UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Ecole doctorale Environnement Santé (E2s)
UFR des Sciences Humaines et Sociales

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline : Psychologie Cognitive

par
Nicolas DOLLION

Préparée au sein du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation
Equipe 7 : Ethologie développementale et psychologie cognitive

Date de soutenance prévue le 14 Décembre 2015

Le traitement des expressions faciales au cours de la première année : Développement et rôle de l'olfaction

Directeur de thèse
Jean-Yves Baudouin

Présentée devant le jury composé de :

Olivier PASCALIS	Directeur de Recherches, CNRS, Grenoble	Rapporteur
Karine DORE-MAZARS	Professeur à l'Université Paris Descartes	Rapporteur
Robert SOUSSIGNAN	Maître de Conférences, Université de Reims	Examinateur
Rémy VERSACE	Professeur à l'Université Lumière Lyon 2	Examinateur
Benoist SCHAAL	Directeur de Recherches, CNRS, Dijon	Président
Jean-Yves BAUDOUIN	Professeur à l'Université de Bourgogne	Directeur

©Nicolas DOLLION, 2015

Je dédie cette thèse à mes parents,
Jean-Michel et Marie-Christine Dollion.

« Il faut se laisser emporter par ces vagues successives
porteuses de fulgurances splendides et fascinantes.
Sans chercher obstinément à comprendre,
mais davantage à ressentir ».
Didier Grappe

Remerciements

Je souhaiterais remercier la région Bourgogne qui a financé mon allocation et ce projet de recherche, ainsi que le CNRS, l'INRA, l'Agence Nationale de la Recherche et l'Union Européenne pour leur participation financière.

Je remercie Luc Pénicaud, directeur du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, pour veiller au bon déroulement du travail des chercheurs et doctorants, mais aussi, et surtout, pour œuvrer à offrir un cadre de travail aussi idéal que celui que l'on peut trouver dans son laboratoire.

Un grand merci aux membres du jury, Karine Doré-Mazars, Oliver Pascalis, Robert Soussignan et Rémy Versace pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse. Un remerciement tout spécial à Rémy Versace et Robert Soussignan pour avoir accepté de faire partie du comité de suivi de cette thèse et pour leurs avis précieux lors de nos réunions annuelles. Je tiens également à remercier Olivier Pascalis et Karine Doré-Mazars pour avoir accepté d'être les relecteurs de ce manuscrit. La participation de chacun représente un honneur pour moi et je suis pressé de pouvoir échanger directement avec vous lors de la soutenance à venir.

Un grand merci à Benoist Schaal, pour son aide dans la réflexion sur l'ensemble de mes travaux et sa contribution à mon perfectionnement scientifique. Au travers de vos suggestions enrichissantes et de votre enthousiasme scientifique sans borne, vous avez su me donner l'élan dont j'avais besoin afin de progresser. Votre dévouement à la recherche a constitué pour moi une source d'inspiration au cours de ces années.

Je tiens bien entendu à tout spécialement remercier mon superviseur de thèse : Jean-Yves Baudouin. Merci pour le suivi, l'encadrement et les conseils que vous m'avez prodigué tout au long de ces trois années. Vous avez su me donner la liberté dont j'avais besoin tout en sachant avec justesse me rattraper au moment opportun, lorsque je m'égarais. La pertinence de vos conseils, votre expertise méthodologique, technique et scientifique ont été indispensables à la bonne réussite de ce travail et à ma formation. Enfin, j'ai pu constater dans mon environnement doctoral, que la confiance doctorant-superviseur était quelque chose de

précieux. Je tiens donc à féliciter le fait que je fasse partie des doctorants pouvant affirmer avoir pleine confiance en mon encadrant. Avec discrétion, vous avez toujours œuvré pour moi. Merci pour votre honnêteté et votre droiture.

Ensuite, je souhaite exprimer ma gratitude auprès des différents membres de l'équipe qui ont tous contribué au cours de ces trois années à ma formation. Karine, pour son aide dans la réflexion sur la création et l'interprétation des expériences. Arnaud, pour m'avoir aidé à appréhender l'EEG, pour m'avoir formé à cette technique, et avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer et de partager de riches discussions (notamment au tiki). Renaud, pour m'avoir aidé à appréhender certains principes en EEG et m'avoir permis d'enseigner dans son UE. Robert, pour son engagement dans le projet de thèse et sa collaboration précieuse dans les travaux, ses conseils méthodologiques, mais aussi pour les discussions théoriques partagées. Ornella, pour sa contribution dans les travaux et pour m'avoir aidé à me perfectionner dans l'expérimentation sur l'enfant. Un merci tout spécial à Sylvianne qui œuvre au quotidien au recrutement des parents et de leurs enfants, ainsi que pour son enthousiasme. Sans la contribution de chacun, rien de tout cela n'aurait était possible. Je vous remercie donc tous très chaleureusement pour votre aide, votre patience et vos conseils précieux.

Un remerciement en particulier à Adelaïde de Heering. Collaborer avec toi a été plus qu'un plaisir. Nos discussions sur l'enfant, tes conseils en EEG et ton aide pour m'insérer auprès de différents chercheurs, à la fois lors de tes passages au laboratoire et lors des congrès, ont toujours été plus qu'enrichissants et m'ont réellement été précieux.

Un grand merci à l'ensemble des membres du laboratoire et surtout à toute l'équipe nous permettant au jour le jour de pouvoir travailler dans un cadre aussi agréable : Cédric, Michel, Olivier, Christine, Véronique, Daniela, Patricia, Sabine et Fabienne. Vous êtes tous, chacun à votre manière, aussi importants les uns que les autres pour le bon déroulement de ce qui peut être accompli dans ces murs. Je tiens donc à vous remercier pour votre aide durant ces trois ans, ainsi que pour ces bons moments passés avec vous.

Mes remerciements se tournent également vers la mission culture scientifique et l'Experimentarium, et plus spécialement vers Lionel Maillot, Coralie Biguzzi et Elise Cellier-Holzem, qui m'ont permis au travers de l'Experimentarium de pouvoir communiquer aux enfants et au grand public mes recherches et surtout ma passion pour mon domaine. Vous rappelez à tous que la science ne consiste pas qu'en la production du savoir, c'est également

la diffuser auprès de tous. Un clin d'œil tout particulier à Elise. Ta passion sans borne pour la recherche est une douce contagion. Merci pour ton amitié et ton électrisante bonne humeur.

