA âgés de 6 à 13 ans suivis dans le service, appariés à 19 enfants au développement typique. Pour analyser les capacités à identifier des expressions faciales, vocales ou bimodales, nous avons pris en compte chez les patients TSA différentes caractéristiques individuelles : (i) les capacités d'exploration visuelle (nombre de saccades et durée des fixations des visages dans la tâche visuelle et bimodale), (ii) les capacités de langage oral (batterie ELO)²¹, (iii) les capacités psychomotrices (batterie M-ABC)²² notamment la présence d'un trouble d'acquisition de la coordination (TAC), qui selon de nombreux auteurs, peut perturber le développement des compétences sociales (Xavier et al., 2011) et émotionnelles (Cummins, Piek, & Dyck, 2005; Wilson, Ruddock, Smits-Engelsman, Polatajko, & Blank, 2013), et (iv) les capacités d'adaptation sociale dans la vie quotidienne (échelle Vineland, partie 'socialisation')²³.

Nos résultats indiquent que, par comparaison avec les enfants typiques, les enfants avec TSA obtiennent des scores d'identification d'expressions émotionnelles assez élevés mais hétérogènes selon la modalité sensorielle (Figure 25b) et la valence de l'émotion. Nous n'avons pas objectivé de déficit global du groupe TSA dans la tâche auditive et multimodale (voir également, Jones et al., 2011), seule la tâche visuelle apparaissait difficile pour identifier des expressions de colère ou neutre (la joie restant très bien identifiée). Le recueil des données oculométriques indique que le groupe d'enfants TSA présente une importante instabilité du regard, marquée par un nombre de saccades élevé et un temps plus court consacré à explorer le visage. Ces résultats confirment les études qui ont décrit des anomalies du regard chez les TSA, notamment une réduction du temps consacré au traitement des stimuli sociaux émotionnels (e.g., Guillon, Hadjikhani, Baduel, & Rogé, 2014; Yi et al., 2014). On peut retenir des analyses multivariées réalisées que chez les enfants avec TSA, (1) les faibles performances avec les stimuli visuels ont été améliorées

²⁰ Rosa Ruggerio a réalisé un stage de recherche de 6 mois (Jan-Juill. 2014) sous ma direction lors son Master de Psychologie au département de Psychologie de la Deuxième Université de Naples, Caserta, Italie.

²¹ Réalisé dans le service lors du bilan orthophonique. Plusieurs domaines du langage oral sont évalués : phonologie, vocabulaire, syntaxe, pragmatique au travers de 5 épreuves de l'ELO [Batterie d'évaluation du langage oral] (Khomsî, 2001).

²² Réalisé dans le service lors du bilan psychomoteur. Plusieurs domaines sont évalués : dextérité manuelle, maîtrise de balle, équilibre statique et dynamique [Batterie M-ABC] (Henderson & Sugden, 1992). Cette batterie est utilisée pour évaluer la présence d'un TAC (Trouble d'Acquisition de la Coordination).

²³ [Batterie Vineland-II] (Sparrow, Cicchetti, & Balla, 1989)

avec les stimuli multimodaux, mais dans une moindre mesure que chez les enfants typiques (voir également [Charbonneau et al., 2013](#)), et avec des confusions persistantes ; (2) ceux qui avaient un profil oculaire atypique (i.e., nombreuses saccades, peu de fixations sur le visage) n'avaient pas de difficultés plus marquées dans les tâches visuelles ; (3) ceux qui présentaient un trouble du langage oral avaient plus de difficultés pour identifier les expressions vocales, alors que ceux qui présentaient un trouble de la coordination (TAC) n'avaient pas plus de difficultés dans les tâches visuelles ; (4) les difficultés de socialisation dans la vie quotidienne étaient associées à des difficultés accrues pour identifier les expressions vocales.

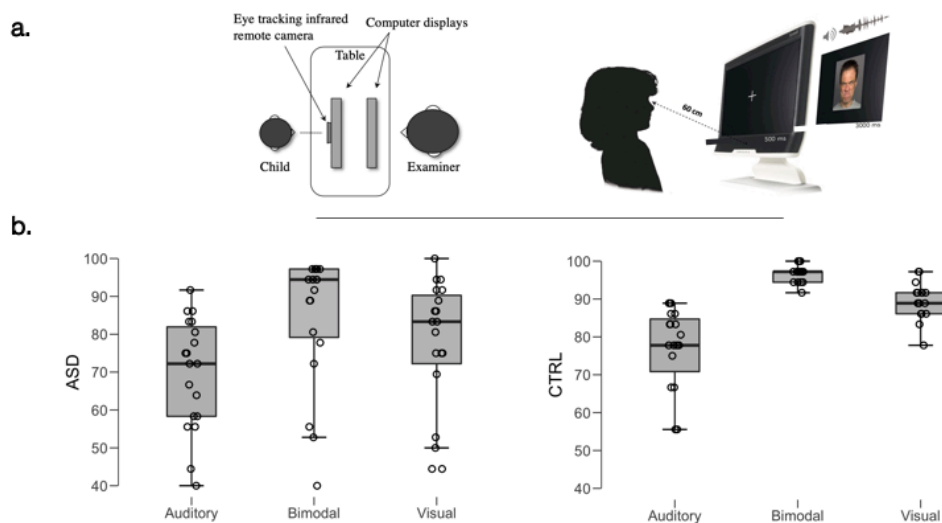


Figure 25. a. Dispositif expérimental avec système d'eyetracking (Tobii T120) et présentation des stimuli émotionnels : auditifs (voix émotionnelles : rire, pleurs, etc), visuels (visages émotionnels issues de la base d'Ebner), et bimodal (auditif+visuel) ; **b.** Pourcentage de bonnes réponses dans chaque condition chez les enfants TSA et Contrôle. D'après Xavier et al., 2017

L'intérêt majeur de ce travail est qu'il a permis d'évaluer des dimensions séparées et l'intégration de ces dimensions. Nous concluons que les difficultés de traitement des expressions émotionnelles ne concernent pas l'ensemble des TSA, qu'elles touchent en priorité la modalité visuelle et qu'elles sont partiellement compensées par l'ajout d'une expression dans la modalité auditive. En outre, les difficultés sont hétérogènes et ne peuvent être simplement expliquées par des déficits dans d'autres domaines.

- [Xavier, J., Vignaud, V., Ruggerio, R., Bodeau, N., Cohen, D., & Chaby, L. \(2015\). A Multidimensional Approach to the Study of Emotion Recognition in Autism Spectrum Disorders. *Frontiers in Psychology*. 6:1954.](#)

3.4.2. Production des expressions émotionnelles chez les enfants TSA

La production émotionnelle (Sander, 2013), notamment **d'expressions faciales, est restée un champ de recherche largement négligé jusqu'ici** (Trevisan, Hoskyn, & Birmingham, 2018). Pourtant, dans la mesure où les enfants ne sont pas toujours capables de faire part verbalement de leurs émotions, la compréhension de leurs expressions faciales et vocales par leurs pairs ou les adultes joue un rôle central dans leurs interactions sociales.

Au cours du développement typique, la production des expressions faciales²⁴ et la motricité faciale, bien que présentes avant la naissance (Oster, 2004), se développent lentement, jusque assez tard dans l'adolescence (voir, Camras & Shutter, 2010). De plus, l'expression faciale, l'expression vocale et la prosodie émotionnelle sont étroitement liées et peuvent influencer l'une sur l'autre. Par exemple, une expression faciale de tristesse façonne la forme de la bouche et affecte la prosodie ; à son tour, une prosodie triste affecte généralement l'expression faciale; Muir, Lee, Hains, & Hains, 2005). Il existe par ailleurs d'importantes variabilités de production émotionnelle liées notamment à la valence émotionnelle (i.e., les émotions positives sont plus faciles à produire que les négatives, Waiden & Field, 1990) ou au genre (i.e., les filles seraient en moyenne plus expressives, mais les garçons auraient plus de facilité pour exprimer la colère, voir Chaplin & Aldao, 2013). Chez l'enfant typique, peu d'études ont porté sur l'étude des expressions « spontanées » (Sato & Yoshikawa, 2007), et elles se sont plutôt concentrées sur l'étude d'expressions dites « posées », après sollicitation verbale (e.g., « *Montre-moi comment tu fais quand tu es triste* ») plutôt que par imitation d'un modèle sur photo ou in-vivo; Brun, 2001).

Chez les enfants TSA, plusieurs études ont mis en évidence des différences dans l'expressivité émotionnelle qui pourraient affecter la qualité des interactions sociales. Ainsi, dans un contexte d'interaction sociale, les expressions faciales seraient moins fréquentes et de plus courte durée (Czapinski & Bryson, 2003) ou moins adaptées au contexte social (Tantam, Holmes, & Cordess, 1993), ce qui rendrait plus difficile pour les autres d'en interpréter la signification. Ainsi, lors de cotations à l'aveugle, les vidéos d'enfants TSA sont jugées moins expressives, plus variables et globalement plus atypiques (Stagg, Slavny, Hand, Cardoso, & Smith, 2014). Plus récemment, l'analyse –à l'aide d'un logiciel de caractérisation automatique d'expressions faciales– de vidéos d'enfants TSA, enregistrées dans un contexte d'évaluation clinique, a montré que par rapport aux expressions des enfants typiques, celles des enfants TSA apparaissaient globalement « plus neutres » et « moins joyeuses », et ce d'autant plus quand les difficultés d'interactions sociales étaient importantes (Owada et al., 2018). Quoiqu'il en soit, bien que ce caractère « atypique » soit considéré comme une caractéristique cliniquement pertinente, il ne permet pas de définir quelles modifications spécifiques du visage ont pu susciter cette perception, ni de proposer des moyens d'aider les enfants avec TSA à

²⁴ L'étude de la production d'émotion est complexe et recouvre : (i) la production « involontaire/automatique » et (ii) la production « volontaire/posée » en réponse à des instructions (imiter un modèle en image, en vidéo ou in-vivo ; produire sur commande) ou lors des interactions sociales (sourire à une connaissance).

travailler et améliorer leur production émotionnelle et la qualité de leurs interactions sociales.

C'est dans ce contexte, **nos travaux ont débouché sur le projet ANR JEMImE** (Jeu Éducatif Multimodal d'Imitation Émotionnelle) coordonné par Kevin Bailly, dont l'objectif était : **(i) de développer un jeu dit « sérieux » permettant d'aider les enfants TSA à apprendre à produire des expressions faciales de qualité dans un contexte thérapeutique et d'interaction sociale ; (ii) de proposer des méthodes computationnelles permettant de capturer, de quantifier mathématiquement et de visualiser la qualité des expressions produites et leurs caractéristiques.**

Ces dernières années, de nombreux chercheurs ont introduit les technologies numériques dans la prise en charge des patients avec TSA (Durkin, 2010). En effet, les supports numériques sont apparus comme des moyens thérapeutiques intéressants, fournissant au thérapeute un large éventail de situations de travail proches de celles de la vie réelle, suscitant l'intérêt des enfants, adaptant le niveau de difficultés à leurs capacités et leur donnant une rétroaction sur leur performance (Bernard-Opitz, Sriram, & Nakhoda-Sapuan, 2001). Parmi les technologies numériques, une piste de plus en plus explorée est celle des jeux dit « sérieux » (i.e., support numérique ludique ayant une visée éducative) pour entraîner des habiletés spécifiques de la cognition sociale (identification des émotions, interactions sociales). Nous ne discuterons pas ici des différents jeux « sérieux » existants et de leurs avantages et limites, ces aspects étant détaillés dans Cohen et al. (2017). Notons cependant que si les jeux sérieux tendent à se développer dans le champ de l'autisme et des émotions, ils visent surtout à améliorer l'identification des émotions plus que la production, et très peu ont été validés lors d'études expérimentales/cliniques.

- Cohen, D., Grossard, C., Grynspan, O., Anzalone, S., Boucenna, S., Xavier, J., Chetouani, M. & Chaby, L. (2017). Autisme, jeux sérieux et robotique : réalité tangible ou abus de langage ? In *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*. 175:5, 438-445.

Le jeu sérieux **JeMime** (pour une description détaillée, voir Grossard et al., 2017) s'adresse à des enfants avec TSA. Dans la phase « d'apprentissage » (**Figure 26**), les enfants apprennent à produire des expressions émotionnelles faciales et vocales de base (joie, peur, colère ainsi que neutre) soit par *imitation* d'un modèle virtuel (vidéo d'un avatar) soit par sollicitation *sur demande (mot écrit)*. **L'originalité (et la difficulté) de ce travail a été de fournir en temps réel à l'enfant un retour visuel sur sa production** (i.e., retour vidéo de son visage) et sa qualité expressive (i.e., jauge de couleurs plus ou moins haute). Cette innovation technologique, réalisée par Kevin Bailly et Arnaud Dapogny (ISIR), a nécessité le développement d'algorithmes d'apprentissages issus du traitement du signal social permettant de catégoriser les expressions des enfants avec une certaine robustesse en temps réel, malgré des variabilités liées à la morphologie du visage (identité, orientation), à son occlusion partielle ou à des conditions d'éclairage changeantes (voir Dapogny, Bailly, & Dubuisson, 2018). Dans la phase dite « de jeu », l'enfant est immergé dans un environnement virtuel proche de la vie quotidienne dans lequel il se trouve confronté à des situations d'interactions sociales (p. ex., jeu de ballon) afin d'utiliser les apprentissages acquis lors de la première phase en produisant l'émotion (p. ex., joie) adaptée au contexte (p. ex., tu veux le ballon).

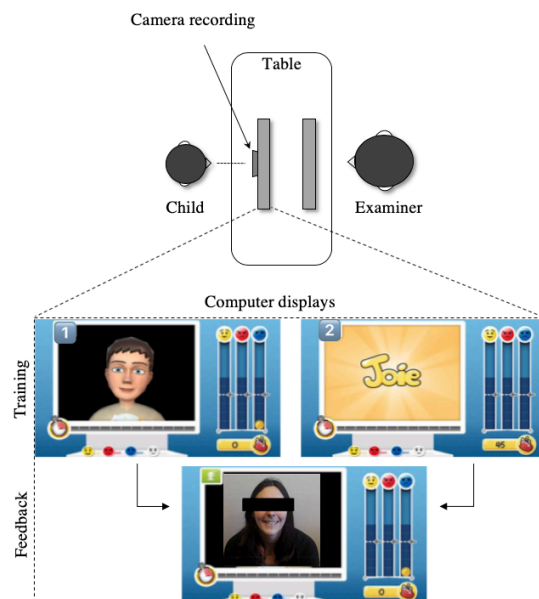


Figure 26. Dispositif expérimental. L'enfant a pour consigne d'exprimer des expressions faciales de bases (joie, tristesse, colère), (1) en imitant le modèle ou (2) par sollicitation sur demande. Un retour visuel lui est donné ainsi qu'une récompense à l'issue de sa réussite à la tâche (i.e., pièce d'or à droite de l'écran). D'après Grossard et al., 2017

- Grossard, C., Hun, S., Serret, S., Grynszpan, O., Foulon, P., Dapogny, A., Bailly, K., **Chaby, L.** & Cohen, D. (2017). Rééducation de l'expression émotionnelle chez l'enfant avec trouble du spectre autistique grâce aux supports numériques : le projet JEMImE. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*. 65(1), 21-32.

La validation clinique du prototype du jeu a été réalisé par Charline Grossard, orthophoniste dans le service, chez 193 enfants âgés de 6 à 11 ans (36 enfants TSA et 157 enfants typiques). Les premiers résultats publiés ont porté sur l'analyse des productions des 157 enfants typiques (3874 vidéos) annotées par différents juges afin d'en évaluer la qualité (Grossard et al., 2018). On peut retenir des résultats que : (1) la qualité des productions était meilleure par sollicitation sur demande que par imitation ; (2) les émotions négatives étaient plus difficiles à produire ; (3) la qualité des productions s'améliore entre 6 et 11 ans. Cet ensemble de données chez l'enfant typique a été utilisé pour entraîner l'algorithme spécialisé dans la reconnaissance faciale à reconnaître en temps réel les expressions faciales des enfants TSA lors du jeu. Les analyses révèlent que globalement les enfants TSA produisent des expressions faciales plus ambiguës et moins significatives sur le plan social que les enfants typiques (Grossard et al., soumis). **En conclusion, il apparait que la production d'émotions faciales constitue un processus complexe et lent dont le développement est influencé par plusieurs facteurs qui doivent être pris en compte dans les recherches futures.**

- Grossard, C., **Chaby, L.**, Hun, S., Pellerin, H., Bourgeois, J., Dapogny, A., Ding, H., Serret, S., Foulon, P., Chetouani, M., Chen, L., Bailly, K., Grynszpan, O., and Cohen, D. (2018). Children facial expression production: influence of age, gender, emotion subtype, elicitation condition and culture. *Frontiers in Psychology*. 9:446.
- Grossard, C., Dapogny, A., Cohen, D., Serret, S., Bernheim, S., Hun, S., Bourgeois, J., Pellerin, H., Serret., Bailly, K, **Chaby, L.** (soumis). Children with autism spectrum disorder produce more ambiguous and less socially meaningful facial expressions: an experimental study using random forest classifiers. *Molecular autism*.

3.5. Intégration multimodale émotionnelle à l'âge adulte

Chez l'adulte en bonne santé, l'intégration multimodale a été explorée à partir des années 2000 avec des expressions faciales et vocales (Collignon et al., 2008; Kreifelts et al., 2007), faciales et corporelles (e.g., Van den Stock, Righart, & de Gelder, 2007) ou vocales et corporelles (e.g., Stienen, Tanaka, & de Gelder, 2011). L'intégration multimodale émotionnelle se traduit généralement par une facilitation comportementale associée à un raccourcissement des temps de réponse pour identifier les expressions multimodales comparativement aux expressions unimodales et surpassant les prédictions prévues par le *race model* (Collignon et al., 2008, 2010). De plus, la réponse motrice appropriée face à un danger est plus rapide et efficace lorsque des signaux visuels et auditifs congruents alertent en même temps (Laing, Rees, & Vuong, 2015). Sur le plan de la dynamique cérébrale, des études en EEG ont également observé des effets précoces de l'intégration multimodale, entre 100-200 ms post-stimulus (Jessen, Obleser, & Kotz, 2012; Kokinous, Kotz, Tavano, & Schröger, 2014)

L'étude des processus intégratifs multimodaux chez l'adulte n'a cependant pas été restreinte à l'individu en bonne santé. Elle a fourni un cadre théorique permettant d'envisager différemment certaines affections psychiatriques ou neurologiques dont la symptomatologie comporte des perturbations émotionnelles et sociales. Ainsi, dans la schizophrénie, des troubles de l'intégration multimodale ont été mis en évidence se traduisant, entre autres, sur le plan émotionnel, par un émoussement affectif, une dysharmonie émotionnelle et des comportements en décalage avec les émotions exprimées (i.e., expressions faciales non congruentes avec l'affect). Les études ont mis en évidence des patterns atypiques d'intégration multimodale marqués par des hypo-intégrations (e.g., de Gelder et al., 2003; de Jong et al., 2009; Williams, Light, Braff, & Ramachandran, 2010) ou des hyper-intégrations des visages et des voix (de Gelder et al., 2005). Par ailleurs, des études en électrophysiologie ont mis en évidence avec des paradigmes multimodaux audio-visuel (i.e. visage+voix) de type oddball²⁵, des différences infracliniques subtiles (i.e., tendances anxio-dépressives, niveau d'alexithymie) et non-repérables lorsque des stimuli unimodaux étaient utilisés (Campanella, Delle-Vigne, Kornreich, & Verbanck, 2012; Delle-Vigne, Kornreich, Verbanck, & Campanella, 2014). Si la recherche sur le traitement multimodal avance, elle reste encore limitée du fait de la rareté des résultats disponibles concernant les troubles d'intégration dans les populations cliniques.

²⁵ Dans le paradigme oddball classique, le participant doit détecter le plus rapidement possible un stimulus déviant rare (ex. un son de 100Hz) parmi la présentation d'une série de stimuli fréquents (ex. un son de 500Hz).

3.6. Intégration multimodale chez des adultes avec gliomes de bas grade

Dans ce contexte, j'ai eu la chance de pouvoir réaliser avec Monique Plaza des études sur l'intégration multimodale chez des adultes porteurs de gliomes de bas grade (GBG) en collaboration avec Laurent Capelle, neurochirurgien à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, ce qui m'a permis de pouvoir aborder le cerveau sur un mode nouveau.

Les gliomes de bas grade (GBG, gliomes de grade II selon l'OMS) sont des tumeurs cérébrales rares, d'origine gliale, d'évolution lente et de nature infiltrante (Rigau et al., 2011). Leur découverte se fait habituellement de façon fortuite, à la suite d'une crise d'épilepsie, et ils concernent généralement les adultes âgés entre 20 et 40 ans (Capelle et al., 2013). Plus concrètement, il s'agit de tumeurs précancéreuses dont l'évolution se fait initialement de façon *silencieuse*, avec une croissance lente et constante, infiltrant les faisceaux de substance blanche, puis de façon *plus rapide* pour évoluer vers du haut grade et menacer le pronostic fonctionnel (Bonnetblanc et al., 2006; Mandonnet, Taillandier, & Duffau, 2017). Cette lenteur de l'infiltration tumorale permet une réorganisation cérébrale progressive, malgré une localisation de la tumeur le plus souvent dans des zones classiquement considérées comme « éloquentes »²⁶ selon la conception localisationniste du fonctionnement cérébral (Duffau, 2012a). Les études réalisées sur le cerveau atteint par ces tumeurs avant, pendant et après l'intervention chirurgicale, ont permis de proposer de **nouveaux modèles en neurosciences cognitives, reposant sur une conception connexionniste du cerveau : la « fonction » apparaît comme délocalisée, mettant en jeu des réseaux parallèles distribués et interactifs, capables de travailler de façon synchrone et de pouvoir se compenser en partie les uns les autres** (Duffau, 2014).

Avant la résection tumorale, bien que les patients mènent une vie « normale », ils peuvent présenter des signes discrets et/ou formuler des plaintes de dysfonctionnement cognitif (Tucha et al., 2000; Correa et al., 2008), qui sont majorés après l'intervention et nécessitent la mise en place de prises en charge adaptées (Santini et al., 2012). En outre, les patients éprouvent souvent des difficultés émotionnelles, et leur état de bien-être est réduit du fait des dommages neurologiques (Taphoorn et al., 1994), parfois associés – après la chirurgie – à des symptômes de dépression ou d'anxiété (Keeling, Bambrough, & Simpson, 2013) et à une réduction de la qualité de vie (Andrewes et al., 2003).