Je tiens à exprimer toute ma sincère reconnaissance auprès de mes collègues de bureau. Une équipe de recherche est importante, mais une équipe « de choc » l'est tout autant. Vous avez su tous m'épauler à différents niveaux au cours de ce parcours de thèse et ce bien que je « ne respecte pas le goût des autres ». Merci pour votre aide, votre soutien, mais surtout pour votre amitié. Merci Heber, pour ton amitié sincère, ta joie de vivre, ta frivolité, pour avoir toujours été là pour me changer les idées et pour nous ramener un peu de soleil du brésil sous les latitudes bourguignonnes. Merci à Camille, pour ton aide dans la rédaction du manuscrit, pour les débats théoriques que nous avons eu, mais aussi pour ta bonne humeur, ton excentricité, ta subtilité et ton soutien. Merci à Justine, bien que tu puisses sembler discrète de prime abord, tu as été plus que précieuse tant de par ton aide dans mes travaux et la correction de ce manuscrit, qu'au travers des moments scientifiques et de rire partagés, ton oreille attentive, ton franc-parler et tes talents culinaires. Enfin, je n'oublie pas Fanny. Bien que tu nous aies quitté pour rejoindre ton idylle breton, tu constitues un membre important de notre petite équipe. Merci à tous les loulous, vous êtes formidables. Une petite pensée également pour Méliné, tu as été une amie précieuse au cours de mon Master2, et tu as également continué de l'être et de te montrer présente durant cette thèse bien que tu aies « suivi ton chum » au Québec.

Une énorme merci à ma famille. A mes parents qui m'ont toujours épaulé et soutenu dans l'ensemble de mon parcours universitaire et qui ont toujours su répondre présents. Bien que ne comprenant pas toujours mes choix, vous m'avez toujours conforté à poursuivre et à étayer ma soif scientifique. Merci également à Emilie et Zozo, qui ont été une source de soutient dans ce parcours et qui m'ont aidé dans la finalisation du manuscrit.

Mes remerciements vont également vers Loétitia et Dominique dont j'ai eu plaisir à participer à l'encadrement de stage de Master1. Je remercie également l'ensemble des parents et des enfants qui ont participé à mes études. Travailler sur le jeune enfant est une expérience riche aussi bien scientifiquement qu'humainement. J'ai pris plaisir aussi bien à expérimenter avec eux, qu'à tâcher de les faire sourire à chacune des expériences.

Enfin, le choix de s'engager dans une thèse et de vouloir poursuivre dans la recherche est un choix qui se fait grâce à la rencontre de passionnés venant vous piquer du virus qui est le leur et/ou vous confortent dans votre choix par l'inspiration qu'ils suscitent en vous. Je

tiens donc à remercier ces chercheurs qui m’ont transmis leur passion au cours de leurs enseignements, par leur rencontre ou par leur encadrement : Ludovic Dickel, François-Xavier Boulet, Bertrand Deputte, mais surtout Daphné Maurer et Rémy Versace.

Résumé

La première année de vie constitue une étape critique dans le développement des capacités de traitement des expressions faciales. Olfaction et expressions sont toutes deux étroitement liées, et il est reconnu que dès la naissance les enfants sont capables d'intégrer leur environnement de façon multi-sensorielle. Toutefois, la plupart des travaux sur le traitement multimodal des visages et des expressions se sont restreints à l'étude des interactions audio-visuelles.

Dans ce travail de thèse, nous avons en premier lieu levé différentes ambiguïtés concernant l'ontogenèse des capacités de traitement des expressions. Les résultats obtenus ont permis de spécifier l'évolution des stratégies d'exploration visuelle des émotions au cours de la première année, et de démontrer la présence d'une distinction progressive des expressions selon leur signification émotionnelle. Au moyen de l'EEG, nous avons aussi précisé la nature et le décours temporel de la distinction des expressions chez les nourrissons de 3 mois.

Le second objectif de nos travaux a été d'approfondir les connaissances sur le traitement multi-sensoriel des expressions, en nous intéressant spécifiquement aux interactions olfacto-visuelles. Nos expériences en potentiels évoqués ont permis de préciser le décours de l'intégration cérébrale de l'odeur dans le traitement des expressions chez l'adulte, et de démontrer la présence d'interactions similaires chez l'enfant de 3 mois. Nous avons également démontré qu'à 7 mois, les odeurs déclenchent une recherche d'expression spécifique. Il ressort de ces travaux que l'olfaction pourrait contribuer à l'établissement des capacités de traitement des expressions faciales.

Mots-clés : développement, expressions faciales, jeune enfant, odeur, multi-sensorialité, poursuite de mouvements oculaires, électroencéphalographie.

Abstract

The first year of life is critical for the development of the abilities to process facial expressions. Olfaction and expressions are both strongly linked to each other, and it is well known that infants are able to multisensorially integrate their environment as early as birth. However, most of the studies interested in multisensory processing of facial expressions are restricted to the investigation of audio-visual interactions.

In this thesis, we firstly aimed to resolve different issues concerning the ontogenesis of infants' ability to process facial expressions. Our results allowed to specify the development of visual exploratory strategies of facial emotions along the first year of life, and to demonstrate that a progressive distinction of expressions according to their emotional meaning is present. Using the EEG, we were also able to specify the nature and the time course of facial expressions distinction in 3-month-old infants.

The second objective of our studies was to expand the knowledge concerning the multisensory processing of facial expressions. More specifically we wanted to investigate the influence of olfacto-visual interactions on this processing. Our event-related potentials experiments allowed to specify the time course of the cerebral integration of olfaction in the visual processing of emotional faces in adults, and to demonstrate that similar interactions are present in infants as young as 3 month-old. We also demonstrated that at 7 months of age odors trigger the search for specific facial expressions. Our results suggest that olfaction might contribute to the development of infants' ability to process facially displayed emotions.

Keywords: development, facial expressions, infant, odor, multi-sensoriality, eye-tracking, electroencephalography.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **V**

RESUME ..... **IX**

ABSTRACT ..... **XI**

TABLE DES MATIERES ..... **XII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XVII**

LISTE DES FIGURES ..... **XIX**

LISTE DES ANNEXES ..... **XXI**

INTRODUCTION : L'EXPRESSION FACIALE EN TANT QU'HERITAGE ET OUTIL **1**

0.1. DEFINITION ET CONSIDERATIONS EVOLUTIVES 2
0.2. LA LECTURE DES EXPRESSIONS : CAPACITE INNEE OU ACQUISE 6

CHAPITRE 1 : LE DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS **9**

1.1. L'EXTRACTION DES INFORMATIONS FACIALES : UNE CAPACITE ACQUISE 10
1.1.1. Remise en cause de l'innéité : un développement progressif des capacités de traitement du visage 10
1.1.2. L'attraction pour les visages en tant que base développementale pour l'acquisition d'une expertise 14
1.2. ONTOGENESE DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS AU COURS DE LA PREMIERE ANNEE 17
1.2.1. Le nourrisson de la naissance à 3 mois 18
1.2.2. Le nourrisson de 3 à 7 mois 211
1.2.3. Le nourrisson de 7 mois à 1 an 233
1.2.4. Le rôle clé de l'expérience dans cette ontogenèse 255
1.3. LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ L'ADULTE ET LE NOURRISSON 299
1.3.1. Comment distingue-t-on les expressions ? 30
1.3.2. Comment accède-t-on à la signification des expressions ? 34
1.3.3. Les bases cérébrales du traitement du visage et des expressions faciales 41

CHAPITRE 2 : LE TRAITEMENT MULTI-SENSORIEL DES EXPRESSIONS FACIALES **47**

2.1. LE TRAITEMENT MULTI-SENSORIEL CHEZ LE NOURRISSON 48
2.2. INFLUENCE DU CONTEXTE SUR LE TRAITEMENT DU VISAGE CHEZ L'ADULTE 552
2.3. INFLUENCES DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LE TRAITEMENT DE VISAGE CHEZ L'ADULTE 56
2.4. PISTES INTERPRETATIVES DES INTERACTIONS OLFACTION-TRAITEMENT EXPRESSIF 59
2.5. LE TRAITEMENT MULTI-SENSORIEL DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ LE NOURRISSON 662
2.5.1. La multi-sensorialité, base de traitement et d'apprentissage des expressions 662
2.5.2. Rôle potentiel de l'olfaction dans le traitement et l'apprentissage des expressions 65

CHAPITRE 3 : STRATEGIE D'EXPLORATION VISUELLE ET REACTIONS FACIALES AUX EXPRESSIONS EMOTIONNELLES CHEZ LES ENFANTS DE 3, 7 ET 12 MOIS (EXPERIENCE 1) 71

3.1. INTRODUCTION 772
3.2. METHODE 74
3.1.1. Participants 74
3.2.1. Matériel et méthode 75
A. Stimuli 75
B. Appareillage et enregistrement comportemental 76
3.2.2. Procédure 77
C. Dispositif expérimental 77
D. Phase de Calibration 78
E. Phase de test 78
3.2.3. Analyses des données 79
3.2.4. Analyses statistiques 83
3.3. RESULTATS 84
3.3.1. L'exploration visuelle des expressions faciales par les nourrissons 84
3.3.2. Les réactions faciales des nourrissons aux expressions 89
3.3.3. Attention visuelle des nourrissons aux expressions et détournement du Regard 93
3.4. DISCUSSION 96
3.4.1. Discussion sur l'exploration visuelle des expressions faciales 96
A. Le pattern d'exploration des expressions chez l'enfant de 7 mois et plus 97
B. Le pattern d'exploration des expressions faciales chez les nourrissons de 3 mois 98
C. L'importance relative des différents éléments faciaux dans le traitement des expressions faciales 98
D. Stratégies d'exploration basées sur l'élément versus stratégies configurales 99
E. L'impact de l'orientation du regard sur les stratégies d'exploration visuelle 101
3.4.2. Discussion sur les réactions faciales aux expressions émotionnelles 10102
A. Y a-t-il reproduction des expressions faciales observées ? 10102
B. Réaction émotionnelle au signal communiqué par l'expression versus imitation du signal émotionnel perçu?. 103
C. Les effets de l'expression faciale sur le temps de regard et le détournement du regard 105
3.4.3. Mise en cohérence et discussion de l'ensemble des données récoltées 106

CHAPITRE 4 : NATURE ET DECOURS TEMPOREL DU TRAITEMENT CEREBRAL DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ LE NOURRISSON DE 3 MOIS (EXPERIENCE 2) 113

4.1. INTRODUCTION 114
4.2. MATERIEL ET METHODE 116
4.2.1. Participants 116
4.2.2. Stimuli 116
4.2.3. Procédure 117
4.2.4. Enregistrement et analyses des données EEG 119
4.3. RESULTATS 11211
4.4. DISCUSSION 11255

CHAPITRE 5 : IMPACT DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LES REPONSES CEREBRALES AUX EXPRESSIONS FACIALES CHEZ L'ADULTE (EXPERIENCE 3) 131

5.1. INTRODUCTION 132
5.2. MATERIEL ET METHODE 134
5.2.1. Participants 134
5.2.2. Stimuli 135
A. Les stimuli visuels 135
B. Les stimuli olfactifs 135

5.2.3. Procédure ... *136*
5.2.4. Enregistrement et analyses EEG ... *138*
5.3. RESULTATS ... 140
5.3.1. Les différentes étapes du traitement des expressions faciales ... *140*
5.3.2. Les différentes étapes de l'effet du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales ... *144*
5.3.3. Analyses complémentaires sur la première étape d'influence indifférenciée du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales ... *147*
5.4. DISCUSSION ... 150
5.4.1. Les différentes étapes de traitement des expressions faciales ... *151*
5.4.2. Les différentes étapes des effets du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales ... *154*

CHAPITRE 6 : IMPACT DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LES REPONSES CEREBRALES AUX VISAGES CHEZ LES NOURRISSONS DE 3 MOIS (EXPERIENCE 4) ... 161

6.1. INTRODUCTION ... 16162
6.2. MATERIEL ET METHODE ... 164
6.2.1. Participants ... *164*
6.2.2. Stimuli ... *165*
A. Stimuli visuels ... 165
B. Stimuli olfactifs ... 165
6.2.3. Procédure ... *166*
6.2.4. Enregistrement et analyses EEG ... *167*
6.3. RESULTATS ... 168
6.4. DISCUSSION ... 173
6.4.1. Les effets du contexte olfactif sur le traitement de visages inexpressifs ... *173*
6.4.2. Quelles sont les causes de ces interactions entre olfaction et traitement de visages ? ... *177*

CHAPITRE 7 : EFFET DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LES STRATEGIES D'EXPLORATION VISUELLE DU VISAGE CHEZ LES ENFANTS DE 7 MOIS (EXPERIENCE 5) ... 181