Dans ce contexte, **nous avons proposé pour les patients porteurs de GBG des protocoles d'évaluation des capacités d'intégration multimodale qui jouent un rôle crucial dans la vie quotidienne.** *Sur le plan théorique*, la question était de comprendre comment les processus d'intégration multimodale, y compris le traitement des émotions, sont affectés par des tumeurs infiltrant des régions variées du cerveau mais sollicitant la plasticité cérébrale et les mécanismes de connectivité. *Sur le plan clinique*, la question était de savoir si et comment l'intégration multimodale des patients permet de compenser les déficits, émotionnels ou non, qui affectent une seule modalité sensorielle, ce qui est important pour la récupération dans la période post-chirurgicale.

²⁶ Aire motrice supplémentaire (40%), insula (35%), aire somatosensorielle primaire (9%), aire motrice supplémentaire (6%), aire de Broca (5%) (Duffau & Capelle, 2004)

En 2013, nous avons rapporté le cas d'un patient ayant une double tumeur dans le cortex préfrontal gauche et droit (**Figure 27**). Nous avons montré (Plaza, du Boullay, Perrault, Chaby, & Capelle, 2014) que les infiltrations tumorales et leur résection bilatérale n'avaient pas conduit à un « syndrome frontal » ni à un « syndrome dysexécutif » (voir aussi, Duffau, 2012b) contrairement à ce qu'aurait pu prédire le modèle localisationniste (Miller & Cohen, 2001), le patient ayant un fonctionnement cognitif homogène, sans troubles caractéristiques, ni plaintes dans la vie quotidienne. **Nous avons conclu que la plasticité cérébrale permettait la réorganisation des réseaux cognitifs, même dans le cas de tumeurs bilatérales, ce qui confirme la pertinence clinique des modèles connexionnistes** (voir Duffau, 2014).

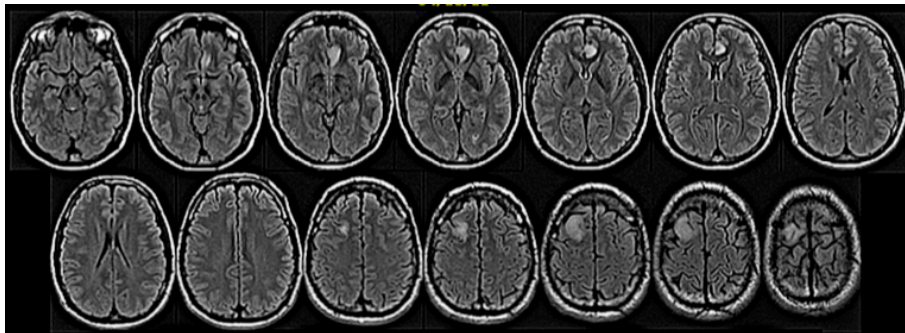


Figure 27. IRM anatomique montrant deux gliomes dans le cortex préfrontal gauche (région sous calleuse étendue au gyrus cingulaire) et droit (gyrus frontal supérieur).

- Plaza, M., du Boullay, V., Perrault, A., Chaby, L., & Capelle, L. (2013). A case of bilateral frontal tumors without "frontal syndrome". *Neurocase*, 1-13.

Nous avons ensuite réalisé une étude chez dix patients porteurs de GBG, âgés de 23 à 35 ans ainsi que 60 participants contrôle. Les participants étaient évalués sur leurs capacités d'appariement dans différentes tâches visuelles (image), auditives (mot entendu) et visuo-auditives (voir Plaza, Capelle, Maigret, & Chaby, 2013). Nos résultats ont montré que malgré l'hétérogénéité des tumeurs et la variabilité des atteintes, **les patients étaient dans l'ensemble préservés dans la plupart des tâches d'intégration multimodale non-émotionnelles, et que, lorsque des difficultés étaient observées, elles n'étaient pas corrélées à la localisation des lésions ou au type de gliome.**

- Plaza, M., Capelle, L., Maigret, G., & Chaby, L. (2014). Strengths and weaknesses of multimodal processing in a group of adults with gliomas. *Neurocase*, 19(3), 302-312.

En parallèle, nous avons exploré les conséquences de GBG en pré- et post-opératoire sur l'intégration multimodale émotionnelle. Ce travail a été réalisé lors de la thèse de Viviane Luherne-du Boullay que j'ai co-encadrée avec Monique Plaza. D'un point de vue clinique, le travail a initialement émergé après l'observation du décalage entre la plainte décrite par les patients et leur entourage au sujet de leur expérience émotionnelle au quotidien (pour des études de cas, voir Luherne-du Boullay, 2015), et les résultats quasi-normaux lors des bilans avant ou après la résection de la tumeur (Du Boullay, Plaza, Capelle, & Chaby, 2013; Plaza et al., 2013).

« Depuis la découverte de ma tumeur j'essaie de faire passer mes émotions dans un tunnel, pour qu'il y ait moins de moments trop forts et moins de moments sans rien ; j'ai compris qu'il valait mieux lisser le tout pour vivre bien maintenant ».

Homme, 37 ans, porteur d'un gliome de bas grade

L'objectif était d'explorer les capacités de perception des expressions émotionnelles en modalité visuelle (visages), auditive (voix) et leur intégration multimodale (visages et voix simultanément). Nous avons mené une étude chez 32 patients (âgés de 20 à 61 ans) présentant un GBG et 32 participants contrôles (voir [Luherne-du Boullay, Plaza, Perrault, Capelle, & Chaby, 2014](#)). Les résultats révèlent, malgré l'infiltration de volumineuses tumeurs, des difficultés réelles mais discrètes, qui affectent le décodage des expressions émotionnelles en condition unimodale (visuelle ou auditive) uniquement. Le « gain comportemental » observé en condition bimodale (scores plus élevés et temps de réaction plus courts), n'est cependant pas de même nature dans les deux groupes. Contrairement à ce que nous avons observé chez les contrôles, la nature du gain chez les patients GBG semble relever d'une redondance des informations sensorielles unimodales, sans réelle intégration, les temps observés en condition bimodale n'étant pas plus rapides que ceux prédits par le 'race model' (Figure 28). Nous avons émis l'hypothèse que le caractère infiltrant du gliome associé à une atteinte de l'intégrité de la matière blanche avait provoqué un syndrome de dysconnexion entre les aires sensorielles empêchant ainsi l'intégration des informations issues de chacune des modalités sensorielles, ce qui peut affecter la qualité de vie et les interactions sociales. Bien que cette question soit très peu explorée ([Herbet et al., 2014](#)), d'autres études portant spécifiquement sur des patients atteints de tumeurs cérébrales ont révélé des troubles de la reconnaissance des émotions ou de leur régulation chez des patients présentant respectivement des lésions temporales ou frontales ([Campanella, Shallice, Ius, Fabbro, & Skrap, 2014](#)). En outre, l'impact des tumeurs cérébrales de type GBG et de leur chirurgie sur les troubles émotionnels et sur la qualité de vie du patient sur le long terme commence à être étudié ([Campanella, Fabbro, Ius, Shallice, & Skrap, 2015](#); [Fabio Campanella et al., 2017](#); [Mattavelli et al., 2019](#)).

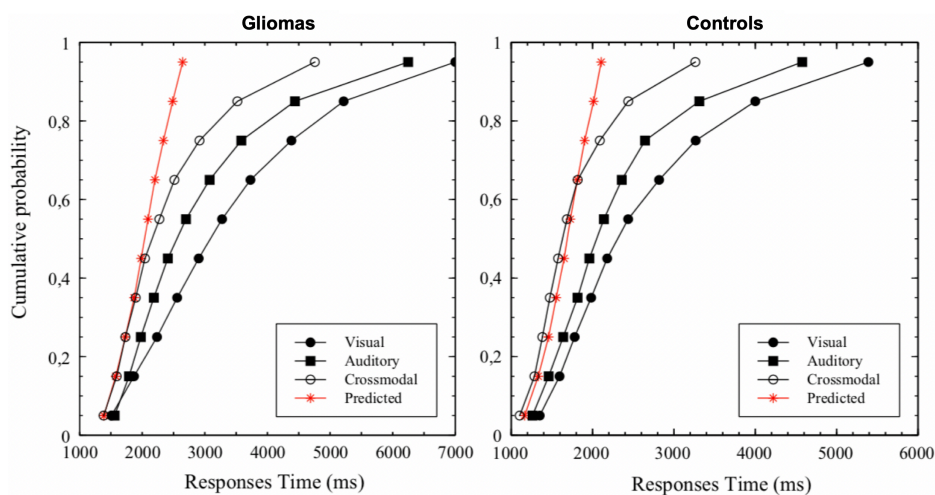


Figure 28. Distributions des probabilités cumulées des temps de réponse « observés », représentées en noir : condition visuelle (cercles noirs), auditive (carrés noirs) et bimodale (cercles vides). Distributions des probabilités « prédites » par le 'race model' (astérisques rouges). D'après [Luherne-du Boullay et al., 2014](#).

- [Luherne-du Boullay, V., Plaza, M., Perrault, A., Capelle, L., & Chaby, L. \(2014\). Atypical crossmodal emotional integration in patients with gliomas. *Brain and Cognition*, 92, 92-100.](#)

3.7. Vieillesse émotionnelle, une question de modalité ?

Bien qu'elle joue un rôle crucial à tous les âges de la vie, l'intégration multimodale émotionnelle n'a pas été explorée de façon extensive chez les adultes âgés. Au contraire, les travaux sur le vieillissement se sont polarisés de manière exclusive sur la modalité visuelle, révélant un déclin du traitement des expressions faciales (Chaby & Narme, 2009; Ziaei & Fischer, 2016). Pourtant, comme nous l'avons déjà dit, dans la vie de tous les jours, différents modes d'expression des émotions coexistent, reposant sur des indices multimodaux, visuels et auditifs (vocalisations non linguistiques, prosodie émotionnelle). Les rares études qui ont exploré les changements du traitement des expressions vocales avec l'âge ont conclu que le vieillissement était associé à des difficultés pour reconnaître les émotions à partir des indices prosodiques (Paulmann et al., 2009; Mitchell et al., 2011; Seddoh, Blay, Ferraro, & Swisher, 2018). Dans la mesure où reconnaître avec précision les émotions d'autrui contribue à la qualité des relations sociales (Fischer & Manstead, 2008), il semble surprenant que les nombreuses études de laboratoire constatent une diminution de la reconnaissance des émotions avec l'âge. Nous pensons que ces résultats pourraient en partie être dus au fait que les tâches de laboratoire utilisées dans les études sont unimodales, présentent les émotions de façon dépersonnalisée, et correspondent peu aux expériences de la vie réelle, ce qui pourrait conduire à sous-estimer le niveau de performance des personnes âgées, qui dépend probablement du caractère écologique de la tâche. Notre expérience quotidienne étant nourrie d'une multitude d'informations sensorielles nous parvenant simultanément pour former un percept unifié du monde, les tâches multimodales me semblent éminemment pertinentes pour appréhender les capacités réelles de traitement de l'information émotionnelle des personnes âgées.

Pour rompre avec cette approche « déficitaire » du vieillissement, je me suis intéressée au rôle positif du traitement multimodal d'informations congruentes issues de différents canaux sensoriels. **Afin de mieux comprendre la nature de cet avantage, nous avons avec Viviane Luherne-du Boullay et plusieurs étudiants en Master²⁷, réalisé une étude afin de déterminer si les personnes âgées bénéficient d'une présentation multimodale de stimuli émotionnels.** L'étude impliquait 31 jeunes adultes (20-30 ans) et 31 adultes âgés (60-80 ans) ayant reçu la consigne d'identifier des expressions émotionnelles de base, présentées sous forme de stimuli visuels (expressions faciales), auditifs (expressions vocales) ou bimodaux (expressions congruentes simultanées faciales et vocales). Afin de mesurer le bénéfice d'une présentation multimodale, nous avons calculé les gains de redondance et le 'race model' nous a permis de déterminer la nature de l'intégration multimodale (pour plus de détails, voir Chaby, Luherne-du Boullay, Chetouani, & Plaza, 2015). Nous avons montré que malgré un déclin du traitement émotionnel lorsque les modalités sensorielles sont prises isolément (expressions faciales ou expressions vocales), les personnes âgées bénéficient autant que les adultes plus jeunes d'indices multimodaux congruents, au-delà de ce qui est prédit par le 'race model' (Figure 29).

²⁷ Lorraine Templier, Violaine Vignaud, Claire Garoche, Elodie Barquilla, en Master de Psychologie

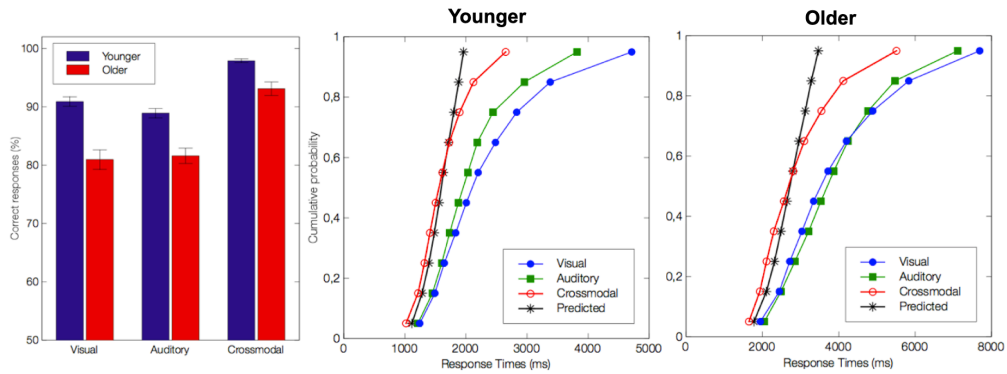


Figure 29. A gauche, scores de détections correctes des expressions faciales, vocales et bimodales chez les adultes jeunes et âgés. A droite, distribution de probabilités observés en condition unimodale visuelle (bleu), auditive (vert), bimodale (rouge), et celle prédite par le 'race model' (rouge). D'après Chaby et al., 2015.

- **Chaby, L., Luherne-du Boullay, V., Chetouani, M. & Plaza, M. (2015).** Compensating for age limits through emotional crossmodal integration. *Frontiers in Psychology*. 6 :691.11.

Ce travail a permis de confirmer que l'association de l'information vocale aux indices faciaux est probablement cruciale chez les adultes âgés et faciliterait la communication. Les résultats de ces travaux ont fait l'objet d'applications concrètes dans le cadre d'interactions humain-machine, notamment dans le contexte du développement de plateformes robotiques en interaction avec des personnes âgées (projet PRAMAD2, « Plateforme d'Assistance et de Maintien au Domicile ») en implémentant une tête robotique avec « retour émotionnel » capable d'exprimer des émotions faciales et vocales simultanément lors d'interactions avec des humains (**Figure 30**).

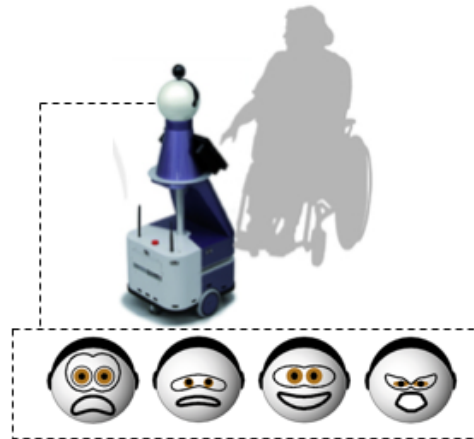


Figure 30. Design du robot du projet PRAMAD et exemples d'expressions faciales (surprise, tristesse, joie, colère) de la tête robotique. Des expressions vocales non-linguistiques accompagnaient simultanément les expressions faciales.

3.8. Aspects perceptifs et expressifs des expressions émotionnelles chez des patients atteints de la maladie Alzheimer

La maladie d'Alzheimer (MA) est caractérisée par des lésions neurodégénératives engendrant une altération des fonctions cognitives associée à des troubles psycho-comportementaux (agressivité, agitation, apathie, dépression, etc.) avec un retentissement sur la vie quotidienne du patient et de ses proches (Derouesné, 2006). L'atteinte du « cerveau social » étant relativement précoce dans cette maladie, il a été suggéré que les troubles psycho-comportementaux pourraient être la manifestation d'un déficit émotionnel relativement global (Bruen, McGeown, Shanks, & Venneri, 2008). Cependant, les études se sont polarisées sur le versant perceptif (identification d'expressions émotionnelles) en laissant de côté le versant productif (production d'expressions émotionnelles). Sur le plan perceptif, même si de rares études ont indiqué une préservation des capacités d'identification des expressions faciales chez les MA (e.g., Bucks & Radford, 2004), la plupart des études s'accordent plutôt sur l'observation de déficits d'identification des expressions faciales, dès un stade léger de la maladie (pour revue, Klein-Koerkamp, Beaudoin, Baciú, & Hot, 2012). Les études portant sur l'identification de la prosodie émotionnelle chez les MA, plus rares, ont également mis en évidence une altération précoce de cette capacité (Horley, Reid, & Burnham, 2010). Néanmoins, dans la vie quotidienne, les patients auraient tendance à se focaliser sur le contexte sémantique pour pallier leurs déficits d'identification de la prosodie émotionnelle (Taler, Baum, Chertkow, & Saumier, 2008). Le versant expressif, quant à lui, n'a suscité que très peu d'intérêt et les rares études sur le sujet ont apporté des résultats contradictoires quant à l'atteinte (Horley et al., 2010; Misiewicz, Brickman, & Tosto, 2018) ou à la préservation (Testa, Beatty, Gleason, Orbelo, & Ross, 2001) des capacités de production de prosodie émotionnelle chez les MA. Les divergences concernant la présence de troubles de la production chez les MA pourraient être liées au fait que les procédures d'analyse reposent essentiellement sur des mesures subjectives (par des juges) plus sujettes aux variations d'interprétations.

Dans ce contexte, afin d'approfondir la compréhension des mécanismes multimodaux émotionnels, **je me suis intéressée aux capacités de perception et de production des expressions émotionnelles de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer (MA) en collaboration avec le service gériatrique du Dr. Patrick Bocquet à l'hôpital Corentin-Celton (Issy les Moulineaux) au cours du Master 2 de Lorraine Templier que j'ai dirigé.** Nous avons comparé les performances de 14 MA (à un stage léger à modéré) à celles de 14 adultes âgés contrôles (**Figure 31**), dans des tâches d'identification d'émotions faciales, vocales (cri, pleurs, etc.) et prosodiques (phrase sémantiquement neutre prononcée avec une certaine intonation émotionnelle) ainsi que dans une tâche de production de prosodie émotionnelle. Plus concrètement, les participants avaient pour consigne de prononcer une phrase avec une certaine intonation émotionnelle (joie, colère ou neutre) en se mettant à la place de personnes évoquées dans de courts scénarii de la

vie de tous les jours²⁸ (**Figure 32**). Nous avons procédé : (i) à une analyse *qualitative* par des observateurs naïfs des phrases produites par les participants ; (ii) à une analyse *quantitative* automatique de marqueurs acoustiques de la voix tels que la hauteur et la variation de hauteur de la voix (fréquence fondamentale - Fo, en Hertz), ainsi que la durée des productions (en millisecondes). Les résultats étaient mis en lien avec les troubles psycho-comportementaux dans la vie quotidienne, mesurés à l'aide de l'inventaire neuropsychiatrique (NPI) –sévérité et de fréquence–, rempli par les soignants et aidants familiaux (pour plus de détails voir [Templier et al., 2015](#)).

Nos résultats ont révélé que, *sur le plan perceptif*, les patients MA présentaient des difficultés d'identification qui concernaient plus particulièrement les expressions vocales (rire, pleurs, etc.) et la prosodie émotionnelle, l'identification des expressions faciales étant moins affectée (**Figure 31**). Ces résultats contredisent certaines données de la littérature chez les patients MA qui indiquaient que les émotions faciales, présentées de façon figée lors des expériences, étaient plus difficilement identifiées que des émotions auditives dynamiques et plus proches de la réalité ([Horley et al., 2010](#)). De façon intéressante, ces difficultés d'identification des expressions émotionnelles sont apparues en lien avec les troubles psycho-comportementaux fréquemment présentés par les patients, extrêmement difficiles à gérer pour les aidants (familiaux et soignants) et déjà connus pour entraîner des difficultés dans les relations interpersonnelles et un certain mal-être ([Shimokawa et al., 2001](#)).

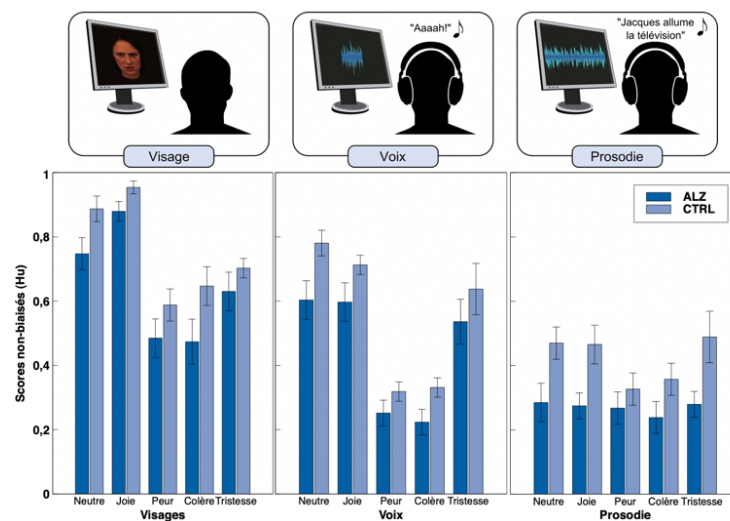


Figure 31. En haut, schéma récapitulant les trois tâches d'identification d'expressions émotionnelles (visage, voix, prosodie) ; En bas, Scores non-biaisés (Hu ; [0-1]) des patients atteints de la maladie d'Alzheimer (MA) et des contrôles (CTRL) pour chaque condition (visage, voix, prosodie). D'après [Chaby et al., 2015](#).

²⁸ Par exemple, « David et Nathalie sont de jeunes parents. Leur premier enfant vient de faire ses premiers pas. Fou de joie, David décide de filmer cette scène. Nathalie voyant David ouvrir le tiroir du bureau lui demande ce qu'il fait ». En vous mettant à la place de David et si vous étiez *heureux* comment prononceriez-vous cette phrase : « *J'apporte la caméra* ».