7.1. INTRODUCTION ... 18182
7.2. METHODE ... 185
7.2.1. Participants ... *185*
7.2.2. Matériel ... *186*
A. Stimuli visuels ... 186
B. Stimuli Olfactifs ... 186
7.2.3. Procédure ... *187*
7.2.4. Enregistrement et analyses des données ... *190*
A. Transformation des données oculométriques ... 190
B. Analyses des données ... 193
C. Analyses statistiques ... 193
7.3. RESULTATS ... 195
7.3.1. Effet des odeurs sur le temps d'exploration global des visages ... *195*
7.3.2. Effet du contexte olfactif sur l'exploration des différents éléments faciaux ... *197*
7.4. DISCUSSION ... 20202
7.4.1. Effets de l'exposition au contexte olfactif déplaisant sur les stratégies d'exploration du visage ... *20303*
7.4.2. Comment interpréter les différences observées entre les deux contextes olfactifs étudiés ? *20606*

CHAPITRE 8 : DISCUSSION GENERALE 21313

8.1. LE DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ LES ENFANTS DE 3 A 12 MOIS 21414

8.2. L'IMPACT DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS FACIALES ET LE ROLE POTENTIEL DE L'OLFACTION DANS L'ELABORATION DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS 21919

BIBLIOGRAPHIE 22727

ANNEXES 26161

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : Tableau récapitulatif des unités d'actions et muscles impliqués dans la production des 6 expressions de base (Ekman & Friesen, 1978) **3**

Liste des figures

FIGURE 1 : Illustration des stimuli utilisés dans les expériences de Goren, Sarty et Wu (1975) **15**

FIGURE 2 : Illustration des différentes ondes enregistrées en électroencéphalographie chez le nourrisson pour le traitement des expressions faciales **20**

FIGURE 3 : Photographie illustrant le dispositif de la « falaise visuelle »..... **24**

FIGURE 4 : Illustrations des différentes méthodes d'instigations des divers types de traitements du visage extraites de l'article de Maurer, Le Grand & Mondloch (2002)..... **31**

FIGURE 5 : Schéma du système neuronal distribué humain pour la perception du visage de Haxby, Hoffman et Gobbini (2000)..... **43**

FIGURE 6 : Schéma du modèle mis à jour du système neuronal distribué humain pour la perception du visage de Haxby & Gobbini (2011) **44**

FIGURE 7 : Illustration du dispositif utilisé par Spelt (1948), pour le conditionnement audio-tactile des fœtus. **51**

FIGURE 8 : Photographie d'un homme exprimant la peur, extrait de la base de visages d'Ekman (Ekman & Friesen, 1976)..... **53**

FIGURE 9 : Exemple de stimuli utilisés par Aviezer et collaborateurs (2008) dans leurs expériences..... **55**

FIGURE 10 : Schéma d'un essai de 9 secondes d'une expression présentée à l'enfant..... **79**

FIGURE 11 : Carte exploratoire représentant le temps moyen (en ms) que les enfants ont passé à regarder la région entourant chaque pixel selon l'expression de l'avatar..... **80**

FIGURE 12 : Illustration des différentes Aires d'Intérêts (AOIs) utilisées au cours de l'expérience **81**

FIGURE 13 : Temps moyen passé par les enfants à explorer les différentes zones du visage selon leur âge **85**

FIGURE 14 : Temps moyen passé par les enfants à explorer les différentes AOIs du visage selon leur âge et l'expression faciale de l'avatar **87**

FIGURE 15 : Pourcentage d'enfants ayant souri (AU 12 : élévation du coin des lèvres) lors de la présentation du visage de joie de l'avatar selon leur âge et l'orientation du regard de l'avatar **90**

FIGURE 16 : Pourcentage d'enfants de 3, 7 et 12 mois ayant exprimé des expressions faciales négatives selon l'expression émotionnelle et l'orientation du regard de l'avatar..... **93**

FIGURE 17 : Pourcentage de temps passé par les enfants à regarder l'avatar selon leur âge et l'expression faciale de l'avatar..... **94**

FIGURE 18 : Fréquence de détournement du regard des enfants selon les différentes expressions émotionnelles de l'avatar **95**

FIGURE 19 : Schéma représentant l'enchaînement de deux essais **117**

FIGURE 20 : Illustration des enregistrements vidéo du nourrisson et des stimuli présentés simultanément à l'écran **119**

FIGURE 21 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit pour les différentes expressions faciales **123**

FIGURE 22 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes fronto-centrales pour les différentes expressions faciales **124**

FIGURE 23 : Schéma représentant la séquence d'événements au cours de 3 essais **137**

FIGURE 24 : Effet simple de l'expression sur les électrodes occipito-pariétales pour la P100, la N170, la P200 et la N250 ..... **141**

FIGURE 25 : Effet simple de l'expression sur les électrodes centrales et pariétales pour la VPP et la LPP **142**

FIGURE 26 : Effet simple du contexte olfactif sur les électrodes centrales pour la VPP **145**

FIGURE 27 : Interaction entre expression et contexte olfactif sur les électrodes occipito-pariétales de l'hémisphère droit pour la P200 et la N250. ..... **147**

FIGURE 28 : (A) Décours temporel des effets simples du contexte olfactif sur chacune des électrodes dans la fenêtre temporelle allant de 115 à 195 ms, calculé au moyen d'un critère de significativité consécutive sur 15 point d'échantillonnage. (B) Décours temporel des différences entre chaque contexte olfactif dans la même fenêtre temporelle pour les électrodes ayant montré un effet significatif du contexte olfactif (le même critère de significativité consécutive était appliqué) **148**

FIGURE 29 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit pour les différentes conditions olfactives **170**

FIGURE 30 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit pour les différentes conditions olfactives **171**

FIGURE 31 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes centrales pour les différentes conditions olfactives **172**

FIGURE 32 : Représentation schématique de l'organisation temporelle de la présentation des visages et des odeurs au cours de la session expérimentale **189**

FIGURE 33 : Organigramme de la procédure de transformation des données oculométriques (d'après Baudouin et al., 2012) **192**

FIGURE 34 : Temps moyen de regard sur les visages pendant les phases de familiarisation et de test, selon le contexte/groupe olfactif **196**

FIGURE 35 : Pourcentage moyen de changement de temps de regard sur les visages pendant la phase de test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon le contexte/groupe olfactif **197**