Sur le plan *productif*, (i) les analyses des paramètres acoustiques ont révélé, chez les MA, une légère réduction des modulations d'intonation de la voix (variation de la fréquence fondamentale) par comparaison aux contrôles, sans modification de la hauteur de la voix ni ralentissement du discours (i.e., la production n'est pas monotone); (ii) les analyses qualitatives (évaluation par des observateurs naïfs) confirment une préservation globale de la production émotionnelle des MA (**Figure 32**). **Ces résultats signifient que des interlocuteurs peuvent être sensibles aux expressions émotionnelles des patients et qu'une communication partagée peut se mettre en place.**

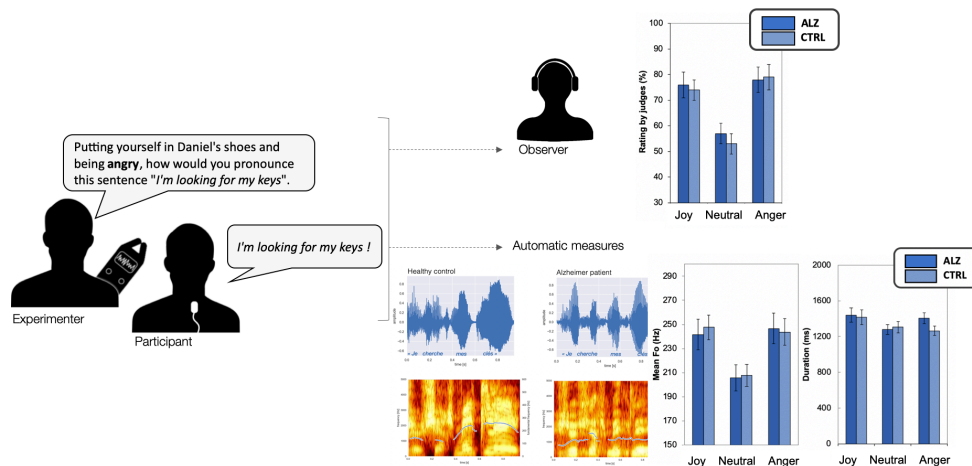


Figure 32. La tâche des participants est de prononcer une phrase en modulant leurs voix avec certaines émotions (joie, neutre, colère). Résultats des analyses qualitatives (scores d'identification correcte par des juges) et quantitatives (fréquence fondamentale F_0 moyenne et durée des productions en ms). D'après [Chaby et al., 2015](#).

Cette relative préservation des capacités de production de prosodie émotionnelle chez les patients est un résultat important pour diverses raisons. Tout d'abord, l'épreuve proposée consistait à écouter un contexte lu par l'expérimentateur, à se mettre à la place du personnage de l'histoire et à produire une phrase avec la prosodie émotionnelle demandée. La réalisation d'une telle tâche implique que le patient comprenne l'histoire, en retienne les éléments importants et surtout puisse faire preuve de capacités d'empathie pour éprouver l'émotion ressentie par le personnage. Ces données concordent avec les résultats d'études indiquant une préservation de la capacité des patients MA à inférer l'état émotionnel d'autrui après avoir regardé des films décrivant une expérience vécue par ces personnes ([Fernandez-Duque, Hodges, Baird, & Black, 2010](#)).

Nous concluons que même si les patients présentent des difficultés pour identifier les expressions émotionnelles d'autrui, ils pourraient, à un stade léger à modéré, « se mettre à la place de » leur interlocuteur quand une situation contextuelle est donnée et produire plus facilement le message émotionnel adéquat. Nous suggérons que ces éléments soient mieux évalués, pris en charge, et fassent l'objet d'informations aux aidants familiaux et de formations aux soignants qui se sentent souvent démunis.

- [Templier, L., Chetouani, M., Plaza, M., B lot, Z., Boquet, P & Chaby, L. \(2014\). Altered identification with relative preservation of emotional prosody production in patients with Alzheimer's disease. *Geriatr Psychol Neuropsychiatr Vieil*, 13\(1\), 106-115.](#)

Points Clés :

Pour une approche multimodale des processus émotionnels

- L'intégration multimodale émotionnelle fournit un cadre théorique qui permet d'envisager différemment certaines affections neurodéveloppementales ou neurologiques, pas seulement en termes de pertes mais aussi de gains et de processus compensatoires.
- Elle peut être un élément important dans l'évaluation des troubles et/ou la préservation des fonctions dans différentes pathologies, notamment les troubles du spectre de l'autisme et les gliomes de bas grade.
- Le versant perceptif et productif des émotions des patients doit être pris en compte, mieux évalué et intégré dans la prise en charge.
- Chez les personnes en bonne santé, y compris les personnes âgées, l'intégration de stimuli émotionnels simultanés et congruents, issus de différentes modalités sensorielles, permet un gain comportemental au plan des performances d'identification.

« Je suis les liens que je tisse avec les autres »
Albert Jacquard

Troisième partie

Perspectives de recherche

Mes projets de recherche pour les années à venir visent à étudier la dynamique des interactions sociales dans une perspective *lifespan*. Je présenterai ici trois projets de recherche dont deux seront financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Le premier, le projet In-PACT (en cours de contractualisation), « *Individual personality traits and emotions in the Perception-ACTION Loop* », coordonné par Dorine Vergilino-Perez, répond, comme on va le voir, à un « challenge » théorique dans le champ de la psychologie cognitive. Le deuxième projet (financement partiel de l'INSEAD Sorbonne Université) que je coordonne, répond à des questions théoriques et sociétales autour des interactions sociales non-verbales au cours du vieillissement. Le troisième, le projet Virtu-ALZ (ANR-17-CE19-0028) « *Virtual Patient Simulation Tool for Training Health and Social Care Staff Working with People with Alzheimer's Disease or Related Dementias* », coordonné par Anne-Sophie Rigaud, répond à un défi plus sociétal et appliqué au champ de la santé et du bien-être. Ces travaux impliquent le travail d'au moins deux doctorants –Angélique Lebert (Université de Paris), co-encadrée par Dorine Vergilino-Perez et moi-même, ainsi que Jean Zagdoun (Sorbonne Université), co-encadré par Mohamed Chetouani et moi-même–, et d'un post-doctorant sous ma direction (en cours de recrutement).

Au travers des différents travaux que j'ai menés, j'ai pu démontrer : (i) l'existence d'une dynamique de la perception sociale (George et al., 2005) au cours du développement *lifespan*, se traduisant après l'âge de 50 ans (Chaby, 2004; Chaby et al., 2009) par des difficultés de perception socio-émotionnelle (i.e., de stimuli unimodaux) associées à des réorganisations cérébrales (Chaby et al., 2003) et/ou des adaptations du répertoire stratégique (Chaby et al., 2011; Chaby et al., 2017) ; (ii) l'existence de processus intégratifs émotionnels –liant vision et audition– qui viennent faciliter le comportement, notamment chez les personnes âgées (Chaby, 2012; Chaby et al., 2015) ; (iii) une cartographie des situations de perception ou de production émotionnelles affectées vs. épargnées par des pathologies neurodéveloppementales (Chaby et al., 2012), telles que les TSA (Vannetzel et al., 2011; Xavier et al., 2017b, 2015; Cohen et al., 2017; Grossard et al., 2018, 2017), ou par des pathologies neurologiques telles que les GBG (Plaza et al., 2013, 2014; du Boullay et al., 2013; Luherne-du Boullay et al., 2014; Luherne-du Boullay, 2015) ou la maladie d'Alzheimer (Templier et al., 2015). Ces derniers travaux ont permis de faire des progrès dans nos connaissances sur les manifestations complexes de ces pathologies qui altèrent, au quotidien, les interactions sociales et la qualité de vie des patients et de leurs proches.

Ces données renforcent l'idée qu'une compréhension plus profonde des mécanismes impliqués dans les interactions sociales (i.e., le lien qui nous unit à l'autre) passe par un examen des signaux sociaux mis en jeu, tant sur le versant de la perception que sur celui de l'action (i.e., les signaux sociaux perçus et produits par l'humain) ainsi que de leurs liens réciproques. Dans le cadre de l'approche motivationnelle des émotions, il a déjà été montré que le rôle de l'émotion (littéralement 'mettre en mouvement', *emovere*) ne se résume pas à informer l'individu sur le monde, mais viendrait modifier sa relation au monde et faciliter son passage à l'action (Frijda, 2005; Elliot et al., 2013). Dans un contexte d'interaction sociale, il est ainsi possible de réguler sa distance interpersonnelle avec des actions d'approche ou d'évitement, ou de rigidifier sa posture (*freezing*) lorsque les émotions sont très intenses. Une interaction sociale est donc constituée d'une boucle interactive dynamique qui, pour être efficace, nécessite un ajustement continu à l'autre (De Jaegher et al., 2010). Cette synchronie interactionnelle se développe de façon graduelle chez l'enfant (Feldman, 2007) et est essentielle à la communication émotionnelle et au développement de la cognition sociale, qui permet notamment de pouvoir interpréter et inférer les états mentaux d'autrui et de prédire leurs actions (Xavier, Magnat, Sherman, Cohen, Chaby, 2016). En psychologie, dans le champ de l'étude de la cognition sociale, les paradigmes expérimentaux typiques consistent pourtant à demander au participant de traiter, de façon passive, des stimuli sociaux (photo, audio, vidéo), sans ou peu d'engagement social ou émotionnel. Ces types de paradigmes peuvent être considérés comme des études de la cognition sociale 'hors ligne', du point de vue de l'observateur isolé et détaché sur le plan social, ce qui ne reflète que partiellement la dynamique et la complexité des interactions sociales (De Jaegher et al., 2010; Schilbach et al., 2013). Dans le champ de l'informatique des émotions (*affective computing*) et de la robotique sociale (*social robotics*), on a au contraire vu émerger l'utilisation d'agents virtuels ou de robots humanoïdes dits 'sociaux' afin d'analyser, modéliser ou générer des comportements sociaux-émotionnels dans différents contextes d'interactions sociales « humain-machine »

(Dautenhahn, 2007; Pennisi et al., 2016; Cohen et al., 2017). Bien qu'il ait été souligné l'importance des environnements virtuels et/ou interactifs pour étudier la cognition sociale en situation plus 'naturelle', ce type d'approche n'a été que peu utilisé en psychologie (Schilbach, 2015; Parsons et al., 2017). Ainsi, bien que les interactions sociales soient un objet de recherche largement pluridisciplinaire (psychologie, neurosciences, sciences computationnelles, informatique affective, robotique sociale), les disciplines ont jusque-là surtout mené des efforts isolés (Allen et al., 2017).

Mes projets de recherches²⁹, dans la continuité des travaux que j'ai menés jusqu'à présent, **viseront à mieux comprendre** –dans une perspective lifespan– **la place des émotions dans la dynamique des interactions sociales**. Pour cela, je propose : (i) **un cadre expérimental** où le participant se trouvera dans des situations demandant un certain niveau d'engagement social lors de situations d'interactions 'structurées' (tâches impliquant l'imitation, la production émotionnelle sur demande ou l'ajustement de la distance interpersonnelle) ou lors d'interactions 'dynamiques' (échanges interactifs) ; (ii) **un cadre conceptuel** de recherche qui cherchera à analyser, modéliser voire prédire les signaux sociaux multimodaux perçus, produits ou échangés par l'humain, pas toujours objectivables avec les seules méthodes de la psychologie. **Les différents niveaux d'analyse (Figure 33)** concerneront à la fois (a) la **perception** et (b) **l'action du participant** (i.e. expressions faciales, vocales, ajustements posturaux). En outre, afin de considérer la diversité des formes que peuvent prendre ces comportements sociaux pour une même situation, nous prendrons en compte au travers des différents projets (c) les **traits individuels** (anxiété, traits de personnalité, etc.) des participants, comme modulateurs du fonctionnement socio-émotionnel. Ces projets devraient fournir une occasion unique de parvenir à une vision intégrative de la place des émotions et des traits de personnalité dans la perception et la production de comportement sociaux lors des interactions.

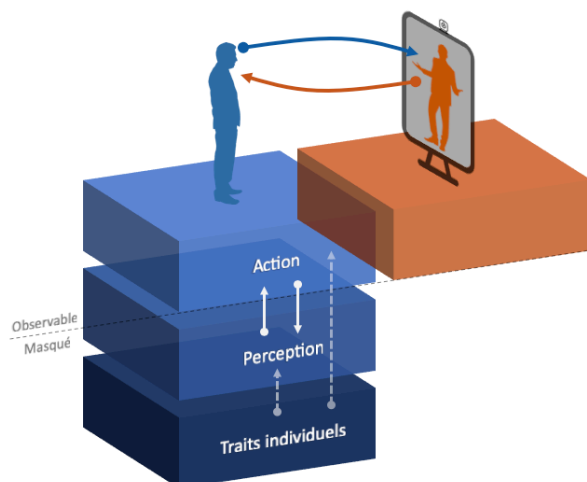


Figure 33. Cadre conceptuel proposé pour les futures recherches. Les analyses chercheront à caractériser les comportements multimodaux (faciaux, vocaux, posturaux) non-verbaux tant du point de vue perceptif (Perception) que productif (Action), en prenant en compte les différences individuelles (Traits individuels).

²⁹ Ces projets s'inscrivent dans les thématiques de l'équipe Perception, Interaction et Robotique Sociale (PIRoS), qui propose une approche unique en France visant à faire converger robotique sociale, traitement du signal social, science cognitive, psychiatrie et psychologie.

1. Vers une meilleure compréhension des liens entre *perception* des émotions et tendances à l'*action*

Cet axe de travail répond à un challenge théorique dans le champ de la psychologie cognitive qui vise à mieux comprendre comment les systèmes de perception et d'action sont étroitement couplés afin d'interagir avec l'environnement de façon intégrative (Warren, 2006; Whittall & Clark, 2018). Une partie des études envisagées a été formalisée avec le **projet In-PACT** « *Individual personality traits and emotions in the Perception-ACTION Loop* » (en cours de contractualisation par l'ANR). Dans le contexte de l'approche motivationnelle des émotions, bien que les émotions puissent être vues comme une interface entre l'individu et son environnement, elles n'ont jamais été examinées à travers le prisme de la boucle perception-action. Plus concrètement, s'il a été en partie observé que la perception des émotions affecte les tendances à l'action (i.e., en augmentant ou réduisant la distance à l'autre), il n'a jamais été évalué comment, en retour, les tendances à l'action peuvent moduler la perception des émotions, ni comment certaines caractéristiques individuelles (e.g. anxiété, traits de personnalité) peuvent moduler ces relations. Récemment, il a été suggéré que le système de contrôle postural impliqué dans le maintien d'une posture debout stable puisse servir de cadre de référence pour la *perception* et l'*action* de l'humain en relation avec le monde extérieur (Lelard et al., 2019). Dans ce contexte, la posturographie peut être utilisée pour mesurer les déplacements du centre de pression (COP) du corps en position debout afin de quantifier la préparation à l'action (Horslen & Carpenter, 2011). Chez l'adulte en bonne santé, la perception de visages exprimant la joie *versus* le dégoût (Gea et al., 2014; Perakakis et al., 2012) induit respectivement un léger balancement du corps vers l'avant (approche) ou vers l'arrière (évitement), mais les patterns associés à d'autres émotions sont encore débattus. Ces résultats apparemment contradictoires pourraient être dus à des différences dans les traits individuels (e.g., anxiété sociale) des participants (Roelofs al., 2010). En revanche, aucune étude ne s'est encore intéressée à l'influence des tendances à l'action sur la perception des émotions.

Le principal objectif de ce projet est de comprendre comment la *perception* des émotions et les tendances à l'*action* sont mutuellement couplées, et d'examiner comment les *traits individuels* tels que l'*anxiété* ou les *traits de personnalité* peuvent moduler ces relations. Nous postulons que (i) les tendances à l'approche et à l'évitement, considérées comme la volonté de diminuer ou d'augmenter la distance physique avec autrui devraient induire des changements perceptifs chez l'observateur et que (ii) les traits individuels renforçant les tendances à l'action devraient induire des performances différentes dans des tâches mesurant la perception ou l'action. Nous testerons ces hypothèses en combinant sur un grand nombre de participants (a) des mesures posturographiques (i.e. des ajustements posturaux, à l'aide d'une plateforme de force) et oculographiques (i.e. stratégies oculaires, à l'aide d'un système d'eyetracking), (b) des performances dans différentes tâches perceptives (jugement de la distance à autrui ou de la direction du regard), le participant étant debout en situation de face-à-face avec un agent virtuel (**Figure 35**), et (c) des réponses à des auto-questionnaires mesurant les traits individuels (i.e. anxiété, colère, traits de personnalité).



Figure 34. Cadre expérimental du projet. Les participants sont placés debout sur une plateforme de force (enregistrement posturographiques) en situation de face-à-face avec un agent virtuel. Certaines études impliquent des enregistrements oculographiques.

Ce projet sera réalisé notamment dans le cadre du travail de doctorat d'**Angélique Lebert** (thèse de Psychologie, Université de Paris), co-encadrée par Dorine Vergilino-Perez et moi-même, ainsi que dans le cadre du **projet In-PACT** «*Individual personality traits and emotions in the Perception-ACTION Loop*», qui vient d'être financé par l'ANR et pour lequel un **post-doctorant** (en sciences cognitives) **sera recruté sous ma direction à l'ISIR.**

La partie plus clinique du projet a démarré lors du Master 2 d'Angélique Lebert, que j'ai co-encadré avec Dorine Vergilino-Perez, auprès d'enfants porteurs d'un kyste de la fosse postérieure³⁰ pouvant entraîner une forte compression du cervelet (structure impliquée dans les fonctions motrices comme le contrôle postural, et les traitements cognitifs et affectifs). L'objectif de cette étude est d'examiner l'interaction entre émotion et contrôle postural (enregistré via une plateforme de force), en lien avec les profils neuropsychologiques individuels des enfants. Les premiers résultats (**Figure 34**) montrent que certains patients, contrairement aux enfants typiques, présentent une forte instabilité posturale au repos majorée lors de la visualisation de visages émotionnels et des tendances à l'action spécifiques (approche, évitement, immobilisation) qui variaient selon les émotions et certaines caractéristiques individuelles telles que l'état socio-émotionnel du patient (i.e. anxiété, agressivité) et la socialisation dans la vie quotidienne.

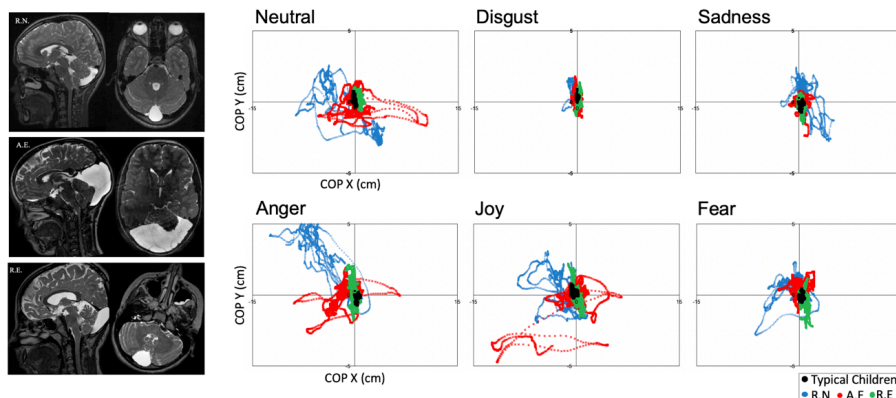


Figure 35. Kystes de la fosse cérébrale postérieure visibles sur l'IRM de 3 patients ; Déplacements du corps dans les directions X et Y des enfants typiques (en noir) et des 3 patients. D'après [Lebert et al., 2019](#).

³⁰ Collaboration en cours avec Marie-Laure Cuny, neuropsychologue à l'Hôpital Necker enfants malades.

Ce travail, qui sera poursuivi lors du doctorat d'Angélique Lebert, suggère que des mesures fines de l'instabilité posturale (à l'aide d'enregistrements posturographiques) permettraient d'améliorer le bilan de certains patients en offrant des indices moteurs (j'entends par là, une sorte de « signature » motrice), souvent invisibles à l'œil du clinicien, mais qui peuvent avoir d'importantes répercussions dans les interactions sociales au quotidien.

Ce projet a fait l'objet d'une communication affichée en 2018 et d'une communication orale (SOFPEL 2018) ; pour ce travail **Angélique Lebert** a également obtenu le prix « Bourse sur Projet 2018 » et « Bourse de voyage outre-Atlantique de la Francophonie 2019 ». Un article de revue sur les liens entre émotion & posture est à paraître en décembre 2019 dans Revue de Neuropsychologie.

- [Lebert, A., Vergilino-Perez, D. & Chaby, L. \(2019\). Pour une meilleure compréhension des liens réciproques entre émotion et posture. Revue de Neuropsychologie. 11\(2\). Sous presse.](#)

2. Perception et production des expressions émotionnelles au cours du vieillissement

Ce projet répond à des questions théoriques et sociétales fortes autour du « bien vieillir », en parties liées à l'augmentation du nombre de personnes âgées dans les prochaines années. On estime qu'en 2050, 16% de la population mondiale aura plus de 65 ans. Les clichés liés au vieillissement sont tenaces, et outre le sentiment d'une santé plus fragile des seniors, le vieillissement est également très souvent associé à des stéréotypes négatifs tels que la solitude, l'isolement et les affects négatifs ([Chaby, 2012](#)). Mieux comprendre les spécificités du comportement socio-émotionnel avec l'âge permettrait de fournir de nouvelles perspectives pour réfléchir à la planification à long terme de la vie en bonne santé et à certaines clés du « bien vieillir ».

Cependant, il n'est pas encore aisé aujourd'hui de fournir des conclusions claires quant aux effets du vieillissement sur les interactions sociales, celles-ci nécessitant la perception et la production de nombreux signaux sociaux et se caractérisant par une réciprocité des actions. Des études récentes ont justement montré que des interactions sociales régulières (i.e, activités de loisirs, communication *via* à un réseau social, échanges sociaux) constitueraient un facteur clé de protection contre le déclin cognitif ([Kelly et al., 2017](#)). Plus concrètement, si comme nous l'avons déjà évoqué, l'identification des expressions émotionnelles a été assez bien caractérisée –dans des contextes de perception passive uniquement–, l'étude de la production émotionnelle est restée jusque-là quasi ignorée dans le champ du vieillissement. Quelques rares études ont toutefois observé, qu'avec l'avancée en âge, les expressions faciales deviendraient moins marquées ou plus ambiguës ([Hess et al., 2012](#); [Ruffman et al., 2019](#)). Par ailleurs, bien que les propriétés de la voix ([Templier et al., 2015](#)) et le contrôle postural ([Cattagni et al., 2016](#)) soient modifiés avec l'âge, l'expression des émotions au travers de ces deux modalités n'ont pas été explorées.

Le principal objectif de ce projet est de combler la vision parcellaire de la communication non-verbale des émotions au cours de l'âge adulte, en examinant les différences liées à l'âge dans le traitement multimodal d'émotions (visage, voix, posture) sur les plans perceptif et expressif, dans différents contextes d'interaction sociale. Nous postulons que (i) les expressions émotionnelles produites par les adultes âgés seront moins prototypiques et plus variables que celles des jeunes adultes ; (ii) les expressions émotionnelles seront mieux détectées par les adultes âgés dans un contexte d'interaction sociale dynamique ; (iii) les traits individuels (anxiété, personnalité) viendront moduler ces résultats. Nous testerons ces hypothèses sur une population d'adultes âgés de 20 à 80 ans dans des environnements immersifs ou interactifs, en examinant (a) la *production* des expressions émotionnelles à l'aide de méthodes à l'interface de la psychologie et du traitement du signal social : analyses des expressions faciales, vocales ou posturales via des annotations par des juges ou via des algorithmes de détection automatiques des contractions/relâchements des muscles faciaux, des mouvements du corps ou d'analyse de la prosodie ; (b) la *perception* des expressions émotionnelles en combinant mesure comportementales et oculographiques (i.e., mesure des stratégies oculaires à l'aide d'un système d'eyetracking) ; (c) les réponses à des auto-questionnaires mesurant les *traits individuels* des participants (i.e. anxiété, traits de personnalité).

Une première étude (**Figure 36**) portera plus spécifiquement sur l'expression des émotions dans une situation d'interaction « structurée », le participant ayant pour consigne d'observer un acteur exprimant des émotions multimodales (phase pendant laquelle nous mesurerons l'expression spontanée, *facial mimicry*), puis d'imiter sur demande l'expression de l'acteur (phase pendant laquelle nous mesurerons l'expression exprimée, *posed emotion*) et d'identifier l'émotion exprimée par l'acteur.

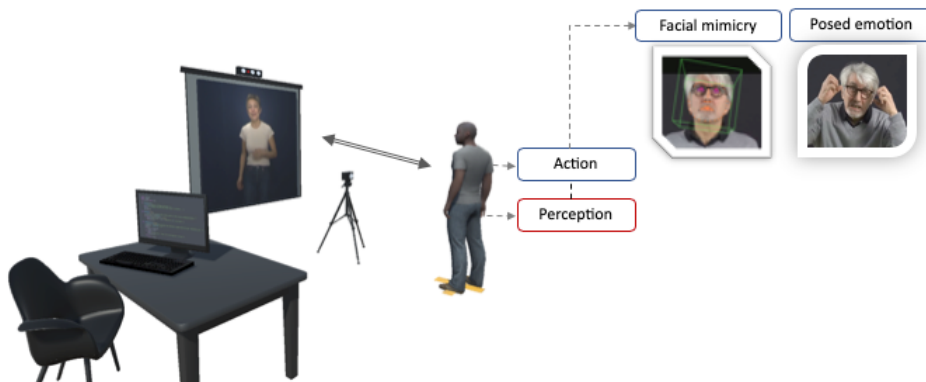


Figure 36. Cadre expérimental du projet. Les participants sont placés debout, dans un environnement immersif en situation d'interaction « structurée » avec analyse de la production spontanée (*facial mimicry*) et la production sur demande par imitation (*posed emotion*).

Une deuxième étude sera réalisée dans le cadre d'une collaboration avec Ali Oker (Université de Reims Champagne-Ardenne) et fait l'objet d'un financement partiel de l'INSEAD (Sorbonne Université) pour l'indemnisation des participants. **Cette étude portera plus spécifiquement sur les changements perceptifs liés à l'âge dans une situation d'interaction sociale « dynamique ».** Nous suggérons qu'une analyse (i.e. à l'aide de mesures oculométriques) de toute la dynamique interactive, fournira un tableau plus complet, qu'une analyse des stratégies visuelle en situation d'observation « passive » du seul visage exprimant des émotions (photo ou vidéo) isolées. Dans la vie réelle, le regard, qualifié « d'interactif », permet l'échange de comportements sociaux (Emery, 2000) qui doivent être mieux évalués sur le plan de la recherche. L'étude de cette interaction sociale « en ligne » sera abordée en utilisant un environnement virtuel, qui a l'avantage de pouvoir générer des stimuli réalistes et dynamiques, et qui offre un bon compromis entre le contrôle expérimental et une interaction « naturelle » (Wykowska et al., 2016; Oker et al., 2018). Pour cela nous exploiterons la plateforme Greta/VIB (Pecune et al., 2014) afin d'animer un agent virtuel capable de parler et d'exprimer différentes émotions, ce qui nous permettra de créer un scénario d'interaction sociale simple, comprenant une série d'échanges de questions-réponses, incluant l'identification par le participant des expressions émotionnelles de l'agent (Figure 37).

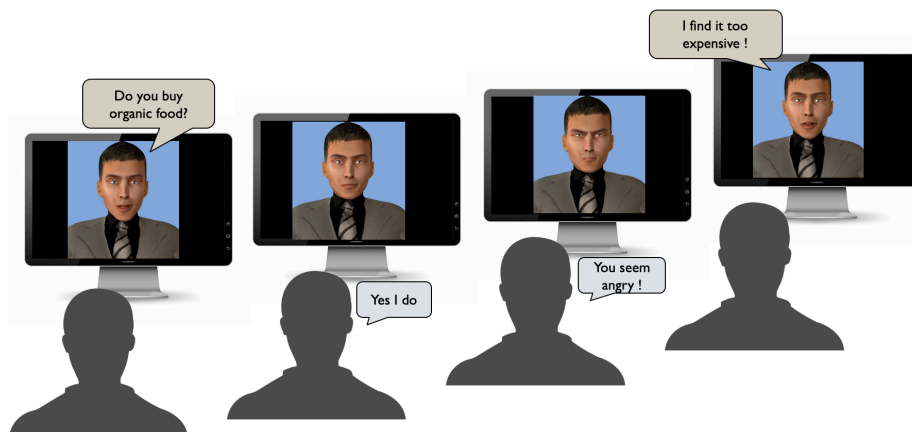


Figure 37. Cadre expérimental du projet. Les participants sont placés face à un agent virtuel affectif et réactif, dans un échange verbal de type questions-réponses.

Un pilote de ce projet a été réalisé pendant le Master de **Katarina Pavic** (Master de Psychologie, Université de Paris). Le projet est financé en partie par l'INSEAD, Behavior Lab (Sorbonne Université).

3. Interaction humain-machine : un petit pas vers un changement de paradigme

Cet axe de travail a été formalisé avec le projet **VirtuALZ** « *Virtual Patient Simulation Tool for Training Health and Social Care Staff Working with People with Alzheimer's Disease or Related Dementias* », qui répond à un défi sociétal dans le champ de la santé, celui de favoriser la communication entre les soignants et les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer ou maladies apparentées. La maladie d'Alzheimer représente un enjeu capital de santé publique, avec en France, un nombre de malades estimé à 1 million, et jusqu'à 2 à 3 millions de personnes concernées si l'on inclut les aidants et les soignants (Mura et al., 2010). Outre les troubles cognitifs, la maladie est associée à des troubles de l'humeur et du comportement tels que la dépression, l'anxiété, l'apathie, et l'agitation ou l'agressivité (David et al., 2010; Zhao et al., 2016), qui engendrent des problèmes d'interactions sociales (Shimokawa et al., 2001), contribuent au « fardeau » des aidants et des soignants (D'Onofrio et al., 2015; Martinez et al., 2018) et à une hospitalisation ou institutionnalisation accrues. Depuis quelques années, la Haute Autorité de Santé (HAS) s'est engagée sur ce sujet majeur afin d'améliorer la prise en charge et l'accompagnement des malades d'Alzheimer et de leurs proches. Plus concrètement, afin d'offrir aux patients une prise en charge adaptée, un enjeu actuel est à la fois d'améliorer la communication et les interactions sociales des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, mais également de mieux former les soignants en leur permettant de mieux comprendre les réactions du patient et d'adopter la bonne attitude face à ses comportements. Dans ce contexte, les technologies numériques au service de la santé (i.e., jeux sérieux, agents virtuels, etc.), à des fins d'évaluation ou de prise en charge ou de formation, offrent des perspectives particulièrement intéressantes, même si elles posent un certain nombre de défis techniques et éthiques. Concernant la prise en charge, quelques études en gériatrie ont montré que les agents virtuels constitueraient un moyen intéressant pour faciliter les interactions et renforcer le lien social avec les proches (Ortiz et al., 2007; Loued et al., 2016) ou favoriser l'alliance thérapeutique chez des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer (Carrasco et al., 2008). Concernant la formation des soignants, les solutions proposées sont relativement limitées aux seules recommandations de bonne pratique de la HAS (HAS, 2009) ou à des formations en ligne ne permettent pas vraiment la « mise en situation » (Griffiths et al., 2018). Le développement de solutions innovantes dans de secteur de l'e-santé, avec des interfaces intelligentes entre l'humain et le numérique, s'est donc largement focalisé sur les interactions « patient-agent virtuel », l'agent virtuel étant le plus souvent un simple interlocuteur virtuel ou un conseiller de santé virtuel

L'objectif de ce projet, qui comprend la collaboration entre plusieurs partenaires³¹, est de proposer un changement de paradigme dans l'étude et l'amélioration de la relation et des interactions entre patients et soignants, avec le développement d'un programme éducatif reposant sur une interface « soignant-agent » (i.e. *l'humain* est le soignant –

³¹ Le service gériatrique de l'Hôpital Broca (i.e. scénarii cliniques, lieu de formation des soignants), l'entreprise SimforHealth (i.e. développement de la plateforme virtuelle de formation), le Centre Interuniversitaire de Recherche en Éducation (i.e. mise en place de scénarii cliniques et d'analyses des pratiques), le LIMSI (i.e. génération de comportements de l'agent virtuel « affectif » et « réactif » au comportement du soignant) et l'ISIR (i.e. analyse et modélisation des comportements du soignant).

infirmier(e)s, aides soignant(e)s- ; *l'agent virtuel* simule les comportements d'un patient au profil maladie d'Alzheimer). Plus concrètement, il s'agit : (i) de permettre au soignant une mise en pratique à l'aide des scénarii interactifs proches de la réalité clinique (i.e. comportements plus ou moins coopératifs du patient et réponses/comportements du soignant) ; (ii) de fournir au soignant un *feedback* sur son interaction avec le patient virtuel afin de lui permettre d'engager une réflexion sur ses pratiques. **Notre contribution sera en grande partie consacrée (i) à l'analyse en temps réel et à la modélisation de la dynamique des comportements non-verbaux du soignant (i.e., expressions faciales, prosodie, gestes, distance interpersonnelle) placé debout dans une situation d'interaction avec le patient virtuel ; (ii) à l'analyse de l'effet des traits ou caractéristiques individuels des soignants (i.e., empathie, traits de personnalité, niveau d'expertise –novice/expert– du soignant, niveau de fardeau du soignant) sur la modulation sur ses comportements non-verbaux.**



Figure 38. Cadre expérimental du projet. Les soignants sont placés dans une pièce munie de capteurs (caméra, micro) face à un patient virtuel affectif et réactif.

Ce projet sera réalisé notamment dans le cadre du travail de **doctorat de Jean Zagdoun** (thèse en informatique, Sorbonne Université), co-encadré par Mohamed Chetouani et moi-même et recruté dans le cadre du **projet Virtu-ALZ** « Virtual Patient Simulation Tool for Training Health and Social Care Staff Working with People with Alzheimer's Disease or Related Dementias », financé par l'ANR (ANR-17-CE19-0028).

Pour finir, sur le plus long terme, j'aimerais également avoir l'opportunité de développer des partenariats avec des entreprises, afin de mettre mon expertise scientifique au service de projets à fort impact sociétal dans le domaine de la santé. Dans ce contexte, (i) un premier projet serait consacré aux développements de paradigmes comportementaux d'évaluation des troubles du regard social, en collaboration avec une entreprise développant un système d'eyetracking permettant d'interagir en temps réel par le regard (i.e. un premier projet déposé sous mon nom en tant que porteur auprès de l'ANR est en cours de maturation) ; (ii) un deuxième projet serait consacré à valider l'induction émotionnelle par réalité virtuelle (en collaboration avec une entreprise de réalité virtuelle) comme une technologie positive visant à améliorer les expériences personnelles et interpersonnelles des personnes âgées fragiles. Ce projet a été déposé à l'ANRT et devrait faire l'objet du travail thèse de Katarina Pavic (contrat Cifre).

Références

- Adams Jr, R. B., & Kleck, R. E. (2005). Effects of direct and averted gaze on the perception of facially communicated emotion. *Emotion*, 5(1), 3.
- Adolphs, R. (2002). Recognizing Emotion from Facial Expressions: Psychological and Neurological Mechanisms. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 1(1), 21–62.
- Adolphs, R. (1999). Social cognition and the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(12), 469–479.
- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature Reviews: Neuroscience*, 4(3), 165–178.
- Adolphs, Ralph, & Anderson, D. J. (2018). *The neuroscience of emotion: a new synthesis* (Princeton).
- Adolphs, Ralph, Schul, R., & Tranel, D. (1998). Intact recognition of facial emotion in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 12(2), 253.
- Adrien, J. L., Lenoir, P., Martineau, J., Perrot, A., Hameury, L., Larmande, C., & Sauvage, D. (1993). Blind ratings of early symptoms of autism based upon family home movies. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 32(3), 617–626.
- Allen, J. A., Fisher, C., Chetouani, M., Ming Chiu, M., Gunes, H., Mehu, M., & Hung, H. (2017). Comparing Social Science and Computer Science Workflow Processes for Studying Group Interactions. *Small Group Research*, 48(5), 1046496417721747.
- Allen, J. S., Bruss, J., Brown, C. K., & Damasio, H. (2005). Normal neuroanatomical variation due to age: the major lobes and a parcellation of the temporal region. *Neurobiology of Aging*, 26(9), 1245–1260.
- Allison, T., Puce, A., Spencer, D., & McCarthy, G. (1999). Electrophysiological Studies of Human Face Perception. I: Potentials Generated in Occipitotemporal Cortex by Face and Non-face Stimuli. *Cerebral Cortex*, 8, 431–444.
- Almeling, L., Hammerschmidt, K., Sennhenn-Reulen, H., Freund, A. M., & Fischer, J. (2016). Motivational Shifts in Aging Monkeys and the Origins of Social Selectivity. *Current Biology*, 26(13), 1744–1749.
- Ambadar, Z., Schooler, J. W., & Cohn, J. F. (2005). Deciphering the Enigmatic Face: The Importance of Facial Dynamics in Interpreting Subtle Facial Expressions. *Psychological Science*, 16(5), 403–410.
- Anastasi, J. S., & Rhodes, M. G. (2005). An own-age bias in face recognition for children and older adults. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 1043–1047.
- Andrewes, D. G., Kaye, A., Murphy, M., Harris, B., Aitken, S., Parr, C., & Bates, L. (2003). Emotional and social dysfunction in patients following surgical treatment for brain tumour. *Journal of Clinical Neuroscience*, 10(4), 428–433.
- Andrews, T. J., & Ewbank, M. P. (2004). Distinct representations for facial identity and changeable aspects of faces in the human temporal lobe. *NeuroImage*, 23(3), 905–913.
- Audiffren, M., André, N., & Albinet, C. (2011). Effets positifs de l'exercice physique chronique sur les fonctions cognitives des seniors: bilan et perspectives. *Revue de Neuropsychologie*, 3(4), 207–225.
- Axelrod, V., & Yovel, G. (2015). Successful decoding of famous faces in the fusiform face area. *PLoS ONE*, 10(2).
- Baena, E., Allen, P. A., Kaut, K. P., & Hall, R. J. (2010). On age differences in prefrontal function: the importance of emotional/cognitive integration. *Neuropsychologia*, 48(1), 319–333.
- Baltes, P. B., Reese, H. W., & Lipsitt, L. P. (1980). Life-Span Developmental Psychology. *Annual Review of Psychology*, 31(1), 65–110.
- Barber, S. J., Opitz, P. C., Martins, B., Sakaki, M., & Mather, M. (2016). Thinking about a limited future enhances the positivity of younger and older adults' recall: Support for socioemotional

- selectivity theory. *Memory & Cognition*, 44, 869–882.
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind”? *Cognition*, 21(1), 37–46.
- Barrett, L. F., Mesquita, B., & Gendron, M. (2011). Context in emotion perception. *Current Directions in Psychological Science*.
- Barry, C., Johnston, R. A., & Scanlan, L. C. (1998). Are Faces “Special” Objects? Associative and Semantic Priming of Face and Object Recognition and Naming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 51(4), 853–882.
- Bartlett, J. C., & Fulton, A. (1991). Familiarity and recognition of faces in old age. *Memory & Cognition*, 19(3), 229–238.
- Bartlett, J. C., & Leslie, J. E. (1986). Aging and memory for faces versus single views of faces. *Memory & Cognition*, 14(5), 371–381.
- Barton, J., Corrow, S., & Dalrymple, K. (2016). Prosopagnosia: current perspectives. *Eye and Brain*, Volume 8, 165–175.
- Batty, M., & Taylor, M. J. (2006). The development of emotional face processing during childhood. *Developmental Science*, 9(2), 207–220.
- Baudouin, J.-Y., Gallay, M., Durand, K., & Robichon, F. (2010). The development of perceptual sensitivity to second-order facial relations in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 107(3), 195–206.
- Baudouin, J. Y., Chambon, V., & Tiberghien, G. (2009). Expert en visages ? Pourquoi sommes-nous tous... des experts en reconnaissance des visages. *Evolution Psychiatrique*, 74(1), 3–25.
- Bayet, L., Pascalis, O., & Gentaz, É. (2014). Le développement de la discrimination des expressions faciales émotionnelles chez les nourrissons dans la première année. *L'Année Psychologique*.
- Beaudry, O., Roy-Charland, A., Perron, M., Cormier, I., & Tapp, R. (2014). Featural processing in recognition of emotional facial expressions. *Cognition and Emotion*, 28(3), 416–432.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., & McCarthy, G. (1996). Electrophysiological Studies of Face Perception in Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(6), 551–565.
- Bentin, S., & Golland, Y. (2002). Meaningful processing of meaningless stimuli: The influence of perceptual experience on early visual processing of faces. *Cognition*, 86(1).
- Bentin, S., Sagiv, N., Mecklinger, A., Friederici, A., & Von Cramon, Y. D. (2002). Priming visual face-processing mechanisms: Electrophysiological evidence. *Psychological Science*, 13(2), 190–193.
- Benton, A. L., & Van Allen, M. W. (1968). Impairment in Facial Recognition in Patients with Cerebral Disease. *Cortex*, 4(4), 344–358.
- Berlinger, M., Bottini, G., Danelli, L., Ferri, F., Traficante, D., Sacheli, L., ... Paulesu, E. (2010). With time on our side? Task-dependent compensatory processes in graceful aging. *Experimental Brain Research*, 205(3), 307–324.
- Bernard-Opitz, V., Sriram, N., & Nakhoda-Sapuan, S. (2001). Enhancing Social Problem Solving in Children with Autism and Normal Children Through Computer-Assisted Instruction. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(4), 377–384.
- Bindemann, M., & Sandford, A. (2011). Me, myself, and I: Different recognition rates for three photo-IDs of the same person. *Perception*, 40(5), 625–627.
- Blair, R. J. R. (2005). Responding to the emotions of others: Dissociating forms of empathy through the study of typical and psychiatric populations. *Consciousness and Cognition*.
- Bodamer, J. (1947). Die Prosop-Agnosie. *Archiv Für Psychiatrie Und Nervenkrankheiten Vereinigt Mit Zeitschrift Für Die Gesamte Neurologie Und Psychiatrie*, 179(1–2), 6–53.
- Bombardi, D., Schmid, P. C., Schmid Mast, M., Birri, S., Mast, F. W., & Lobmaier, J. S. (2013). Emotion recognition: The role of featural and configural face information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Bonnet, A.-M., Czernecki, V., & Hergueta, T. (2013). *La maladie de Parkinson: au-delà des troubles*

moteurs. John Libbey Eurotext.