FIGURE 36 : Changement moyen de temps de regard en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon les AOIs et le contexte olfactif **198**

FIGURE 37 : Changement moyen de pourcentage d'enfants regardant les différentes AOIs en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisations, selon l'AOI et le contexte olfactif **200**

FIGURE 38 : Changement moyen de pourcentage de temps de regard sur les AOIs en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon l'AOI et le contexte olfactif **202**

FIGURE 39 : Représentation schématique du face space expressif chez les enfants de 3 mois et les enfants de 7 mois et plus **219**

FIGURE 40 : Représentation schématique de l'effet du contexte olfactif plaisant sur le face space expressif chez les enfants de 3 mois et du contexte olfactif déplaisant chez les enfants de 7 mois **224**

Liste des annexes

ANNEXE 1 : ARTICLE SOUMIS AUPRES DE *JOURNAL OF EXPERIMENTAL CHILD PSYCHOLOGY : When do babies become emotional screeners ? Visual exploration of emotional facial expresions in 3, 7 and 12 mont-old inffants* **263**

ANNEXE 2 : ARTICLE SOUMIS AUPRES DE *DEVELOPMENTAL PSYCHOLOGY : Do 3-12 month-old infants mimic facial expressions ? A study of emotional development using eye movement tracking and fine-grained coding of facial movements*..... **301**

ANNEXE 3: ARTICLE PUBLIE DANS *NEUROSPYCHOLOGIA : Contextual odors modulate the visual processing of emotional facial expressions : An ERP study*..... **347**

Introduction :
L'expression faciale en tant qu'héritage et outil

Communiquer notre état émotionnel et percevoir celui de nos congénères est une capacité centrale pour une espèce aussi grégaire et sociale que l'est l'être humain. Tantôt se reflétant au travers de notre capacité d'empathie, tantôt servant les théories de l'esprit, notre capacité à intégrer l'émotion ressentie par autrui permet une optimisation constante de nos comportements. Grâce à elle, nous pouvons à la fois adapter nos interactions avec nos congénères et anticiper leurs actions à venir ; nous pouvons également nous renseigner sur les qualités des objets de notre environnement ou encore sur la présence d'une menace. Parmi les différents modes de communication que nous possédons, l'expression faciale représente un mode de communication non-verbale privilégié, puisqu'elle fournit une porte d'accès direct à l'état émotionnel d'autrui. Les expressions faciales constituent ainsi un pivot de la communication émotionnelle et notre capacité à les lire/décrypter est essentielle, tant d'un point de vue adaptatif que social.

0.1. DEFINITION ET CONSIDERATIONS EVOLUTIVES

Les expressions faciales peuvent se définir comme correspondant aux variations de l'activité musculaire du visage menant à des configurations faciales spécifiques, reflétant les variations de l'état interne de l'individu et en lien avec à une situation émotionnelle particulière. Elles constituent également un mode de communication non-verbal privilégié et de prime importance dans l'espèce humaine. En effet, de par leur association à des états émotionnels spécifiques, les expressions faciales arborées par un individu nous fournissent des informations sur son état affectif actuel et sur notre environnement courant (Grèzes, Dezecache & Eskenazi, 2015 ; Hess & Fisher, 2014). Ainsi, sur la base de notre aptitude à lire et interpréter les différentes expressions, nous sommes capables de réguler et anticiper nos interactions avec nos congénères, mais aussi avec les objets de notre environnement. Le visage constitue donc un outil de communication relayant l'état émotionnel, les motivations et intentions d'autrui sur la base de variations visibles d'expressions (Schmidt & Cohn, 2001). Six catégories d'expressions basiques ont été démontrées comme étant reconnues au travers des cultures, et sont considérées comme étant les expressions faciales émotionnelles universelles chez l'humain : la colère, le dégoût, la peur, la surprise, la joie et la tristesse (Darwin, 1872 ; Ekman, 1973 ; Ekman & Keltner, 1997). Malgré la présence de certains désaccords quant au fait que ces expressions signalent exactement les mêmes états

émotionnels entre les cultures et la présence d'une certaine variabilité interculturelle dans leur production, la plupart des auteurs s'accordent sur le fait qu'une uniformité dans les patterns de mouvements faciaux est présente (Fridlund, 1994 ; Russell & Fernandez-dols, 1997). Ces expressions de base sont finement décrites dans le Facial Action Coding System élaboré par Ekman et Friesen, dans lequel les unités d'actions et les muscles impliqués dans la production de chacune sont décrits (Ekman & Friesen, 1978).

Expression	Unités d'actions impliquées	Mouvements et muscles impliqués
Joie	6+12	élévation des joues (*orbicularis oculi*) + étirement du coin des lèvres (*zygomaticus major*)
Tristesse	1+4+15	élévation de la partie centrale des sourcils (*frontalis pars medialis*) + abaissement des parties latérales des sourcils (*corrugator supercilii*) + abaissement du coin des lèvres (*depressor oculi oris*)
Surprise	1+2+5b+26	élévation de la partie centrale des sourcils (*frontalis pars medialis*) + élévation des parties latérales des sourcils (*frontalis pars lateralis*) + légère élévation de la paupière supérieure (*levator palpebrae superioris*) + relâchement et abaissement de la mâchoire (*temporalis* et muscle pterygoïdien interne relaxés)
Peur	1+2+4+5+7+20+26	élévation de la partie centrale des sourcils (*frontalis pars medialis*) + élévation des parties latérales des sourcils (*frontalis pars lateralis*) + abaissement et rapprochement des sourcils (*corrugator supercilii*) + élévation de la paupière supérieure (*levator palpebrae superioris*) + étirement des paupières (*orbicularis oculi pars palpebralis*) + étirement des lèvres (*risorius w/ platysma*) + relâchement et abaissement de la mâchoire (*temporalis* et muscle pterygoïdien interne relaxés)
Colère	4+5+7+23	Abaissement et rapprochement des sourcils (*corrugator supercilii*) + élévation de la paupière supérieure (*levator palpebrae superioris*) + resserrement des paupières (*orbicularis oculi pars palpebralis*) + resserrement des lèvres (*orbicularis oris*)
Dégout	9+15+16	plissement du nez (*levator labii superioris alaeque nasi*) + abaissement du coin des lèvres (*depressor oculi oris*) + abaissement de la lèvre inférieure (*depressor labii inferioris*)

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des unités d'actions et muscles impliqués dans la production des 6 expressions de base (Ekman & Friesen, 1978).