- Bonnetblanc, F., Desmurget, M., & Duffau, H. (2006). Gliomes de bas grade et plasticité cérébrale- Implications fondamentales et cliniques. *Médecine/Sciences*, 22(4), 389–395.
- Bötzel, K., Schulze, S., & Stodieck, S. R. G. (1995). Scalp topography and analysis of intracranial sources of face-evoked potentials. *Experimental Brain Research*, 104(1), 135–143.
- Boutet, I., & Faubert, J. (2006). Recognition of faces and complex objects in younger and older adults. *Memory & Cognition*, 34(4), 854–864.
- Boutet, I., & Meinhardt-Injac, B. (2018). Age Differences in Face Processing: The Role of Perceptual Degradation and Holistic Processing. *The Journals of Gerontology: Series B*, 00, 1–10.
- Boutet, I., Taler, V., & Collin, C. A. (2015). On the particular vulnerability of face recognition to aging: a review of three hypotheses. *Frontiers in Psychology*, 6.
- Brace, N. A., Hole, G. J., Kemp, R. I., Pike, G. E., Van Duuren, M., & Norgate, L. (2001). Developmental changes in the effect of inversion: Using a picture book to investigate face recognition. *Perception*, 30(1), 85–94.
- Bruce, V. (1982). Changing faces: Visual and non visual coding processes in face recognition. *British Journal of Psychology*, 73(1), 105–116.
- Bruce, V., Campbell, R. N., Doherty-Sneddon, G., Langton, S., McAuley, S., & Wright, R. (2000). Testing face processing skills in children. *British Journal of Developmental Psychology*, 18(3), 319–333.
- Bruce, V., Henderson, Z., Greenwood, K., Hancock, P. J. B., Burton, A. M., & Miller, P. (1999). Verification of face identities from images captured on video. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 5(4), 339–360.
- Bruce, V., Henderson, Z., Newman, C., & Burton, A. M. (2001a). Matching identities of familiar and unfamiliar faces caught on CCTV images. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7(3), 207–218. <https://doi.org/10.1037//1076-898X.7.3.207>
- Bruce, V., Henderson, Z., Newman, C., & Burton, A. M. (2001b). Matching identities of familiar and unfamiliar faces caught on CCTV images. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7(3), 207–218.
- Bruce, V., & Young, A. (1986a). Understanding face recognition. *British Journal of Psychology*, 77(3), 305–327. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1986.tb02199.x>
- Bruce, V., & Young, A. (1986b). Understanding face recognition. *British Journal of Psychology*, 77(3), 305–327.
- Bruce, V., & Young, A. (1998). In the eye of the beholder: The science of face perception. *In the Eye of the Beholder: The Science of Face Perception*.
- Bruen, P. D., McGeown, W. J., Shanks, M. F., & Venneri, A. (2008). Neuroanatomical correlates of neuropsychiatric symptoms in Alzheimer's disease. *Brain*, 131(9), 2455–2463.
- Brun, P. (2001). Psychopathologie de l'émotion chez l'enfant: L'importance des données développementales typiques. *Enfance*, 53(3), 281–291.
- Buchan, J., Paré, M., & Munhall, K. (2007). Spatial statistics of gaze fixations during dynamic face processing. *Social Neuroscience*.
- Bucks, R. S., & Radford, S. A. (2004). Emotion processing in Alzheimer's disease. *Aging & Mental Health*, 8(3), 222–232.
- Bukach, C. M., & Peissig, J. J. (2010). How Faces Became Special. In *Perceptual Expertise: Bridging Brain and Behavior*.
- Burton, A. M., Bruce, V., & Hancock, P. J. B. (1999). From pixels to people: A model of familiar face recognition. *Cognitive Science*, 23(1), 1–31.
- Burton, A. M., Wilson, S., Cowan, M., & Bruce, V. (1999). Face recognition in poor-quality video: Evidence from Security Surveillance. *Psychological Science*, 10(3), 243–248.
- Buzby, D. E. (1924). The Interpretation of Facial Expression. *The American Journal of Psychology*, 35(4), 602.

- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging, 17*(1), 85–100.
- Cacioppo, J. T., & Cacioppo, S. (2013). Social Neuroscience. *Perspectives on Psychological Science, 8*, 667–669.
- Caharel, S., Leleu, A., Bernard, C., Viggiano, M. P., Lalonde, R., & Rebai, M. (2013). Early holistic face-like processing of Arcimboldo paintings in the right occipito-temporal cortex: Evidence from the N170 ERP component. *International Journal of Psychophysiology, 90*(2), 157–164.
- Caldara, R. (2017). Culture Reveals a Flexible System for Face Processing. *Current Directions in Psychological Science, 26*(3), 249–255.
- Calder, A. J., Keane, J., Manly, T., Sprengelmeyer, R., Scott, S., Nimmo-Smith, I., & Young, A. W. (2003). Facial expression recognition across the adult life span. *Neuropsychologia, 41*, 1525–1532.
- Calder, A. J., & Young, A. W. (2005). Understanding the recognition of facial identity and facial expression. *Nature Reviews Neuroscience, 8*, 793–801.
- Calder, A. J., Young, A. W., Keane, J., & Dean, M. (2000). Configural information in facial expression perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26*(2), 527–551.
- Calvo, M. G., & Nummenmaa, L. (2008). Detection of Emotional Faces: Salient Physical Features Guide Effective Visual Search. *Journal of Experimental Psychology: General, 137*(4), 563–573. <https://doi.org/10.1037/a0012771>
- Calvo, M. G., Nummenmaa, L., & Avero, P. (2010). Recognition advantage of happy faces in extrafoveal vision: Featural and affective processing. *Visual Cognition, 18*(9), 1274–1297.
- Campanella, F., Fabbro, F., Ius, T., Shallice, T., & Skrap, M. (2015). Acute effects of surgery on emotion and personality of brain tumor patients: surgery impact, histological aspects, and recovery. *Neuro-Oncology, 17*(8), 1121–1131.
- Campanella, F., Shallice, T., Ius, T., Fabbro, F., & Skrap, M. (2014). Impact of brain tumour location on emotion and personality: a voxel-based lesion--symptom mapping study on mentalization processes. *Brain, 137*(9), 2532–2545.
- Campanella, Fabio, Palese, A., Del Missier, F., Moreale, R., Ius, T., Shallice, T., ... Skrap, M. (2017). Long-term cognitive functioning and psychological well-being in surgically treated patients with low-grade glioma. *World Neurosurgery, 103*, 799–808.
- Campanella, S., Delle-Vigne, D., Kornreich, C., & Verbanck, P. (2012). Greater sensitivity of the P300 component to bimodal stimulation in an event-related potentials oddball task. *Clinical Neurophysiology, 123*(5), 937–946.
- Camras, L. A., & Shutter, J. M. (2010). Emotional facial expressions in infancy. *Emotion Review, 2*(2), 120–129.
- Capelle, L., Fontaine, D., Mandonnet, E., Taillandier, L., Golmard, J. L., Bauchet, L., ... others. (2013). Spontaneous and therapeutic prognostic factors in adult hemispheric World Health Organization Grade II gliomas: a series of 1097 cases. *Journal of Neurosurgery, 118*(6), 1157–1168.
- Carey, S. (1981). The development of face perception. *Perceiving and Remembering Faces, 9–38*.
- Carey, S., & Diamond, R. (1977). From piecemeal to configurational representation of faces. *Science, 195*(4275), 312–314.
- Carey, S., Schonen, S. D., & Ellis, H. D. (1992). Becoming a Face Expert. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 335*(1273), 95–103.
- Carpendale, J., & Lewis, C. (2006). *How children develop social understanding*. Blackwell Publishing.
- Carrasco, E., Epelde, G., Moreno, A., Ortiz, A., Garcia, I., Buiza, C., ... Arruti, A. (2008). Natural interaction between avatars and persons with alzheimer's disease. In *International Conference on Computers for Handicapped Persons* (pp. 38–45).
- Carstensen, L. L., Isaacowitz, D. M., & Charles, S. T. (1999). Taking time seriously: A theory of socioemotional selectivity. *American Psychologist, 54*, 165–181.
- Carstensen, L. L., Pasupathi, M., Mayr, U., & Nesselroade, J. R. (2000). Emotional experience in

- everyday life across the adult life span. *Journal of Personality and Social Psychology*, 79(4), 644.
- Carton, J. S., Kessler, E. A., & Pape, C. L. (1999). Nonverbal decoding skills and relationship well-being in adults. *Journal of Nonverbal Behavior*.
- Cattagni, T., Scaglioni, G., Laroche, D., Grémeaux, V., & Martin, A. (2016). The involvement of ankle muscles in maintaining balance in the upright posture is higher in elderly fallers. *Experimental Gerontology*, 77, 38–45.
- Chaby, L. (2004). Le vieillissement. In Hermes (Ed.), *L'imagerie cérébrale fonctionnelle électrique et magnétique* (Collection, pp. 235–249). Paris: Hermes.
- Chaby, L. (2012). Emotions et perception à l'épreuve de l'âge. *Cerveau & Psycho*, 53, 70–77.
- Chaby, L., Chetouani, M., Plaza, M., & Cohen, D. (2012). Exploring multimodal social-emotional behaviors in autism spectrum disorders: An interface between social signal processing and psychopathology. In *ASE/IEEE International Conference on Social Computing, SocialCom/PASSAT 2012* (pp. 950–954).
- Chaby, L., George, N., Renault, B., & Fiori, N. (2003). Age-related changes in brain responses to personally known faces: An event-related potential (ERP) study in humans. *Neuroscience Letters*, 349(2).
- Chaby, L., Gilles, P., & Corjon, J. (2010). Importance des parties basses et hautes du visage dans la reconnaissance des expressions faciales au cours du vieillissement normal. XIème Colloque International sur le Vieillissement cognitif - JEV, 23-24 Septembre 2010, Liège, Belgique.
- Chaby, L., Hupont, I., Avril, M., Luherne-du Boullay, V., & Chetouani, M. (2017). Gaze behavior consistency among older and younger adults when looking at emotional faces. *Frontiers in Psychology*, 8(548).
- Chaby, L., Jemel, B., George, N., & Fiori, N. (1999). Effets du vieillissement sur le traitement d'incongruïtés faciales dans une tâche d'amorçage. In Brouillet (Ed.), *Le Vieillissement Cognitif* (pp. 230–244). De Boeck Université.
- Chaby, L., Jemel, B., George, N., Renault, B., & Fiori, N. (2001). An ERP study of famous face incongruity detection in middle age. *Brain and Cognition*, 45(3), 357–377.
- Chaby, L., Jemel, B., Renault, B., & Fiori, N. (1999). Le vieillissement normal affecte-t-il le traitement des visages? *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 29(4), 353–354.
- Chaby, L., Jemel, B., Renault, B., & Fiori, N. (2000). Utilisation des potentiels évoqués chez l'homme normal dans l'étude du vieillissement (pp. 15–20). Louvain la Neuve: De Boeck Université.
- Chaby, L., Luherne-du Boullay, V., Chetouani, M., & Plaza, M. (2015). Compensating for age limits through emotional crossmodal integration. *Frontiers in Psychology*, 6(691), 1–12.
- Chaby, L., & Narme, P. (2009). Processing facial identity and emotional expression in normal aging and neurodegenerative diseases. *Psychologie et NeuroPsychiatrie Du Vieillissement*, 7(1).
- Chaby, L., Narme, P., & George, N. (2011). Older Adults' Configural Processing of Faces: Role of Second-Order Information. *Psychology and Aging*, 26(1), 71–79.
- Chaplin, T. M., & Aldao, A. (2013). Gender differences in emotion expression in children: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 10, 735–765.
- Charbonneau, G., Bertone, A., Lepore, F., Nassim, M., Lassonde, M., Mottron, L., & Collignon, O. (2013). Multilevel alterations in the processing of audio-visual emotion expressions in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 51, 1002–1010.
- Chetouani, M., Boucenna, S., Chaby, L., Plaza, M., & Cohen, D. (2017). Social Signal Processing and Socially Assistive Robotics in Developmental Disorders. In *Social Signal Processing* (pp. 389–403). Cambridge University Press.
- Chiller-Glaus, S. D., Schwaninger, A., Hofer, F., Kleiner, M., & Knappmeyer, B. (2011). Recognition of Emotion in Moving and Static Composite Faces. *Swiss Journal of Psychology*, 70(4), 233–240.
- Churches, O., Baron-Cohen, S., & Ring, H. (2009). Seeing face-like objects: An event-related potential study. *NeuroReport*, 20(14), 1290–1294.

- Ciaro, F., Marino, B. F. M., Actis-Grosso, R., Rossetti, A., & Ricciardelli, P. (2014). Face age modulates gaze following in young adults. *Scientific Reports*, 4, 4746.
- Cienkowski, K. M., & Carney, A. E. (2002). Auditory-visual speech perception and aging. *Ear and Hearing*, 23(5), 439–449.
- Cohen, D. (2012). Controverses actuelles dans le champ de l'autisme. In *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique* (Vol. 170, pp. 517–525).
- Cohen, D., Chetouani, M., Chaby, L., Demouy, J., & Plaza, M. (2014). Traitement du Signal Social, émotion, Communication et Psychopathologie. In *Emotions Cognitions & Communication* (pp. 29–49).
- Cohen, D., Grossard, C., Grynszpan, O., Anzalone, S., Boucenna, S., Xavier, J., ... Chaby, L. (2017). Autisme, jeux sérieux et robotique: réalité tangible ou abus de langage? *Annales Médico-Psychologiques*, 175(5), 438–445.
- Coleman, J. C. (1949). Facial expressions of emotion. *Psychological Monographs: General and Applied*, 63(1), i.
- Collignon, O., Girard, S., Gosselin, F., Roy, S., Saint-Amour, D., Lassonde, M., & Lepore, F. (2008). Audio-visual integration of emotion expression. *Brain Research*, 1242, 126–135.
- Collignon, O., Girard, S., Gosselin, F., Saint-Amour, D., Lepore, F., & Lassonde, M. (2010). Women process multisensory emotion expressions more efficiently than men. *Neuropsychologia*, 48(1), 220–225.
- Correa, D. D., Shi, W., Thaler, H. T., Cheung, A. M., DeAngelis, L. M., & Abrey, L. E. (2008). Longitudinal cognitive follow-up in low grade gliomas. *Journal of Neuro-Oncology*, 86(3), 321–327.
- Craig, B. M., & Thorne, E. M. (2019). Social categorization and individuation in the own-age bias. *British Journal of Psychology*.
- Craik, F. I. M., & Bialystok, E. (2006). Cognition through the lifespan: Mechanisms of change. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Cronin, S. L., Craig, B. M., & Lipp, O. V. (2018). Emotional expressions reduce the own-age bias. *Emotion*.
- Crook, T. H., & Larrabee, G. J. (1992). Changes in facial recognition memory across the adult life span. *Journal of Gerontology*, 47(3), P138–P141.
- Crouzet, S. M. (2010). Fast saccades toward faces: Face detection in just 100 ms. *Journal of Vision*, 10(4), 1–17.
- Crucian, G. P., Armaghani, S., Armaghani, A., Foster, P. S., Burks, D. W., Skoblar, B., ... Heilman, K. M. (2010). Visual-spatial disembedding in Parkinson's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 32(2), 190–200.
- Cummins, A., Piek, J. P., & Dyck, M. J. (2005). Motor coordination, empathy, and social behaviour in school-aged children. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 47(7), 437–442.
- Czapinski, P., & Bryson, S. (2003). Reduced facial muscle movements in Autism: Evidence for dysfunction in the neuromuscular pathway? *Brain and Cognition*, 51(2), 177–179.
- D'Onofrio, G., Sancarlo, D., Addante, F., Ciccone, F., Cascavilla, L., Paris, F., ... others. (2015). Caregiver burden characterization in patients with Alzheimer's disease or vascular dementia. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 30(9), 891–899.
- Daniel, S., & Bentin, S. (2012). Age-related changes in processing faces from detection to identification: ERP evidence. *Neurobiology of Aging*, 33(1).
- Dapogny, A., Bailly, K., & Dubuisson, S. (2018). Confidence-weighted local expression predictions for occlusion handling in expression recognition and action unit detection. *International Journal of Computer Vision*, 126(2–4), 255–271.
- Darwin, C. (1872). The expression of the emotions in man and animals. *The American Journal of the Medical Sciences*, 232(4), 477.
- Dautenhahn, K. (2007). Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1480), 679–704.

- David, R., Mulin, E., Leone, E., & Robert, P. (2010). Les symptômes psychologiques et comportementaux dans la maladie d'Alzheimer. *Neurologie. Com*, 2(7), 171–175.
- Daividsdottir, S., Cronin-Golomb, A., & Lee, A. (2005). Visual and spatial symptoms in Parkinson's disease. *Vision Research*, 45(10), 1285–1296.
- Davies-Thompson, J., Newling, K., & Andrews, T. J. (2012). Image-invariant responses in face-selective regions do not explain the perceptual advantage for familiar face recognition. *Cerebral Cortex*, 23(2), 370–377.
- De Gelder, B., & Vroomen, J. (2000). The perception of emotions by ear and by eye. *Cognition and Emotion*, 14(3), 289–311.
- de Gelder, B., Vroomen, J., Annen, L., Masthof, E., & Hodiament, P. (2003). Audio-visual integration in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 59(2–3), 211–218.
- de Gelder, B., Vroomen, J., de Jong, S. J., Masthoff, E. D., Trompenaars, F. J., & Hodiament, P. (2005). Multisensory integration of emotional faces and voices in schizophrenics. *Schizophrenia Research*, 72(2–3), 195–203.
- de Haan, M., Johnson, M., & Halit, H. (2003). Development of face-sensitive event-related potentials during infancy: A review. In *International Journal of Psychophysiology* (Vol. 51, pp. 45–58).
- de Haan, M., & Nelson, C. A. (1999). Brain activity differentiates face and object processing in 6-month-old infants. *Developmental Psychology*, 35(4), 1113–1121.
- de Haan, M., Pascalis, O., & Johnson, M. (2002). Specialization of Neural Mechanisms Underlying Face Recognition in Human Infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(2), 199–209.
- De Heering, A., Goffaux, V., Dollion, N., Godard, O., Durand, K., & Baudouin, J.-Y. (2016). Three-month-old infants' sensitivity to horizontal information within faces. *Developmental Psychobiology*, 58(4), 536–542.
- De Jaegher, H., Di Paolo, E., & Gallagher, S. (2010). Can social interaction constitute social cognition? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(10), 441–447.
- de Jong, J. J., Hodiament, P. P. G., Van den Stock, J., & de Gelder, B. (2009). Audiovisual emotion recognition in schizophrenia: Reduced integration of facial and vocal affect. *Schizophrenia Research*, 107(2–3), 286–293.
- De Risi, M., Di Gennaro, G., Picardi, A., Casciato, S., Grammaldo, L. G., D'Aniello, A., ... Modugno, N. (2018). Facial emotion decoding in patients with Parkinson's disease. *International Journal of Neuroscience*, 128(1), 71–78.
- de Wit, T. C. J., Falck-Ytter, T., & von Hofsten, C. (2008). Young children with autism spectrum disorder look differently at positive versus negative emotional faces. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 2(4), 651–659.
- Decety, J. (2010). The neurodevelopment of empathy in humans. *Developmental Neuroscience*, 32(4), 257–267. <https://doi.org/10.1159/000317771>
- Decety, J., & Jackson, P. L. (2004). The functional architecture of human empathy. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*. <https://doi.org/10.1177/1534582304267187>
- Delle-Vigne, D., Kornreich, C., Verbanck, P., & Campanella, S. (2014). Subclinical alexithymia modulates early audio-visual perceptive and attentional event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 106.
- Derntl, B., Seidel, E.-M., Kainz, E., & Carbon, C.-C. (2009). Recognition of Emotional Expressions is Affected by Inversion and Presentation Time. *Perception*, 38(12), 1849–1862. <https://doi.org/10.1068/p6448>
- Derouesné, C. (2006). *Maladie d'Alzheimer. Données épidémiologiques, neuropathologiques et cliniques. Actualités sur les démences: aspects cliniques et neuropsychologiques.*
- Desimone, R., Albright, T. D., Gross, C. G., & Bruce, C. (1984). Stimulus-selective neurons in the macaque. *Journal of Neuroscience*, 4(8), 2051–2062.
- Diamond, R., & Carey, S. (1986). Why Faces Are and Are Not Special. An Effect of Expertise. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115(2), 107–117.
- Dimberg, U., Thunberg, M., & Grunedal, S. (2002). Facial reactions to emotional stimuli:

Automatically controlled emotional responses. *Cognition and Emotion*.

- Dolan, R. J., Fink, G. R., Rolls, E., Booth, M., Holmes, A., Frackowiak, R. S. J., & Friston, K. J. (1997). How the brain learns to see objects and faces in an impoverished context. *Nature*, *389*(6651), 596–599.
- Dolcos, F., Rice, H. J., & Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry and aging: Right hemisphere decline or asymmetry reduction. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*.
- Du Boullay, V., Plaza, M., Capelle, L., & Chaby, L. (2013). Identification of emotions in patients with low-grade gliomas versus cerebrovascular accidents. *Revue Neurologique*, *169*(3), 249–257.
- Du, S., Tao, Y., & Martinez, A. M. (2014). Compound facial expressions of emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*, E1454–E1462.
- Duchaine, B., & Yovel, G. (2015). A Revised Neural Framework for Face Processing. *Annual Review of Vision Science*, *1*(1), 393–416.
- Duchenne, G. . (1862). *Mécanisme de la physionomie humaine, ou analyse électro-physiologique de l'expression des passions* (Jules Reno). Paris.
- Duffau, H. (2012a). The challenge to remove diffuse low-grade gliomas while preserving brain functions. *Acta Neurochirurgica*, *154*(4), 569–574.
- Duffau, H. (2012b). The “frontal syndrome” revisited: lessons from electrostimulation mapping studies. *Cortex*, *48*(1), 120–131.
- Duffau, H. (2014). The huge plastic potential of adult brain and the role of connectomics: new insights provided by serial mappings in glioma surgery. *Cortex*, *58*, 325–337.
- Duffau, H., & Capelle, L. (2004). Preferential brain locations of low-grade gliomas: Comparison with glioblastomas and review of hypothesis. *Cancer*, *100*(12), 2622–2626.
- Dunbar, R. I. M. (1998). The social brain hypothesis. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews: Issues, News, and Reviews*, *6*(5), 178–190.
- Dunlap, K. (1927). The role of eye-muscles and mouth-muscles in the expression of the emotions. *Genetic Psychology Monographs*, *2*, 196–233.
- Durkin, K. (2010). Videogames and young people with developmental disorders. *Review of General Psychology*, *14*(2), 122–140.
- Dziuk, M. A., Larson, J. C. G., Apostu, A., Mahone, E. M., Denckla, M. B., & Mostofsky, S. H. (2007). Dyspraxia in autism: Association with motor, social, and communicative deficits. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *49*(10), 734–739.
- Ebner, N. C., He, Y., Fichtenholtz, H. M., McCarthy, G., & Johnson, M. K. (2011). Electrophysiological correlates of processing faces of younger and older individuals. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *6*(4), 526–535.
- Ebner, N. C., & Johnson, M. K. (2010). Age-group differences in interference from young and older emotional faces. *Cognition and Emotion*.
- Edmonds, E. C., Glisky, E. L., Bartlett, J. C., & Rapcsak, S. Z. (2012). Cognitive mechanisms of false facial recognition in older adults. *Psychology and Aging*, *27*(1), 54–60.
- Eimer, M. (2012). The Face-Sensitive N170 Component of the Event-Related Brain Potential. In *Oxford Handbook of Face Perception* (pp. 329–344).
- Eisenbarth, H., & Alpers, G. W. (2011). Happy mouth and sad eyes: Scanning emotional facial expressions. *Emotion*, *11*(4), 860–865.
- Ekman, P. (1973). *Darwin and facial expression; a century of research in review*. Academic Press, New York (Vol. 23). Malor Books.
- Ekman, P. (1992). An Argument for Basic Emotions. *Cognition and Emotion*.
- Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *The American Psychologist*, *48*(4), 384–392.
- Ekman, P. (2003). Darwin, Deception, and Facial Expression. In *Annals of the New York Academy of Sciences* (Vol. 1000, pp. 205–221).
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). The Facial Action Coding System. *Consulting*.