Prenant en considération la présence d'expressions faciales émotionnelles et d'une lecture de ces signaux chez les primates humains et non-humains, différents auteurs ont ainsi avancé que, d'un point de vue phylogénétique, l'expression faciale ne se limiterait pas uniquement à l'histoire humaine. En effet, différentes études sur le mammifère ont permis de démontrer la présence de différents patterns d'expressions pouvant être utilisés comme indicateurs fidèles de l'état interne (douleur, stress, agressivité, …) de l'animal (rongeurs : Defensor, Corley, Blanchard & Blanchard, 2012 ; Langford et al., 2010 ; Sotocinal

et al., 2011 ; bovins : Sandem, Janczak, Salte & Braastad, 2006 ; canidés : Wiss, 2011). Concernant les études sur les primates, ces dernières ont permis de démontrer la présence de plusieurs patterns faciaux signalant l'état émotionnel, les intentions et les motivations de l'individu, et étant reconnus et interprétés de façon fiable lors d'interactions sociales (Nahm, Perret, Amaral & Allright ; Parr & Heinz, 2009 ; Parr, Waller & Heinzt, 2008). Il apparaît donc que notre capacité à recourir aux expressions faciales en tant que mode de communication non-verbal est le fruit de notre histoire évolutive. Poursuivant sur cette trame de recherche, différents auteurs ont ainsi mis en avant la présence de similarités dans les patterns d'expressions entre primates humains et non-humains (pour une revue voir Schmidt & Cohn, 2006). Toutefois, ce propos est à pondérer, puisqu'il existe des différences en termes d'unités d'actions présentes/absentes et en termes de fréquence d'utilisation (Vick, Waller, Parr, Pasqualini & Bard, 2007). De plus, des expressions pouvant apparaître comme physiquement similaires ne vont pas communiquer exactement le même signal chez les deux espèces, malgré des fonctions ultimes similaires (Parr, Waller, Vick & Bard, 2007 ; Waller & Dunbar, 2005). Par exemple, le sourire humain peut être perçu comme ressemblant à l'expression « dents découvertes » du macaque. Ces expressions ont toutes deux une fonction ultime affiliative (i.e., établir, maintenir et/ou renforcer les liens avec les congénères), mais vont communiquer des signaux différents : le sourire signale la joie chez l'humain ; « les dents découvertes » est un signal de soumission à l'adversaire chez le macaque (Maestripieri, 1997).

D'un point de vue évolutif, certains auteurs suggèrent que les expressions faciales ont été conservées au travers du phylum évolutif parce qu'elles apportent un avantage adaptatif à l'individu et améliorent sa survie et son succès auprès de ses congénères (Schmidt & Cohn, 2001 ; Susskind & Anderson, 2008). Il est proposé qu'originellement les expressions remplissent une fonction de régulation sensorielle. Dans leurs études sur les expressions de peur et de dégoût, Susskind et collaborateur démontrent que les configurations faciales de ces expressions viennent moduler l'exposition des différents récepteurs sensoriels situés sur le visage aux stimulations environnementales (Susskind & Anderson, 2008). Pour la peur, la configuration permet d'augmenter l'exposition aux stimulations grâce à l'écarquillement des yeux qui permet d'élargir le champ visuel, et grâce à l'élargissement de la cavité nasale qui quant à elle permet d'augmenter le volume d'air inspiré et la prise d'informations olfactives. En cas de dégoût, c'est le pattern opposé qui est observé : la configuration faciale mène à une diminution du volume de la cavité nasale et à un rétrécissement du champ visuel, menant ainsi

à une diminution du flux d'air inspiré et à un évitement de la stimulation (Susskind et al., 2008). Ainsi, il est suggéré que les expressions faciales humaines auraient pour origine leur capacité fonctionnelle à altérer l'exposition et le traitement sensoriels, et qu'au cours de l'évolution elles aient acquis une valeur signalétique et une fonction communicative (Susskind et al., 2008 ; Susskind & Anderson, 2008 ; Whalen & Kleck, 2008). Il a notamment été avancé que comme le langage, les expressions faciales constituent un mode de communication, permettant à un individu de moduler l'activité d'autrui par communication de son propre état interne, mais aussi pouvant être utilisé comme signal pour adapter son propre comportement (Dezecahe, Mercier & Scott-Phillips, 2013 ; Schmidt & Cohn, 2001). Leur maintien au niveau évolutif en tant que mode de communication, malgré la présence d'un mode de communication plus efficace qu'est le langage, se justifie par l'honnêteté de ce signal (peu de contrôle sur leur production comme, par exemple, le sourire de Duschesnnes, et diminution de la survie et du succès auprès des congénères en cas de mensonge) et de par le fait qu'elles constituent un mode de communication venant suppléer le langage (Dezecahe, Mercier & Scott-Phillips, 2013). Ce rôle fondamental de l'expression en tant qu'outil de communication est tout particulièrement mis en avant dans les travaux sur la contagion émotionnelle de Dezecache et collaborateurs (2013). Dans cette étude, un participant C regarde la vidéo d'un participant B, lui-même en train de regarder la vidéo d'un participant A exprimant de la peur, de la joie ou demeurant neutre. Il est démontré que les réactions faciales spontanées du participants C sont modulées en congruence avec le contenu émotionnel de la vidéo regardée par B. Ces résultats démontrent ainsi la facilité et l'efficacité avec laquelle l'émotion se transmet au sein d'un groupe humain, et met en avant le rôle crucial joué par l'expression faciale dans ce phénomène de transmission (Dezecache et al., 2013). Il est notamment spéculé que ce mimétisme spontané de l'expression d'autrui participe au phénomène de contagion émotionnelle (transmission de l'état émotionnel entre individus) et au ressenti empathique (Hess & Fisher, 2014). Un autre bénéfice de cette transmission/imitation est qu'elle servirait à la régulation de l'interaction avec autrui, par la synchronisation et la coordination qu'elle permet, et viendrait ainsi *in fine* desservir des buts affiliatifs (Hess & Fisher, 2014 ; Hess, Houde & Fisher, 2014 ; Hatfield, Rapson & Le, 2011).

Notre efficacité à détecter et percevoir les expressions faciales présentes dans notre environnement se retrouve aussi au travers d'études en paradigme de recherche visuelle (Becker, Anderson, Mortensen, Neufeld & Neel, 2011 ; Calvo, Nummmenmaa & Avero, 2008 ; Crouzet, Kirchner & Thorpe, 2010 ; Gerritsen, Frischen, Blake, Smilek & Eastwwod, 2008 ; Hansen & Hansen, 1988 ; Shasteen, Sasson & Pinkham, 2014) ;

démontrant ainsi la sensibilité de notre système visuel aux visages. Enfin, cette efficacité du traitement des expressions se reflète par une capacité à détecter les expressions même lorsqu'elles sont présentées en subliminal (i.e., ≈ 20-30ms), et une aptitude de celles-ci à venir moduler nos comportements et nos traitements de stimuli émotionnels, là aussi lorsqu'elles sont présentées de façon subliminale (Bannerman, Milders, de Gelder & Sahraie, 2009 ; Bannerman, Milders, & Sahraie, 2009 ; 2010 Li, Zinbarg, Boehm & Paller, 2008 ; Neumann & Lozo, 2012 ; Pause, Ohrt, Prehn & Fersti, 2004 ; Sweeny, Grabowecky, Suzuki & Paller, 2009).

0.2. LA LECTURE DES EXPRESSIONS : CAPACITE INNEE OU ACQUISE

Sur la base de leurs observations respectives attestant de la présence d'expressions tant chez l'humain que chez l'animal, et d'un caractère universel/transculturel de ces expressions, Ekman (1973 ; Ekman & Keltner, 1997) et Darwin (1872) avancent que la production et la perception des expressions pourraient être innées.

Cette hypothèse d'une capacité innée de traitement des informations faciales peut se retrouver au travers des travaux de certains chercheurs, comme Kanwisher. En effet, selon cet auteur, la spécialisation des régions cérébrales (notamment le gyrus fusiforme) pour le traitement des visages, et plus précisément pour la reconnaissance de l'identité, serait prédéterminée génétiquement, tandis que les expériences joueraient un rôle mineur dans la spécialisation de ces régions et le développement d'une expertise dans le traitement des visages. Ici, les expériences sont supposées ne pas être nécessaires pour que le système de perception des visages se développe. Elles n'auraient pour rôle que de venir affiner les capacités du système (Kanwisher, 2010).

Bien que cette idée d'une innéité soit séduisante en terme adaptatif, puisqu'elle laisse entendre que dès la naissance les nourrissons seraient aptes à percevoir les différentes expressions et à ajuster leurs comportements selon le signal émotionnel véhiculé, les données de la littérature actuelle viennent contredire cette vision innée des capacités de traitement des expressions. En effet, à la lumière des éléments actuels il semble davantage que notre expertise dans leur traitement soit acquise et soit le fruit d'un développement progressif.

Cette considération des capacités de traitement des expressions comme étant acquises plutôt qu'innées, amène nécessairement deux questions : Comment cette aptitude se développe-t-elle ? Quels sont les mécanismes et facteurs sur lesquels elle repose, et quels sont ceux participant à son élaboration ? Afin de répondre à ces questions, nous nous attèlerons dans le chapitre suivant à faire un état des lieux concernant les connaissances actuelles relatives à cette acquisition progressive.

Chapitre 1 :
Le développement des capacités de traitement des expressions

Comme soulevé en introduction, les données de la littérature sur l'enfant pointent dans la direction d'un développement progressif des capacités socio-émotionnelles. Dans ce premier chapitre, nous viendrons dans un premier temps nous intéresser aux éléments de la littérature remettant en cause la vision innée des capacités de traitement des expressions faciales et montrant que l'expertise dans l'extraction et le traitement des différents types d'informations faciales semble être le fruit d'une acquisition progressive. Nous nous intéresserons également au rôle que pourrait jouer l'attraction du nouveau-né pour les visages dans le développement de cette expertise. Suite à cela, nous nous attacherons dans un second temps à la description du développement des capacités de traitement des expressions au cours de la première année de vie. Enfin, nous viendrons nous intéresser aux différents processus et structures cérébrales engagés dans la perception et la reconnaissance des expressions chez l'adulte, et présenterons les connaissances relatives à ces dernières chez le nourrisson.

1.1. L'EXTRACTION DES INFORMATIONS FACIALES : UNE CAPACITE ACQUISE

1.1.1. Remise en cause de l'innéité : un développement progressif des capacités de traitement du visage

Les données empiriques menant à conclure à la présence d'une perception et d'une discrimination innée des expressions sont, à l'heure actuelle, extrêmement parcellaires et hautement sujettes à questionnement. Dans leur étude utilisant le paradigme de préférence visuelle (i.e., présentation simultanée de 2 visages exprimant des émotions différentes), Farroni et collaborateurs ont observé que les nouveau-nés discriminaient et manifestaient une exploration préférentielle de la peur par rapport à la neutralité, et de la joie par rapport à la peur (Farroni, Menon, Rigato & Johnson, 2007). Dans les études menées par Field et collaborateurs (1982, 1983) sur l'imitation et la discrimination des expressions faciales, il est rapporté là aussi la présence d'une discrimination des expressions. Au cours de leurs expériences, les nouveau-nés étaient exposés à un expérimentateur venant leur exprimer la joie, la peur et la tristesse. Une première expression était présentée à l'enfant jusqu'à habituation, puis une nouvelle expression lui était alors présentée. Les auteurs ont observé une