- Ekman, P., Friesen, W. V., & Hager, J. C. (2002). *Facial Action Coding System - Investigator's Guide*. FACS.
- Ekman, P., & Rosenberg, E. L. (1997). *What the face reveals: Basic and applied studies of spontaneous expression using the Facial Action Coding System (FACS)*. Oxford University Press, USA.
- Elfenbein, H. A., & Ambady, N. (2002). On the universality and cultural specificity of emotion recognition: a meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *128*(2), 203.
- Elfenbein, H. A., & Ambady, N. (2003). When Familiarity Breeds Accuracy: Cultural Exposure and Facial Emotion Recognition. *Journal of Personality and Social Psychology*. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.276>
- Elliot, A. J., Eder, A. B., & Harmon-Jones, E. (2013). Approach-avoidance motivation and emotion: Convergence and divergence. *Emotion Review*, *5*(3), 308–311.
- Ellis, H. D., Shepherd, J. W., & Davies, G. M. (1979). Identification of familiar and unfamiliar faces from internal and external features: Some implications for theories of face recognition. *Perception*, *8*(4), 431–439.
- Ellis, Hadyn D., & Young, A. W. (1989). "Are faces special?" In A. W. Young & H. D. Ellis (Eds.), *Handbook of research on face processing* (pp. 1-26). Amsterdam: North Holland.
- Elsherif, M. M., Saban, M. I., & Rotshtein, P. (2017). The perceptual saliency of fearful eyes and smiles: A signal detection study. *PLoS ONE*, *12*(3), e0173199.
- Emery, N. J. (2000). The eyes have it: The neuroethology, function and evolution of social gaze. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *24*(6), 581–604.
- Engelberg, E., & Sjöberg, L. (2004). Emotional intelligence, affect intensity, and social adjustment. *Personality and Individual Differences*, *37*(3), 533–542.
- English, T., & Carstensen, L. L. (2014). Emotional experience in the mornings and the evenings: Consideration of age differences in specific emotions by time of day. *Frontiers in Psychology*.
- Estudillo, A. J., & Bindemann, M. (2014). Generalization across view in face memory and face matching. *I-Perception*, *5*(7), 589–601.
- Evans-Roberts, C. E. Y., & Turnbull, O. H. (2010). Remembering relationships: preserved emotion-based learning in Alzheimer's disease. *Experimental Aging Research*, *37*(1), 1–16.
- Falck-Ytter, T., Fernell, E., Gillberg, C., & Von Hofsten, C. (2010). Face scanning distinguishes social from communication impairments in autism. *Developmental Science*, *13*(6), 864–875.
- Farah, M. J., Rabinowitz, C., Quinn, G. E., & Liu, G. T. (2000). Early Commitment of neural substrates for face recognition. *Cognitive Neuropsychology*, *17*(1–3), 117–123.
- Farroni, T., Menon, E., Rigato, S., & Johnson, M. H. (2007). The perception of facial expressions in newborns. *European Journal of Developmental Psychology*.
- Faubert, J. (2002). Visual perception and aging. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *56*, 164–176.
- Feinman, S., Roberts, D., Hsieh, K.-F., Sawyer, D., & Swanson, D. (1992). A critical review of social referencing in infancy. In *Social referencing and the social construction of reality in infancy* (pp. 15–54). Springer.
- Feldman, R. (2003). Infant-mother and infant-father synchrony: The coregulation of positive arousal. *Infant Mental Health Journal*, *24*(1), 1–23. <https://doi.org/10.1002/imhj.10041>
- Feldman, R. (2007). Parent-infant synchrony and the construction of shared timing; physiological precursors, developmental outcomes, and risk conditions. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *48*(3–4), 329–354.
- Fernandez-Duque, D., Hodges, S. D., Baird, J. A., & Black, S. E. (2010). Empathy in frontotemporal dementia and Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *32*(3), 289–298.
- Fischer, A. H., & Manstead, A. S. R. (2008). Social functions of emotion. In M. Lewis, J. Haviland-Jones, & L. Feldman Barrett (Eds.), *Handbook of emotions* (Vol. 3, pp. 456–468). New York, NY, US: Guilford Press.

- Fisher, K., Towler, J., & Eimer, M. (2016). Facial identity and facial expression are initially integrated at visual perceptual stages of face processing. *Neuropsychologia*, *80*, 115–125.
- Flannery, D. J., Montemayor, R., Eberly, M., & Torquati, J. (1993). Unraveling the ties that bind: Affective expression and perceived conflict in parent adolescent interactions. *Journal of Social and Personal Relationships*.
- Flowers, K. A., & Robertson, C. (1995). Perceptual abnormalities in Parkinson's disease: top-down or bottom-up processes? *Perception*, *24*(10), 1201–1221.
- Flykt, A., Lundqvist, D., Flykt, A., & Öhman, A. (1998). The Karolinska directed emotional faces (KDEF). *CD ROM from Department of Clinical Neuroscience, Psychology Section, Karolinska Institutet*.
- Foucault, M. (1969). *L'archéologie du savoir. Bibliothèque des sciences humaines*.
- Fox, C. J., Moon, S. Y., Iaria, G., & Barton, J. J. S. (2009). The correlates of subjective perception of identity and expression in the face network: An fMRI adaptation study. *NeuroImage*, *44*(2), 569–580.
- Frassinetti, F., Bolognini, N., Bottari, D., Bonora, A., & Làdavas, E. (2005). Audiovisual integration in patients with visual deficit. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(9), 1442–1452.
- Freire, A., & Lee, K. (2001). Face Recognition in 4- To 7-Year-Olds: Processing of Configural, Featural, and Paraphernalia Information. *Journal of Experimental Child Psychology*, *80*(4), 347–371.
- Freiwald, W., Duchaine, B., & Yovel, G. (2016). Face Processing Systems: From Neurons to Real-World Social Perception. *Annual Review of Neuroscience*, *39*(1), 325–346.
- Frijda, N. H. (1986). *The emotions: Studies in emotion and social interaction*. Cambridge University Press.
- Frijda, N. H. (2005). Emotion experience. *Cognition and Emotion*, *19*, 473–497.
- Frith, C. D. (2008). Social cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *363*(1499), 2033–2039.
- Frith, C. D., & Frith, U. (2012). Mechanisms of Social Cognition. *Annual Review of Psychology*, *63*(1), 287–313.
- Frith, C., & Wolpert, D. (2004). *The Neuroscience of Social Interaction: Decoding, Influencing, and Imitating the Actions of Others*. Oxford University Press UK.
- Gao, L., Xu, J., Zhang, B., Zhao, L., Harel, A., & Bentin, S. (2009). Aging effects on early-stage face perception: An ERP study. *Psychophysiology*, *46*(5), 970–983.
- Gao, X., & Maurer, D. (2010). A happy story: Developmental changes in children's sensitivity to facial expressions of varying intensities. *Journal of Experimental Child Psychology*.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J. C., & Anderson, A. W. (2000). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nature Neuroscience*, *3*(2), 191–197.
- Gea, J., Muñoz, M. A., Costa, I., Ciria, L. F., Miranda, J. G. V., & Montoya, P. (2014). Viewing pain and happy faces elicited similar changes in postural body sway. *PloS One*, *9*(8), e104381.
- George, N., Jemel, B., Fiori, N., Chaby, L., & Renault, B. (2005). Electrophysiological correlates of facial decision: Insights from upright and upside-down Mooney-face perception. *Cognitive Brain Research*, *24*(3).
- George, Nathalie, Evans, J., Fiori, N., Davidoff, J., & Renault, B. (1996). Brain events related to normal and moderately scrambled faces. *Cognitive Brain Research*, *4*(2), 65–76.
- Golarai, G., Ghahremani, D. G., Whitfield-Gabrieli, S., Reiss, A., Eberhardt, J. L., Gabrieli, J. D. E., & Grill-Spector, K. (2007). Differential development of high-level visual cortex correlates with category-specific recognition memory. *Nature Neuroscience*, *10*(4), 512–522.
- Gomez, J., Barnett, M. A., Natu, V., Mezer, A., Palomero-Gallagher, N., Weiner, K. S., ... Grill-Spector, K. (2017). Microstructural proliferation in human cortex is coupled with the development of face processing. *Science*, *355*(6320).
- Gonçalves, A. R., Fernandes, C., Pasion, R., Ferreira-Santos, F., Barbosa, F., & Marques-Teixeira,

- J. (2018). Effects of age on the identification of emotions in facial expressions: a meta-analysis. *PeerJ*, 6, e5278.
- Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: A technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision Research*, 41(7), 2261–2271.
- Gosselin, P. (2005). Le décodage de l'expression faciale des émotions au cours de l'enfance. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 46(3), 126.
- Gosselin, P., & Kirouac, G. (1995). Le décodage de prototypes émotionnels faciaux. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 49(3), 313–329.
- Grainger, S. A., Henry, J. D., Phillips, L. H., Vanman, E. J., & Allen, R. (2015). Age Deficits in Facial Affect Recognition: The Influence of Dynamic Cues. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, 72(4), 622–632.
- Gray, H. M., & Tickle-Degnen, L. (2010). A meta-analysis of performance on emotion recognition tasks in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 24(2), 176.
- Green, M. F., Horan, W. P., & Lee, J. (2015). Social cognition in schizophrenia. *Nature Reviews Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/nrn4005>
- Greenwood, P. M. (2007). Functional Plasticity in Cognitive Aging: Review and Hypothesis. *Neuropsychology*, 21(6), 657–673.
- Grieve, S. M., Clark, C. R., Williams, L. M., Peduto, A. J., & Gordon, E. (2005). Preservation of limbic and paralimbic structures in aging. *Human Brain Mapping*, 25(4), 391–401.
- Griffiths, P. C., Kovaleva, M., Higgins, M., Langston, A. H., & Hepburn, K. (2018). Tele-Savvy: an online program for dementia caregivers. *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias*, 33(5), 269–276.
- Griffiths, S., Penton-Voak, I. S., Jarrold, C., & Munafò, M. R. (2015). No own-age advantage in children's recognition of emotion on prototypical faces of different ages. *PLoS ONE*, 10(6), e0131488.
- Gross, A. L., & Ballif, B. (1991). Children's understanding of emotion from facial expressions and situations: A review. *Developmental Review*.
- Gross, J. J., Richards, J. M., & John, O. P. (2006). Emotion regulation in everyday life. In *Emotion Regulation in Families: Pathways to Dysfunction and Health* (pp. 13–35).
- Grossard, C., Chaby, L., Hun, S., Pellerin, H., Bourgeois, J., Dapogny, A., ... Cohen, D. (2018). Children facial expression production: Influence of age, gender, emotion subtype, elicitation condition and culture. *Frontiers in Psychology*, 9(446), 1–11.
- Grossard, C., Hun, S., Serret, S., Grynszpan, O., Foulon, P., Dapogny, A., ... Cohen, D. (2017). Rééducation de l'expression émotionnelle chez l'enfant avec trouble du spectre autistique grâce aux supports numériques: le projet JEMImE. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 65(1), 21–32.
- Guilford, J. P., & Wilke, M. (1930). A new model for the demonstration of facial expressions. *The American Journal of Psychology*, 42(3), 436–439.
- Guillon, Q., Hadjikhani, N., Baduel, S., & Rogé, B. (2014). Visual social attention in autism spectrum disorder: Insights from eye tracking studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 42, 279–297.
- Guo, K. (2012). Holistic gaze strategy to categorize facial expression of varying intensities. *PLoS ONE*.
- Habak, C., Wilkinson, F., & Wilson, H. R. (2008). Aging disrupts the neural transformations that link facial identity across views. *Vision Research*, 48(1), 9–15.
- Haig, N. D. (1984). The effect of feature displacement on face recognition. *Perception*, 13, 104–109.
- Hall, J. A., Bernieri, F. J., & Carney, D. R. (2005). Nonverbal behavior and interpersonal sensitivity. In *The new handbook of methods in nonverbal behavior research*. (pp. 237–281). New York, NY, US: Oxford University Press.
- Hamann, S. (2012). Mapping discrete and dimensional emotions onto the brain: controversies and

consensus. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(9), 458–466.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.07.006>

- Hanawalt, N. G. (1944). The Role of the Upper and the Lower Parts of the Face as a Basis for Judging Facial Expressions: II. In Posed Expressions and “Candid-Camera” Pictures. *The Journal of General Psychology*, 31(1), 23–36.
- Hancock, K. J., & Rhodes, G. (2008). Contact, configural coding and the other-race effect in face recognition. *British Journal of Psychology*, 99(1), 45–56.
- Harms, M. B., Martin, A., & Wallace, G. L. (2010). Facial emotion recognition in autism spectrum disorders: a review of behavioral and neuroimaging studies. *Neuropsychology Review*, 20(3), 290–322.
- Harris, R. J., Young, A. W., & Andrews, T. J. (2012). Morphing between expressions dissociates continuous from categorical representations of facial expression in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(51), 21164–21169.
- HAS, H. A. de S. (2009). Maladie d'Alzheimer et maladies apparentées: prise en charge des troubles du comportement perturbateurs. *Recommandations de Bonnes Pratiques*, 2007–2009.
- Haxby, J., & Gobbini, M. (2012). Distributed Neural Systems for Face Perception. In *Oxford Handbook of Face Perception* (pp. 93–110).
- Haxby, J. V., Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Haxby, J. V., Horwitz, B., Ungerleider, L. G., Maisog, J. M., Pietrini, P., & Grady, C. L. (1994). The functional organization of human extrastriate cortex: a PET-rCBF study of selective attention to faces and locations. *J Neurosci*, 14(11 Pt 1), 6336–6353.
- Haxby, James V., & Ida Gobbini, M. (2007). The perception of emotion and social cues in faces. *Neuropsychologia*, 45(1), 1.
- Hayes, S. M., Alosco, M. L., & Forman, D. E. (2014). The effects of aerobic exercise on cognitive and neural decline in aging and cardiovascular disease. *Current Geriatrics Reports*, 3(4), 282–290.
- Hecaen, H., & Angelergues, R. (1962). Agnosia for Faces (Prosopagnosia). *Archives of Neurology*, 7(2), 92–100.
- Henderson, J. M., Williams, C. C., & Falk, R. J. (2005). Eye movements are functional during face learning. *Memory and Cognition*.
- Henderson, S., & Sugden, D. (1992). *Movement Assessment Battery for Children: Manual*. Psychological Corporation London.
- Herba, C., & Phillips, M. (2004). Annotation: Development of facial expression recognition from childhood to adolescence: Behavioural and neurological perspectives. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(7), 1185–1198.
- Herbet, G., Lafargue, G., Bonnetblanc, F., Moritz-Gasser, S., de Champfleury, N., & Duffau, H. (2014). Inferring a dual-stream model of mentalizing from associative white matter fibres disconnection. *Brain*, 137(3), 944–959.
- Hess, U., Adams Jr, R. B., Simard, A., Stevenson, M. T., & Kleck, R. E. (2012). Smiling and sad wrinkles: Age-related changes in the face and the perception of emotions and intentions. *Journal of Experimental Social Psychology*, 48(6), 1377–1380.
- Hildebrandt, A., Wilhelm, O., Schmiedek, F., Herzmann, G., & Sommer, W. (2011). On the Specificity of Face Cognition Compared With General Cognitive Functioning Across Adult Age. *Psychology and Aging*, 26(3), 701–715.
- Hill, H. (1997). Information and viewpoint dependence in face recognition. *Cognition*, 62(2), 201–222.
- Hill, Harold, & Bruce, V. (1996). The effects of lighting on the perception of facial surfaces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(4), 986–1004.
- Hinojosa, J. A., Mercado, F., & Carretié, L. (2015). N170 sensitivity to facial expression: A meta-

analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*.

- Hoehl, S., & Peykarjou, S. (2012). The early development of face processing – What makes faces special? *Neuroscience Bulletin*.
- Hole, G. J., George, P. A., Eaves, K., & Rasek, A. (2002). Effects of geometric distortions on face-recognition performance. *Perception*, 31(10), 1221–1240.
- Holmqvist, K., Nyström, M., & Mulvey, F. (2012). Eye tracker data quality: what it is and how to measure it. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*.
- Homer, M., & Rutherford, M. D. (2008). Individuals with autism can categorize facial expressions. *Child Neuropsychology*, 14(5), 419–437.
- Horley, K., Reid, A., & Burnham, D. (2010). Emotional prosody perception and production in dementia of the Alzheimer's type. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*.
- Horning, S. M., Cornwell, R. E., & Davis, H. P. (2012). The recognition of facial expressions: an investigation of the influence of age and cognition. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 19(6), 657–676.
- Horslen, B. C., & Carpenter, M. G. (2011). Arousal, valence and their relative effects on postural control. *Experimental Brain Research*, 215(1), 27–34.
- Hsiao, J. H. W., & Cottrell, G. (2008). Two fixations suffice in face recognition. *Psychological Science*.
- Huber, L., Racca, A., Scaf, B., Virányi, Z., & Range, F. (2013). Discrimination of familiar human faces in dogs (*Canis familiaris*). *Learning and Motivation*, 44(4), 258–269.
- Isaacowitz, D. M., Löckenhoff, C. E., Lane, R. D., Wright, R., Sechrest, L., Riedel, R., & Costa, P. T. (2007). Age differences in recognition of emotion in lexical stimuli and facial expressions. *Psychology and Aging*.
- Izard, C. E. (2001). Emotional Intelligence or Adaptive Emotions? *Emotion*, 1(3), 249–257.
- Izard, C., Fine, S., Schultz, D., Mostow, A., Ackerman, B., & Youngstrom, E. (2001). Emotion knowledge as a predictor of social behavior and academic competence in children at risk. *Psychological Science*.
- Jack, R. E., Blais, C., Scheepers, C., Schyns, P. G., & Caldara, R. (2009). Cultural Confusions Show that Facial Expressions Are Not Universal. *Current Biology*, 19(18), 1543–1548.
- Jeffery, L., Read, A., & Rhodes, G. (2013). Four year-olds use norm-based coding for face identity. *Cognition*, 127(2), 258–263.
- Jeffreys, D. (1996). Evoked Potential Studies of Face and Object Processing. *Visual Cognition*, 3(1), 1–38.
- Jeffreys, D., Tukmachi, E. S., & Rockley, G. (1992). Evoked potential evidence for human brain mechanisms that respond to single, fixated faces. *Experimental Brain Research*, 91(2), 351–362.
- Jenkins, R., White, D., Van Montfort, X., & Mike Burton, A. (2011). Variability in photos of the same face. *Cognition*, 121(3), 313–323.
- Jessen, S., Obleser, J., & Kotz, S. A. (2012). How bodies and voices interact in early emotion perception. *PLoS One*, 7(4), e36070.
- Jitsumori, M., & Makino, H. (2004). Recognition of static and dynamic images of depth-rotated human faces by pigeons. *Learning & Behavior*, 32(2), 145–156.
- Johnston, A., Hill, H., & Carman, N. (1992). Recognising faces: Effects of lighting direction, inversion, and brightness reversal. *Perception*, 21(11), 365–375. <https://doi.org/10.1068/p210365n>
- Jones, C. R. G., Pickles, A., Falcaro, M., Marsden, A. J. S., Happé, F., Scott, S. K., ... others. (2011). A multimodal approach to emotion recognition ability in autism spectrum disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 52(3), 275–285.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). The relation between comprehending and remembering some complex sentences. *Memory & Cognition*.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human

- extrastriate cortex specialized for face perception. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 17(11), 4302–4311.
- Kanwisher, N., & Yovel, G. (2006). The fusiform face area: a cortical region specialized for the perception of faces. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1476), 2109–2128.
- Keeling, M., Bambrough, J., & Simpson, J. (2013). Depression, anxiety and positive affect in people diagnosed with low-grade tumours: the role of illness perceptions. *Psycho-Oncology*, 22(6), 1421–1427.
- Keightley, M. L., Chiew, K. S., Winocur, G., & Grady, C. L. (2007). Age-related differences in brain activity underlying identification of emotional expressions in faces. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*.
- Kelly, M. E., Duff, H., Kelly, S., Power, J. E. M., Brennan, S., Lawlor, B. A., & Loughrey, D. G. (2017). The impact of social activities, social networks, social support and social relationships on the cognitive functioning of healthy older adults: a systematic review. *Systematic Reviews*, 6(1), 259.
- Keltner, D., & Ekman, P. (2000). *Facial expression of emotion. Handbook of Emotions* (Vol. 2nd).
- Kennedy, A. (2016). Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Kennedy, D. P., & Adolphs, R. (2012). The social brain in psychiatric and neurological disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(11), 559–572.
- Khomsí, A. (2001). *Evaluation du Langage Oral* (ECPA). Paris, France.
- Kirouac, G., & Doré, F. Y. (1983). Accuracy and latency of judgment of facial expressions of emotions. *Perceptual and Motor Skills*.
- Klasen, M., Chen, Y. H., & Mathiak, K. (2012). Multisensory emotions: Perception, combination and underlying neural processes. *Reviews in the Neurosciences*, 23(4), 381–392.
- Klein-Koerkamp, Y., Beaudoin, M., Baciú, M., & Hot, P. (2012). Emotional decoding abilities in Alzheimer's disease: a meta-analysis. *Journal of Alzheimer's Disease*, 32(1), 109–125.
- Kobiella, A., Grossmann, T., Reid, V. M., & Striano, T. (2008). The discrimination of angry and fearful facial expressions in 7-month-old infants: An event-related potential study. *Cognition and Emotion*.
- Kokinous, J., Kotz, S. A., Tavano, A., & Schröger, E. (2014). The role of emotion in dynamic audiovisual integration of faces and voices. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(5), 713–720.
- Kolb, B., Wilson, B., & Taylor, L. (1992). Developmental changes in the recognition and comprehension of facial expression: Implications for frontal lobe function. *Brain and Cognition*.
- Konar, Y., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2013). Effects of aging on face identification and holistic face processing. *Vision Research*, 88, 38–46.
- Kotsoni, E., De Haan, M., & Johnson, M. H. (2001). Categorical perception of facial expressions by 7-month-old infants. *Perception*.
- Kramer, R. S. S., Young, A. W., & Burton, A. M. (2018). Understanding face familiarity. *Cognition*, 172, 46–58.
- Kreifelts, B., Ethofer, T., Grodd, W., Erb, M., & Wildgruber, D. (2007). Audiovisual integration of emotional signals in voice and face: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, 37(4), 1445–1456.
- Laing, M., Rees, A., & Vuong, Q. C. (2015). Amplitude-modulated stimuli reveal auditory-visual interactions in brain activity and brain connectivity. *Frontiers in Psychology*, 6, 1440.
- Langner, O., Dotsch, R., Bijlstra, G., Wigboldus, D. H. J., Hawk, S. T., & van Knippenberg, A. (2010). Presentation and validation of the radboud faces database. *Cognition and Emotion*.
- Latinus, M., & Taylor, M. J. (2005). Holistic Processing of Faces: Learning Effects with Mooney Faces. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(8), 1316–1327.

- Lautrey, J. (2003). A pluralistic approach to cognitive differentiation and development. *Models of Intelligence: International Perspectives*, 117–131.
- Lawrence, K., Bernstein, D., Pearson, R., Mandy, W., Campbell, R., & Skuse, D. (2008). Changing abilities in recognition of unfamiliar face photographs through childhood and adolescence: performance on a test of non-verbal immediate memory (Warrington RMF) from 6 to 16 years. *Journal of Neuropsychology*, 2(Pt 1), 27–45.
- Lawrence, Kate, Campbell, R., & Skuse, D. (2015). Age, gender, and puberty influence the development of facial emotion recognition. *Frontiers in Psychology*.
- Lecerf, T., de Ribaupierre, A., Fagot, D., & Dirk, J. (2007). Psychologie développementale Lifespan: théories, méthodes et résultats dans le domaine cognitif. *Gérontologie et Société*, 123, 85–107.
- Leder, H., & Bruce, V. (1998). Local and Relational Aspects of Face Distinctiveness. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 51(3), 449–473.
- Leder, H., Candrian, G., Huber, O., & Bruce, V. (2001). Configural features in the context of upright and inverted faces. *Perception*, 30(1), 73–83.
- Lee, A., & Harris, J. (1999). Problems with perception of space in Parkinson's disease: a questionnaire study. *Neuro-Ophthalmology*, 22(1), 1–15.
- Leibo, J. Z., Mutch, J., & Poggio, T. (2011). Why The Brain Separates Face Recognition From Object Recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 1–9.
- Lelard, T., Stins, J., & Mouras, H. (2019). Postural responses to emotional visual stimuli. *Neurophysiologie Clinique*.
- Lemaire, P. (2010). Cognitive strategy variations during aging. *Current Directions in Psychological Science*, 19(6), 363–369.
- Lenti, C., Lenti-Boero, D., & Giacobbe, A. (1999). Decoding of Emotional Expressions in Children and Adolescents. *Perceptual and Motor Skills*, 89(3), 808–814.
- Levinas, E. (1982). *Ethique et Infini* (Fayard). Paris: coll. « L'Espace intérieur ».
- Lewkowicz, D. J. (2014). Early experience and multisensory perceptual narrowing. *Developmental Psychobiology*, 56(2), 292–315.
- Lindquist, K. A., Wager, T. D., Kober, H., Bliss-Moreau, E., & Barrett, L. F. (2012). The brain basis of emotion: a meta-analytic review. *The Behavioral and Brain Sciences*, 35(3), 121–143.
- Liu, J., Harris, A., & Kanwisher, N. (2010). Perception of Face Parts and Face Configurations: An fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(1), 203–211.
- Liu, J., Higuchi, M., Marantz, A., & Kanwisher, N. (2000). The selectivity of the occipitotemporal M170 for faces. *NeuroReport*, 11(2), 337–341.
- Lobaugh, N. J., Gibson, E., & Taylor, M. J. (2006). Children recruit distinct neural systems for implicit emotional face processing. *NeuroReport*, 17(2), 215–219.
- Logie, R. H., Baddeley, A. D., & Woodhead, M. M. (1987). Face recognition, pose and ecological validity. *Applied Cognitive Psychology*, 1(1), 53–69. <https://doi.org/10.1002/acp.2350010108>
- Longmore, C. A., Liu, C. H., & Young, A. W. (2008). Learning Faces From Photographs. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(1), 77–100.
- Lott, L. A., Haegerstrom-Portnoy, G., Schneck, M. E., & Brabyn, J. A. (2005). Face recognition in the elderly. *Optometry and Vision Science*, 82(10), 874–881.
- Loued, W. B., Porcher, A., Lieb, L., Pigot, H., Lorrain, D., Chauvin, C., & Guérin, C. (2016). Amelis: concevoir un agent virtuel expressif intégré à un calendrier interactif pour des aînés. In *WACAI-Workshop Affect, Compagnon Artificiel, Interaction*.
- Luherne-du Boullay, V, Plaza, M., Perrault, A., Capelle, L., & Chaby, L. (2014). Atypical crossmodal emotional integration in patients with gliomas. *Brain and Cognition*, 92, 92–100.
- Luherne-du Boullay, Viviane. (2015). *Reconnaissance des visages et des voix émotionnels dans une population adulte avec gliome et après accident vasculaire cérébral*. Paris 8.

- MacPherson, S. E., Phillips, L. H., & Della Sala, S. (2006). Age-related differences in the ability to perceive sad facial expressions. *Aging Clinical and Experimental Research*.
- Mandonnet, E., Taillandier, L., & Duffau, H. (2017). Proposition de dépistage des gliomes diffus de bas grade dans la population de 20 à 40 ans. *La Presse Médicale*, 46(10), 911–920.
- Martinez-Corral, M., Pagonabarraga, J., Llebaria, G., Pascual-Sedano, B., Garcí'a-Sánchez, C., Gironell, A., & Kulisevsky, J. (2010). Facial emotion recognition impairment in patients with Parkinson's disease and isolated apathy. *Parkinson's Disease*, 2010.
- Martinez, A. M. (2017). Visual perception of facial expressions of emotion. *Current Opinion in Psychology*, 17, 27–33.
- Martinez, M., Multani, N., Anor, C. J., Misquitta, K., Tang-Wai, D. F., Keren, R., ... Tartaglia, M. C. (2018). Emotion detection deficits and decreased empathy in patients with Alzheimer's disease and Parkinson's disease affect caregiver mood and Burden. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10, 120.
- Massaro, D. W., & Egan, P. B. (1996). Perceiving affect from the voice and the face. *Psychonomic Bulletin and Review*, 3(2), 215–221.
- Mather, M. (2012). The emotion paradox in the aging brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Mather, M., Canli, T., English, T., Whitfield, S., Wais, P., Ochsner, K., ... Carstensen, L. L. (2004). Amygdala responses to emotionally valenced stimuli in older and younger adults. *Psychological Science*, 15, 256–263.
- Matsumoto, D., & Ekman, P. (2004). The relationship among expressions, labels, and descriptions of contempt. *Journal of Personality and Social Psychology*.
- Mattavelli, G., Pisoni, A., Casarotti, A., Comi, A., Sera, G., Riva, M., ... Papagno, C. (2019). Consequences of brain tumour resection on emotion recognition. *Journal of Neuropsychology*, 13(1), 1–21.
- Maurer, D., Le Grand, R., & Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Maylor, E. A. (1990). Recognizing and Naming Faces: Aging, Memory Retrieval, and the Tip of the Tongue State. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 45(6), 2–5.
- McKelvie, S. J. (1995). Emotional expression in upside-down faces: evidence for configural and componential processing. *The British Journal of Social Psychology*, 34 (Pt 3), 325–334.
- McKinlay, A., Grace, R. C., Dalrymple-Alford, J. C., & Roger, D. (2010). Characteristics of executive function impairment in Parkinson's disease patients without dementia. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(2), 268–277.
- McKone, E. (2004). Isolating the Special Component of Face Recognition: Peripheral Identification and a Mooney Face. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 30(1), 181–197.
- McKone, E., Davies, A. A., Darke, H., Crookes, K., Wickramariyaratne, T., Zappia, S., ... Fernando, D. (2013). Importance of the inverted control in measuring holistic face processing with the composite effect and part-whole effect. *Frontiers in Psychology*, 4, 33.
- McKone, E., Kanwisher, N., & Duchaine, B. C. (2007). Can generic expertise explain special processing for faces? *Trends in Cognitive Sciences*, 11(1), 8–15.
- McKone, E., & Robbins, R. (2012). Are Faces Special. In *Oxford Handbook of Face Perception*.
- Megreya, A. M., & Burton, A. M. (2008). Matching Faces to Photographs: Poor Performance in Eyewitness Memory (Without the Memory). *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(4), 364–372.
- Mehouard, E., Arizpe, J., Baker, C. I., & Yovel, G. (2014). Faces in the eye of the beholder: Unique and stable eye scanning patterns of individual observers. *Journal of Vision*.
- Meinhardt-Injac, B., Boutet, I., Persike, M., Meinhardt, G., & Imhof, M. (2017). From development to aging: holistic face perception in children, younger and older adults. *Cognition*, 158, 134–146.
- Mill, A., Allik, J., Realo, A., & Valk, R. (2009). Age-Related Differences in Emotion Recognition Ability:

A Cross-Sectional Study. *Emotion*.

- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202.
- Misiewicz, S., Brickman, A. M., & Tosto, G. (2018). Prosodic impairment in dementia: review of the literature. *Current Alzheimer Research*, 15(2), 157–163.
- Mitchell, R. L. C., Kingston, R. A., Bouças, B., & Sofia, L. (2011). The specificity of age-related decline in interpretation of emotion cues from prosody. *Psychology and Aging*, 26(2), 406.
- Molholm, S., Ritter, W., Murray, M. M., Javitt, D. C., Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). Multisensory auditory–visual interactions during early sensory processing in humans: a high-density electrical mapping study. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 115–128.
- Mondloch, C. J., Pathman, T., Maurer, D., Le Grand, R., & de Schonen, S. (2007). The composite face effect in six-year-old children: Evidence of adult-like holistic face processing. *Visual Cognition*, 15(5), 564–577.
- Mondloch, C. J., & Thomson, K. (2008). Limitations in 4-year-old children’s sensitivity to the spacing among facial features. *Child Development*, 79(5), 1513–1523.
- Montiroso, R., Peverelli, M., Frigerio, E., Crespi, M., & Borgatti, R. (2010). The Development of Dynamic Facial Expression Recognition at Different Intensities in 4- to 18-Year-Olds. *Social Development*, 19(1), 71–92.
- Moreno, C., Borod, J. C., Welkowitz, J., & Alpert, M. (1993). The perception of facial emotion across the adult life span. *Developmental Neuropsychology*, 9(3–4), 305–314.
- Mroczek, D. K. (2001). Age and emotion in adulthood. *Current Directions in Psychological Science*, 10(3), 87–90.
- Muir, D., Lee, K., Hains, C., & Hains, S. (2005). Infant perception and production of emotions during face-to-face interactions with live and “virtual” adults. In *Emotional Development: Recent Research Advances* (pp. 207–233). New York, NY, US: Oxford University Press New York.
- Mura, T., Dartigues, J.-F., & Berr, C. (2010). How many dementia cases in France and Europe? Alternative projections and scenarios 2010–2050. *European Journal of Neurology*, 17(2), 252–259.
- Murphy, N. A., & Isaacowitz, D. M. (2010). Age effects and gaze patterns in recognising emotional expressions: An in-depth look at gaze measures and covariates. *Cognition and Emotion*, 24(3), 436–452.
- Narme, P., Bonnet, A.-M., Dubois, B., & Chaby, L. (2011). Understanding facial emotion perception in Parkinson’s disease: The role of configural processing. *Neuropsychologia*, 49(12).
- Neargarder, S. A., Stone, E. R., Cronin-Golomb, A., & Oross, S. (2003). The impact of acuity on performance of four clinical measures of contrast sensitivity in Alzheimer’s disease. *Journals of Gerontology Series B-Psychological Sciences and Social Sciences*, 58(1), P54–P62.
- Newport, C., Wallis, G., Reshitnyk, Y., & Siebeck, U. E. (2016). Discrimination of human faces by archerfish (*Toxotes chatareus*). *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep27523>
- Nimrod, G., & Ben-Shem, I. (2015). Successful Aging as a Lifelong Process. *Educational Gerontology*, 41(11), 814–824.
- Ochsner, K. N., & Lieberman, M. D. (2001). The emergence of social cognitive neuroscience. *American Psychologist*, 56(9), 717–734.
- Oker, A., Glas, N., Pecune, F., & Pelachaud, C. (2018). An embodied virtual agent platform for emotional Stroop effect experiments: A proof of concept. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 24, 107–114.
- Orgeta, V., & Phillips, L. H. (2008). Effects of age and emotional intensity on the recognition of facial emotion. *Experimental Aging Research*, 34(1), 63–76.
- Ortiz, A., del Puy Carretero, M., Oyarzun, D., Yanguas, J. J., Buiza, C., Gonzalez, M. F., & Etxebarria, I. (2007). Elderly users in ambient intelligence: Does an avatar improve the interaction? In *Universal access in ambient intelligence environments* (pp. 99–114). Springer.
- Oster, H. (2004). *The repertoire of infant facial expressions: an ontogenetic perspective*. Oxford

University Press Oxford, UK.

- Otsuka, Y. (2014). Face recognition in infants: A review of behavioral and near-infrared spectroscopic studies. *Japanese Psychological Research*, 56(1), 76–90.
- Owada, K., Kojima, M., Yassin, W., Kuroda, M., Kawakubo, Y., Kuwabara, H., ... Yamasue, H. (2018). Computer-analyzed facial expression as a surrogate marker for autism spectrum social core symptoms. *PLoS One*, 13(1), e0190442.
- Owsley, C., Sekuler, R., & Boldt, C. (1981). Aging and low-contrast vision: face perception. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 21(2), 362–365.
- Palermo, R., & Coltheart, M. (2004). Photographs of facial expression: Accuracy, response times, and ratings of intensity. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 36(4), 634–638.
- Palermo, R., Willis, M. L., Rivolta, D., McKone, E., Wilson, C. E., & Calder, A. J. (2011). Impaired holistic coding of facial expression and facial identity in congenital prosopagnosia. *Neuropsychologia*, 49(5), 1226–1235.
- Parsons, T., Gaggioli, A., & Riva, G. (2017). Virtual reality for research in social neuroscience. *Brain Sciences*, 7(4), 42.
- Pascalis, O., & Kelly, D. J. (2009). The origins of face processing in humans phylogeny and ontogeny. *Perspectives on Psychological Science*, 4(2), 200–209.
- Paulmann, S., Jessen, S., & Kotz, S. A. (2009). Investigating the Multimodal Nature of Human Communication. *Journal of Psychophysiology*, 23(2), 63–76.
- Pecune, F., Cafaro, A., Chollet, M., Philippe, P., & Pelachaud, C. (2014). Suggestions for extending saiba with the vib platform. In *Workshop on Architectures and Standards for IVAs, held at the "14th International Conference on Intelligent Virtual Agents (IVA 2014)": Proceedings*.
- Pellicano, E., Rhodes, G., & Peters, M. (2006). Are preschoolers sensitive to configural information in faces? *Developmental Science*, 9(3), 270–277.
- Penn, D. L., Sanna, L. J., & Roberts, D. L. (2008). Social cognition in schizophrenia: an overview. *Schizophrenia Bulletin*, 34(3), 408–411.
- Pennisi, P., Tonacci, A., Tartarisco, G., Billeci, L., Ruta, L., Gangemi, S., & Pioggia, G. (2016). Autism and social robotics: A systematic review. *Autism Research*, 9(2), 165–183.
- Perakakis, P. E., Idrissi, S., Vila, J., & Ivanov, P. C. (2012). Dynamical patterns of human postural responses to emotional stimuli. *Psychophysiology*, 49(9), 1225–1229.
- Pfütze, E.-M., Sommer, W., & Schweinberger, S. R. (2002). Age-related slowing in face and name recognition: Evidence from event-related brain potentials. *Psychology and Aging*, 17(1), 140–160. Retrieved from <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0882-7974.17.1.140>
- Phan, K. L., Wager, T., Taylor, S. F., & Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: A meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage*, 16, 331–348.
- Piepers, D. W., & Robbins, R. A. (2012). A review and clarification of the terms “holistic,” “configural,” and “relational” in the face perception literature. *Frontiers in Psychology*.
- Pitcher, D., Walsh, V., & Duchaine, B. (2011). The role of the occipital face area in the cortical face perception network. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2579-1>
- Plaza, M., Capelle, L., Maigret, G., & Chaby, L. (2013). Strengths and weaknesses of multimodal processing in a group of adults with gliomas. *Neurocase*, 19(3), 302–312.
- Plaza, M., du Boullay, V., Perrault, A., Chaby, L., & Capelle, L. (2014). A case of bilateral frontal tumors without “frontal syndrome.” *Neurocase*, 20(6), 671–683.
- Posner, J., Russell, J. A., & Peterson, B. S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 17(3), 715–734.
- Prazak, E. R., & Burgund, E. D. (2014). Keeping it real: Recognizing expressions in real compared to schematic faces. *Visual Cognition*, 22(5), 737–750.

- Prkachin, G. C. (2003). The effects of orientation on detection and identification of facial expressions of emotion. *British Journal of Psychology*, *94*(1), 45–62.
- Proverbio, A. M., & Galli, J. (2016). Women are better at seeing faces where there are none: An ERP study of face pareidolia. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *11*(9), 1501–1512.
- Puce, a, Allison, T., Bentin, S., Gore, J. C., & McCarthy, G. (1998). Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *18*(6), 2188–2199.
- Puce, A., Allison, T., Asgari, M., Gore, J. C., & McCarthy, G. (1996). Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures: a functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of Neuroscience*, *16*(16), 5205–5215.
- Puce, A., Allison, T., Gore, J. C., & McCarthy, G. (1995). Face-sensitive regions in human extrastriate cortex studied by functional MRI. *Journal of Neurophysiology*, *74*(3), 1192–1199.
- Ramon, M., & Rossion, B. (2010). Impaired processing of relative distances between features and of the eye region in acquired prosopagnosia—Two sides of the same holistic coin? *Cortex*, *46*(3), 374–389.
- Raynaud, J.-P. (2011). Ce qui reste et n'a pas été pris en compte: les TED-NOS. *L'information Psychiatrique*, *87*(5), 387–392.
- Raz, N., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., & Land, S. (2009). Genetic and vascular modifiers of age-sensitive cognitive skills: effects of COMT, BDNF, ApoE, and hypertension. *Neuropsychology*, *23*(1), 105.
- Reed, A. E., Chan, L., & Mikels, J. A. (2014). Meta-analysis of the age-related positivity effect: age differences in preferences for positive over negative information. *Psychology and Aging*, *29*(1), 1.
- Resnick, S. M., Lamar, M., & Driscoll, I. (2007). Vulnerability of the orbitofrontal cortex to age-associated structural and functional brain changes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1121*, 562–575.
- Rhodes, G. (1988). Looking at faces: First-order and second-order features as determinants of facial appearance. *Perception*, *17*, 43–63.
- Rhodes, G., & Jeffery, L. (2006). Adaptive norm-based coding of facial identity. *Vision Research*, *46*(18), 2977–2987.
- Rhodes, M. G., & Anastasi, J. S. (2012). The own-age bias in face recognition: A meta-analytic and theoretical review. *Psychological Bulletin*.
- Ricciardi, L., Visco-Comandini, F., Erro, R., Morgante, F., Bologna, M., Fasano, A., ... Kilner, J. (2017). Facial emotion recognition and expression in Parkinson's disease: an emotional mirror mechanism? *PLoS One*, *12*(1), e0169110.
- Riddoch, M. J., Johnston, R. A., Bracewell, R. M., Boutsen, L., & Humphreys, G. W. (2008). Are faces special? A case of pure prosopagnosia. *Cognitive Neuropsychology*, *25*(1), 3–26.
- Rigau, V., Zouaoui, S., Mathieu-Daudé, H., Darlix, A., Maran, A., Trétarre, B., ... others. (2011). French brain tumor database: 5-year histological results on 25 756 cases. *Brain Pathology*, *21*(6), 633–644.
- Rimé, B. (2016). L'émergence des émotions dans les sciences psychologiques. *L'Atelier Du CRH*, (16), 0–14.
- Robert, L. (1983). *Mécanismes cellulaires et moléculaires du vieillissement* (Masson). Paris, France: Masson.
- Rodger, H., Lao, J., & Caldara, R. (2018). Quantifying facial expression signal and intensity use during development. *Journal of Experimental Child Psychology*, *174*, 41–59.
- Rodger, H., Vizioli, L., Ouyang, X., & Caldara, R. (2015). Mapping the development of facial expression recognition. *Developmental Science*.
- Roelofs, K., Hagenars, M. A., & Stins, J. (2010). Facing freeze: Social threat induces bodily freeze in humans. *Psychological Science*, *21*(11), 1575–1581.
- Rook, K. S. (2015). Social networks in later life: Weighing positive and negative effects on health and

- well-being. *Current Directions in Psychological Science*, 24(1), 45–51.
- Rossion, B. (2014). Understanding face perception by means of human electrophysiology. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Rossion, B., & Jacques, C. (2011). The N170: understanding the time-course of face perception in the human brain. *The Oxford Handbook of ERP Components*, (december), 115–142.
- Rossion, B., & Michel, C. (2018). Normative accuracy and response time data for the computerized Benton Facial Recognition Test (BFRT-c). *Behavior Research Methods*. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29549569>
- Rossion, Bruno. (2014). Understanding face perception by means of human electrophysiology. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Roussel, M., Eugénie, L., Narme, P., Czernecki, V., Didier, L., Krystkowiak, P., & Godefroy, O. (2016). Le syndrome dysexécutif dans la maladie de Parkinson: étude GREFEX. *Revue Neurologique*, 172, A105.
- Rousselet, G. A., Husk, J. S., Pernet, C. R., Gaspar, C. M., Bennett, P. J., & Sekuler, A. B. (2009). Age-related delay in information accrual for faces: Evidence from a parametric, single-trial EEG approach. *BMC Neuroscience*, 10, 114.
- Ruffman, T., Halberstadt, J., Murray, J., Jack, F., & Vater, T. (2019). Empathic Accuracy: Worse Recognition by Older Adults and Less Transparency in Older Adult Expressions Compared With Young Adults. *The Journals of Gerontology: Series B*.
- Ruffman, T., Henry, J. D., Livingstone, V., & Phillips, L. H. (2008). A meta-analytic review of emotion recognition and aging: Implications for neuropsychological models of aging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*.
- Russell, J. A., & Barrett, L. F. (1999). Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: Dissecting the elephant. *Journal of Personality and Social Psychology*.
- Rybarczyk, P., Koba, Y., Rushen, J., Tanida, H., & De Passillé, A. M. (2001). Can cows discriminate people by their faces? *Applied Animal Behaviour Science*, 74(3), 175–189.
- Said, C. P., Moore, C. D., Norman, K. A., Haxby, J. V., & Todorov, A. (2010). Graded representations of emotional expressions in the left superior temporal sulcus. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 4, 6.
- Saint-Georges, C., Guinchat, V., Chamak, B., Apicella, F., Muraletti, F., & Cohen, D. (2013). Signes précoces d'autisme: d'où vient-on? Où va-t-on? *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 61(7–8), 400–408.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications - ETRA '00*.
- Sander, D. (2013). Models of emotion: The affective neuroscience approach. In J. Armony & P. Vuilleumier (Eds.), *The Cambridge handbook of human affective neuroscience*. (pp. 5–57). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Sander, D. (2015). *Le monde des émotions*. Belin.
- Sander, D., & Scherer, K. R. (2014). Chapitre 1. La psychologie des émotions: survol des théories et débats essentiels. In *Traité de psychologie des émotions* (pp. 11–50). Dunod.
- Santini, B., Talacchi, A., Squintani, G., Casagrande, F., Capasso, R., & Miceli, G. (2012). Cognitive outcome after awake surgery for tumors in language areas. *Journal of Neuro-Oncology*, 108(2), 319–326.
- Sato, W., & Yoshikawa, S. (2007). Spontaneous facial mimicry in response to dynamic facial expressions. *Cognition*, 104(1), 1–18.
- Scheller, E., Büchel, C., & Gamer, M. (2012). Diagnostic features of emotional expressions are processed preferentially. *PLoS ONE*.
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4), 695–729.

- Scherf, K. S., Behrmann, M., Humphreys, K., & Luna, B. (2007). Visual category-selectivity for faces, places and objects emerges along different developmental trajectories. *Developmental Science*.
- Schilbach, L. (2015). Eye to eye, face to face and brain to brain: novel approaches to study the behavioral dynamics and neural mechanisms of social interactions. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 3, 130–135.
- Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). A second-person neuroscience in interaction. *Behavioral and Brain Sciences*.
- Schirmer, A., & Adolphs, R. (2017). Emotion Perception from Face, Voice, and Touch: Comparisons and Convergence. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(3), 216–228.
- Schurgin, M. W., Nelson, J., Iida, S., Ohira, H., Chiao, J. Y., & Franconeri, S. L. (2014). Eye movements during emotion recognition in faces. *Journal of Vision*.
- Searcy, J. H., & Bartlett, J. C. (1996). Inversion and processing of component and spatial-relational information in faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(4), 904–915.
- Searcy, J. H., Bartlett, J. C., & Memon, A. (1999). Age differences in accuracy and choosing in eyewitness identification and face recognition. *Memory and Cognition*, 27(3), 538–552.
- Sedda, A., Petito, S., Guarino, M., & Stracciari, A. (2017). Identification and intensity of disgust: distinguishing visual, linguistic and facial expressions processing in Parkinson disease. *Behavioural Brain Research*, 330, 30–36.
- Seddoh, A., Blay, A., Ferraro, R., & Swisher, W. (2018). Prosodic Perception in Aging Individuals: a Focus on Intonation. *Current Psychology*, 1–13.
- Sergent, J., Ohta, S., & MacDonald, B. (1992). Functional neuroanatomy of face and object processing. A positron emission tomography study. *Brain*, 115 Pt 1, 15–36.
- Shimokawa, A., Yatomi, N., Anamizu, S., Torii, S., Isono, H., Sugai, Y., & Kohno, M. (2001). Influence of deteriorating ability of emotional comprehension on interpersonal behavior in Alzheimer-type dementia. *Brain and Cognition*, 47(3), 423–433.
- Shuman, V., & Scherer, K. R. (2014). Concepts and structures of emotions. In R. Pekrun & L. Linnenbrink-Garcia (Eds.), *International handbook of emotions in education* (pp. 13–35). Taylor & Francis.
- Sims, T., Hogan, C. L., & Carstensen, L. L. (2015). Selectivity as an emotion regulation strategy: lessons from older adults. *Current Opinion in Psychology*, 3, 80–84.
- Slessor, G., Phillips, L. H., & Bull, R. (2010). Age-related changes in the integration of gaze direction and facial expressions of emotion. *Emotion*, 10(4), 555.
- Slessor, G., Riby, D. M., & Finnerty, A. N. (2013). Age-related differences in processing face configuration: The importance of the eye region. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, 68(222–231).
- Slessor, G., Venturini, C., Bonny, E. J., Insch, P. M., Rokaszewicz, A., & Finnerty, A. N. (2016). Specificity of age-related differences in eye-gaze following: evidence from social and nonsocial stimuli. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 71(1), 11–22.
- Smith, F. W., Cottrell, G. W., Gosselin, F., & Schyns, P. . (2005). Transmitting and Decoding Facial Expressions. *Psychological Science*, 16(3), 184–189.
- Smith, F. W., & Schyns, P. G. (2009). Smile through your fear and sadness. *Psychological Science*, 20(10), 1202–1209.
- Somerville, L. H., Fani, N., & McClure-Tone, E. B. (2011). Behavioral and neural representation of emotional facial expressions across the lifespan. *Developmental Neuropsychology*, 36(4), 408–428.
- Sparrow, S., Cicchetti, D., & Balla, D. (1989). The Vineland Adaptive Behavior Scales: Interview edition, survey. In *Major psychological assessment instruments*.
- Spezio, M. L., Adolphs, R., Hurley, R. S. E., & Piven, J. (2007). Abnormal use of facial information in

- high-functioning autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*.
- Sprengelmeyer, R., Young, A. W., Mahn, K., Schroeder, U., Woitalla, D., Büttner, T., ... Przuntek, H. (2003). Facial expression recognition in people with medicated and unmedicated Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 41(8), 1047–1057.
- Srinivasan, R., Golomb, J. D., & Martinez, A. M. (2016). A Neural Basis of Facial Action Recognition in Humans. *Journal of Neuroscience*, 36(16), 4434–4442.
- St Jacques, P. L., Winecoff, A., & Cabeza, R. (2013). Emotion and aging: linking neural mechanisms to psychological theory. In J. Armony & P. Vuilleumier (Eds.), *The Cambridge Handbook of Human Affective Neuroscience* (pp. 635–662). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Stagg, S. D., Slavny, R., Hand, C., Cardoso, A., & Smith, P. (2014). Does facial expressivity count? How typically developing children respond initially to children with autism. *Autism*, 18(6), 704–711.
- Stein, B. E., Burr, D., Constantinidis, C., Laurienti, P. J., Alex Meredith, M., Perrault Jr, T. J., ... others. (2010). Semantic confusion regarding the development of multisensory integration: a practical solution. *European Journal of Neuroscience*, 31(10), 1713–1720.
- Stein, B. E., Stanford, T. R., & Rowland, B. A. (2014). Development of multisensory integration from the perspective of the individual neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(8), 520.
- Stephoe, A., Shankar, A., Demakakos, P., & Wardle, J. (2013). Social isolation, loneliness, and all-cause mortality in older men and women. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(15), 5797–5801.
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47(10), 2015–2028.
- Stienen, B. M. C., Tanaka, A., & de Gelder, B. (2011). Emotional Voice and Emotional Body Postures Influence Each Other Independently of Visual Awareness. *PLoS ONE*, 6(10), e25517. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025517>
- Stone, S. M. (2009). Human facial discrimination in horses: Can they tell us apart? *Animal Cognition*, 13(1), 51–61.
- Streri, A., Coulon, M., & Guellai, B. (2013). The foundations of social cognition: Studies on face/voice integration in newborn infants. *International Journal of Behavioral Development*, 37(2), 79–83.
- Sullivan, S., & Ruffman, T. (2004). Emotion recognition deficits in the elderly. *International Journal of Neuroscience*, 114(3), 403–432.
- Sullivan, S., Ruffman, T., & Hutton, S. B. (2007). Age differences in emotion recognition skills and the visual scanning of emotion faces. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*.
- Sumby, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual Contribution to Speech Intelligibility in Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26(2), 212–215.
- Suzuki, A., Hoshino, T., Shigemasa, K., & Kawamura, M. (2006). Disgust-specific impairment of facial expression recognition in Parkinson's disease. *Brain*, 129(3), 707–717.
- Szanto, K., Dombrovski, A. Y., Sahakian, B. J., Mulsant, B. H., Houck, P. R., Reynolds, C. F., & Clark, L. (2012). Social emotion recognition, social functioning, and attempted suicide in late-life depression. *The American Journal of Geriatric Psychiatry: Official Journal of the American Association for Geriatric Psychiatry*, 20(3), 257–265.
- Tadic, M., Cuspidi, C., & Hering, D. (2016). Hypertension and cognitive dysfunction in elderly: blood pressure management for this global burden. *BMC Cardiovascular Disorders*, 16(1), 208.
- Taler, V., Baum, S. R., Chertkow, H., & Saumier, D. (2008). Comprehension of grammatical and emotional prosody is impaired in Alzheimer's disease. *Neuropsychology*, 22(2), 157–163.
- Tanaka, J. W., & Gordon, I. (2012). Features, Configuration, and Holistic Face Processing. In *Oxford Handbook of Face Perception* (pp. 177–194).
- Tanaka, J. W., Kaiser, M. D., Butler, S., & Le Grand, R. (2012). Mixed emotions: Holistic and analytic perception of facial expressions. *Cognition & Emotion*, 26(6), 961–977.
- Tanaka, J. W., & Sengco, J. A. (1997). Features and their configuration in face recognition. *Memory*

- and *Cognition*, 25(5), 583–592.
- Tang, X., Wu, J., & Shen, Y. (2016). The interactions of multisensory integration with endogenous and exogenous attention. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 61, 208–224.
- Tantam, D., Holmes, D., & Cordess, C. (1993). Nonverbal expression in autism of Asperger type. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 23(1), 111–133.
- Taphoorn, M. J. B., Schiphorst, A. K., Snoek, F. J., Lindeboom, J., Wolbers, J. G., Karim, A., ... Heimans, J. J. (1994). Cognitive functions and quality of life in patients with low-grade gliomas: the impact of radiotherapy. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 36(1), 48–54.
- Taylor, M. J., McCarthy, G., Saliba, E., & Degiovanni, E. (1999). ERP evidence of developmental changes in processing of faces. *Clinical Neurophysiology*, 110(5), 910–915.
- Templier, L., Chetouani, M., Plaza, M., Belot, Z., Bocquet, P., & Chaby, L. (2015). Altered identification with relative preservation of emotional prosody production in patients with Alzheimer's disease. *Geriatric et Psychologie Neuropsychiatrie Du Vieillessement*, 13(1).
- Testa, J. A., Beatty, W. W., Gleason, A. C., Orbelo, D. M., & Ross, E. D. (2001). Impaired affective prosody in AD: Relationship to aphasic deficits and emotional behaviors. *Neurology*, 57(8), 1474–1481.
- Thomas, K. M., Drevets, W. C., Whalen, P. J., Eccard, C. H., Dahl, R. E., Ryan, N. D., & Casey, B. J. (2001). Amygdala response to facial expressions in children and adults. *Biological Psychiatry*, 49(4), 309–316.
- Thomas, L. A., De Bellis, M. D., Graham, R., & LaBar, K. S. (2007). Development of emotional facial recognition in late childhood and adolescence: Report. *Developmental Science*, 10(5), 547–558.
- Thorpe, S., Fize, D., & Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381(6582), 520–522.
- Tobin, A., Favelle, S., & Palermo, R. (2016). Dynamic facial expressions are processed holistically, but not more holistically than static facial expressions. *Cognition and Emotion*, 30(6), 1208–1221.
- Tracy, J. L., & Robins, R. W. (2008). The Automaticity of Emotion Recognition. *Emotion*.
- Trevisan, D. A., Hoskyn, M., & Birmingham, E. (2018). Facial Expression Production in Autism: A Meta-Analysis. *Autism Research*, 11, 1586–1601.
- Tronick, E. (1982). *Social interchange in infancy: Affect, cognition, and communication*. Univ Park Press.
- Tucha, O., Smely, C., Preier, M., & Lange, K. W. (2000). Cognitive deficits before treatment among patients with brain tumors. *Neurosurgery*, 47(2), 324–334.
- Tzourio-Mazoyer, N., De Schonen, S., Crivello, F., Reutter, B., Aujard, Y., & Mazoyer, B. (2002). Neural correlates of woman face processing by 2-month-old infants. *NeuroImage*, 15(2), 454–461.
- Uljarevic, M., & Hamilton, A. (2013). Recognition of emotions in autism: A formal meta-analysis. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43, 1517–1526.
- Ulrich, R., Miller, J., & Schröter, H. (2007). Testing the race model inequality: An algorithm and computer programs. *Behavior Research Methods*, 39(2), 291–302.
- Vaidya, A. R., Jin, C., & Fellows, L. K. (2014). Eye spy: The predictive value of fixation patterns in detecting subtle and extreme emotions from faces. *Cognition*.
- Valentine, T. (1991). A Unified Account of the Effects of Distinctiveness, Inversion, and Race in Face Recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 43(2), 161–204.
- Van den Stock, J., Righart, R., & de Gelder, B. (2007). Body Expressions Influence Recognition of Emotions in the Face and Voice. *Emotion*, 7, 487–494.
- Vannetzel, L., Chaby, L., Cautru, F., Cohen, D., & Plaza, M. (2011). Neutral versus emotional human stimuli processing in children with pervasive developmental disorders not otherwise specified. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 5(2).

- Victor, C., Scambler, S., Bond, J., & Bowling, A. (2000). Being alone in later life: loneliness, social isolation and living alone. *Reviews in Clinical Gerontology, 10*(4), 407–417.
- Vinciarelli, A., Pantic, M., & Bourlard, H. (2009). Social signal processing: Survey of an emerging domain. *Image and Vision Computing, 27*(12), 1743–1759.
- Viola, P., Jones, M., & others. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *CVPR (1), 1*, 511–518.
- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J., & Dolan, R. J. (2001). Effects of Attention and Emotion on Face Processing in the Human Brain: An Event-Related fMRI Study. *Neuron, 30*(3), 829–841. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00328-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00328-2)
- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J., & Dolan, R. J. (2003). Distinct spatial frequency sensitivities for processing faces and emotional expressions. *Nature Neuroscience, 6*(6), 624.
- Vuilleumier, P., & Pourtois, G. (2007). Distributed and interactive brain mechanisms during emotion face perception: Evidence from functional neuroimaging. *Neuropsychologia, 45*(1), 174–194.
- Vytal, K., & Hamann, S. (2010). Neuroimaging support for discrete neural correlates of basic emotions: A voxel-based meta-analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22*(12), 2864–2885.
- Wabnegger, A., Ille, R., Schwingenschuh, P., Katschnig-Winter, P., Kögl-Wallner, M., Wenzel, K., & Schienle, A. (2015). Facial emotion recognition in Parkinson's disease: an fMRI investigation. *PLoS One, 10*(8), e0136110.
- Wager, T. D., Kang, J., Johnson, T. D., Nichols, T. E., Satpute, A. B., & Barrett, L. F. (2015). A Bayesian Model of Category-Specific Emotional Brain Responses. *PLOS Computational Biology, 11*(4), e1004066.
- Waiden, T. A., & Field, T. M. (1990). Preschool children's social competence and production and discrimination of affective expressions. *British Journal of Developmental Psychology, 8*(1), 65–76.
- Walker-Smith, G. J., Gale, A. G., & Findlay, J. M. (2013). Eye movement strategies involved in face perception. *Perception.*
- Wallace, S., Coleman, M., & Bailey, A. (2008). An investigation of basic facial expression recognition in autism spectrum disorders. *Cognition and Emotion, 22*(7), 1353–1380.
- Want, S. C., Pascalis, O., Coleman, M., & Blades, M. (2003). Face facts: Is the development of face recognition in middle childhood really so special? *The Development of Face Processing in Infancy and Early Childhood: Current Perspectives, (2003)*, 207–221.
- Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review, 113*(2), 358.
- Wegrzyn, M., Riehle, M., Labudda, K., Woermann, F., Baumgartner, F., Pollmann, S., ... Kissler, J. (2015). Investigating the brain basis of facial expression perception using multi-voxel pattern analysis. *Cortex, 69*, 131–140.
- Wegrzyn, M., Vogt, M., Kireçlioglu, B., Schneider, J., & Kissler, J. (2017). Mapping the emotional face. How individual face parts contribute to successful emotion recognition. *PLoS ONE.*
- Wells, G. L., & Olson, E. A. (2003). Eyewitness Testimony. *Annual Review of Psychology, 54*(1), 277–295.
- Wenger, G. C., Davies, R., Shahtahmasebi, S., & Scott, A. (1996). Social isolation and loneliness in old age: review and model refinement. *Ageing & Society, 16*(3), 333–358.
- Werchan, D. M., Baumgartner, H. A., Lewkowicz, D. J., & Amso, D. (2018). The origins of cortical multisensory dynamics: Evidence from human infants. *Developmental Cognitive Neuroscience, 34*, 75–81.
- Whitall, J., & Clark, J. E. (2018). A Perception--Action Approach to Understanding Typical and Atypical Motor Development. In *Advances in child development and behavior* (Vol. 55, pp. 245–272). Elsevier.
- Widen, S. C. (2013). Children's interpretation of facial expressions: The long path from valence-based to specific discrete categories. *Emotion Review.*
- Widen, S. C., & Russell, J. A. (2008). Children acquire emotion categories gradually. *Cognitive*

Development.

- Widen, S. C., & Russell, J. A. (2010). The “Disgust face” conveys anger to children. *Emotion*.
- Widen, S. C., & Russell, J. A. (2013). Children’s recognition of disgust in others. *Psychological Bulletin*.
- Wiese, H., Komes, J., & Schweinberger, S. R. (2012). Daily-life contact affects the own-age bias and neural correlates of face memory in elderly participants. *Neuropsychologia*, 50(14), 3496–3508.
- Wieser, M. J., & Brosch, T. (2012). Faces in context: A review and systematization of contextual influences on affective face processing. *Frontiers in Psychology*.
- Williams, L. ., Light, G. A., Braff, D. L., & Ramachandran, V. S. (2010). Reduced multisensory integration in patients with schizophrenia on a target detection task. *Neuropsychologia*, 48(10), 3128–3136.
- Williams, L. M., Brown, K. J., Palmer, D., Liddell, B. J., Kemp, A. H., Olivieri, G., ... Gordon, E. (2006). The mellow years?: neural basis of improving emotional stability over age. *The Journal of Neuroscience*, 26(24), 6422–6430.
- Williams, L. M., Mathersul, D., Palmer, D. M., Gur, R. C., Gur, R. E., & Gordon, E. (2009). Explicit identification and implicit recognition of facial emotions: I. Age effects in males and females across 10 decades. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31(3), 257–277.
- Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder: A meta-analysis of recent research. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 55, 217–228.
- Winston, J. S., Henson, R. N. A., Fine-Goulden, M. R., & Dolan, R. J. (2004). fMRI-Adaptation Reveals Dissociable Neural Representations of Identity and Expression in Face Perception. *Journal of Neurophysiology*, 92(3), 1830–1839.
- Wong, B., Cronin-Golomb, A., & Nearing, S. (2005). Patterns of visual scanning as predictors of emotion identification in normal aging. *Neuropsychology*, 19(6), 739–749.
- Wood, A., Rychlowska, M., Korb, S., & Niedenthal, P. (2016). Fashioning the Face: Sensorimotor Simulation Contributes to Facial Expression Recognition. *Trends in Cognitive Sciences*.
- Wykowska, A., Chaminade, T., & Cheng, G. (2016). Embodied artificial agents for understanding human social cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1693), 20150375.
- Xavier, J., Magnat, J., Sherman, A., Gauthier, S., Cohen, D., & Chaby, L. (2017). A developmental and clinical perspective of rhythmic interpersonal coordination: From mimicry toward the interconnection of minds. *Journal of Physiology Paris*, 110(4), 420–426.
- Xavier, J., Vannetzel, L., Viaux, S., Leroy, A., Plaza, M., Tordjman, S., ... J.M., G. (2011). Reliability and diagnostic efficiency of the Diagnostic Inventory for Disharmony (DID) in Youths with Pervasive Developmental Disorder and Multiple Complex Developmental Disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 5, 1493–1499.
- Xavier, J., Vignaud, V., Ruggiero, R., Bodeau, N., Cohen, D., & Chaby, L. (2015). A multidimensional approach to the study of emotion recognition in autism spectrum disorders. *Frontiers in Psychology*, 6(DEC).
- Yarbus, A. (1968). Eye movements and vision. *Neuropsychologia*.
- Yi, L., Feng, C., Quinn, P. C., Ding, H., Li, J., Liu, Y., & Lee, K. (2014). Do individuals with and without autism spectrum disorder scan faces differently? A new multi-method look at an existing controversy. *Autism Research*, 7, 72–83.
- Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces. *Journal of Experimental Psychology*, 81(1), 141–145.
- Young, A. W., & Burton, A. M. (2017). Recognizing Faces. *Current Directions in Psychological Science*, 26(3), 212–217.
- Young, A. W., & Burton, A. M. (2018). Are We Face Experts? *Trends in Cognitive Sciences*.
- Yovel, G., & Kanwisher, N. (2005). The neural basis of the behavioral face-inversion effect. *Current*

Biology, 15(24), 2256–2262.

- Zafeiriou, S., Zhang, C., & Zhang, Z. (2015). A survey on face detection in the wild: past, present and future. *Computer Vision and Image Understanding*, 138, 1–24.
- Zhao, M. F., Zimmer, H. D., Shen, X., Chen, W., & Fu, X. (2016). Exploring the Cognitive Processes Causing the Age-Related Categorization Deficit in the Recognition of Facial Expressions. *Experimental Aging Research*, 42(4), 348–364.
- Zhao, Q.-F., Tan, L., Wang, H.-F., Jiang, T., Tan, M.-S., Tan, L., ... others. (2016). The prevalence of neuropsychiatric symptoms in Alzheimer's disease: systematic review and meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, 190, 264–271.
- Ziaei, M., & Fischer, H. (2016). Emotion and Aging: The Impact of Emotion on Attention, Memory, and Face Recognition in Late Adulthood. In *Neuroimaging Personality, Social Cognition, and Character* (pp. 259–278).