augmentation significative du temps d'exploration lors de la présentation de la nouvelle expression, et ce quelle que soit l'expression, indiquant ainsi la présence d'une discrimination des expressions de joie, de peur et de tristesse (pour les détails concernant l'imitation cf. Chap1 section 3-b.). Toutefois les résultats de ces études sont à considérer avec précaution. En effet, aucune réplication de ces résultats n'existe à notre connaissance. De plus, différentes pistes alternatives sont susceptibles de pouvoir rendre compte des résultats observés. Etant donné la sensibilité des nourrissons aux informations de bas niveau (i.e., couleur, contraste, mouvement), il est possible que les résultats observés ici sur les nouveau-nés soient liés à une réponse à ces éléments de bas niveau plutôt qu'à une véritable discrimination des expressions (Frank, Vul & Johnson, 2009). De plus, les nourrissons étaient âgés de 1 à 5 jours lors des expériences. Il est donc aussi tout à fait possible que les résultats rapportés soient dus aux expériences précoces du nouveau-né avec les expressions, et donc à une plus forte familiarité avec certaines expressions (notamment la joie puisque sensiblement plus présente que les autres émotions dans l'univers visuel du nouveau-né). Enfin, le recours à une personne réelle en tant qu'émetteur a pu également mener aux résultats rapportés du fait du manque de contrôle sur différents paramètres pouvant biaiser les comportements exploratoires du nourrisson, tels que : la variabilité dans la production des expressions d'un test à l'autre, les différences temporelles dans la cinématique des expressions, la différence d'intensité entre les expressions, le changement d'inclinaison de la tête et de pose entre les expressions. A l'heure actuelle, ce n'est qu'aux alentours du troisième mois que l'aptitude du nourrisson à discriminer les expressions a pu être répétitivement démontrée et avérée au moyen de divers types de paradigmes. Il apparaît donc que les éléments en faveur d'une vision innéiste des capacités de perception des expressions sont trop fragiles à ce jour et sujets à remise en cause. De plus, contrairement à la vision innéiste proposée par Darwin et Ekman, ces études assument simplement la présence d'une discrimination et non d'une perception complète des expressions (i.e., distinction des expressions, reconnaissance des celles-ci et de leur équivalence sur des identités variables, et accès à leur signification) dès la naissance.

Cette vision innée est également remise en cause par l'observation de l'établissement et de la spécialisation progressifs des capacités de traitement des visages et expressions faciales. Au cours de la première année, les nourrissons montrent des capacités de traitement des expressions de plus en plus complexes et sophistiquées à mesure de leur développement.

Un phénomène généralement décrit chez le nourrisson est le « perceptual narrowing ». Ce phénomène se reflète au travers d'une atténuation des capacités de perception et de

discrimination pour les stimuli non, ou peu, présents dans l'environnement quotidien du nourrisson, et par une amélioration et une spécialisation de ces capacités pour le traitement des stimuli rencontrés de façon usuelle à mesure des expériences du nourrisson. Ainsi, les capacités de traitement du nourrisson partiraient d'une aptitude de discrimination large à la naissance pour aller progressivement, au fil des mois, vers une aptitude de traitement plus focalisée et spécialisée pour les stimuli fréquemment expérimentés (pour une revue, voir Maurer & Werker, 2014). Bien qu'il ne soit pas rapporté pour le traitement des expressions, le phénomène de « perceptual narrowing » a pu être rapporté au niveau de différentes capacités perceptives. Par exemple, au niveau auditif, on va pouvoir observer que les nourrissons qui étaient initialement aptes à discriminer l'ensemble des sons de différentes langues, vont de façon progressive perdre cette aptitude pour les sons d'autres langues à mesure qu'ils se spécialisent dans le traitement de leur propre langue. Concernant le traitement des visages, on retrouve le même type de phénomène. Dans les études sur le *Other Race Effect*, il est observé qu'au cours de leur spécialisation pour le traitement des visages de leur propre ethnie, les enfants vont progressivement devenir moins aptes à traiter les visages d'une autre ethnie que la leur : de la naissance à 3 mois s'instaure une préférence pour les visages de leur propre ethnie, à 4-6 mois ils discriminent les identités quelle que soit leur ethnie, puis à partir de 9 mois ils ne discriminent plus les identités des visages d'une autre ethnie que la leur (Heron-Delaney et al., 2011 ; Liu et al., 2011, 2015 ; Xiao, Xiao, Quinn, Anzures & Lee, 2012). Un effet similaire est observé pour les visages de singes (Grossman, 2015 ; Pascalis et al., 2005 ; Scott & Monesson, 2009).

Cette spécialisation dans le traitement des visages et l'extraction d'informations spécifiques à ce dernier, va aussi se retranscrire au travers d'une élaboration progressive des stratégies d'exploration visuelle pour les visages[1]. Au cours des premiers mois de vie, cela se reflète par une focalisation croissante sur les éléments internes du visage. En effet, à la naissance et durant les premières semaines de vie, les nourrissons vont davantage explorer et prendre en considération les éléments externes (e.g., coupe de cheveux, contour du visage, accessoires de tête, etc.), et ce bien qu'ils soient capables d'accéder aux éléments internes (Bartrip, Morton & de Schonen, 2001 ; Maurer & Salapatek, 1976 ; Turati, Macchi-Cassia, Simion & Leo, 2006). Par exemple, à 4 jours les nouveau-nés sont capables de reconnaitre et

[1] Même si nous ne les mettons pas ici en avant, il est bien évident que des facteurs maturationnels entrent également en jeu dans ce processus. Pourrait notamment ici entrer en jeu la maturation de régions et circuits cérébraux permettant le contrôle volontaire du déplacement de l'attention (Colombo, 2001 ; Richards, Reynolds & Courage, 2010).

préférer le visage de leur mère par rapport à celui d'une étrangère, excepté lorsque ces dernières portent une écharpe autour de leur tête, dissimulant ainsi les traits externes de leur visage (Pascalis, de Schonen, Morton, Deruelle & Fabre-Grenet, 1995). Ce n'est qu'à partir de 2-3 mois, qu'un focus sur les éléments internes du visage va être observé, avec des enfants explorant majoritairement les yeux (Hainline, 1978 ; Haith, Bergman, & Moore, 1977 ; Hunnius & Geuze, 2004 ; Maurer & Salapatek, 1976). Suite à cela, la bouche attire de plus en plus l'attention de l'enfant jusqu'à 3-4 mois, avant que les yeux commencent à réattirer davantage d'attention (Oakes & Ellis, 2013 ; Wilcox, Stubbs, Wheeler & Alexander, 2013). A ce même âge, on observe aussi que le nourrisson applique des stratégies d'exploration spécifiques au visage (i.e., dynamique d'exploration différente de celle appliquée pour une forme abstraite) (Hunnius & Geuze, 2004). Grâce à cet accès aux différents éléments internes du visage, les enfants vont de plus en plus se reposer sur ceux-ci lors de leurs traitements des visages, et ainsi être de moins en moins influencés par les variations des éléments externes (e.g., Rose, Jankowski & Feldman, 2008). Par exemple, à partir de 19 semaines, les nourrissons sont capables de différencier et reconnaitre leur mère en ne se basant que sur les éléments internes (i.e., port d'un bonnet de bain pour empêcher que la discrimination ne puisse se faire sur les cheveux) (Bushnell, 1982).

Le traitement configural, est un type de traitement visuel considéré comme étant de prime importance chez l'adulte pour l'extraction de différents types d'information sur le visage tels que l'identité et l'état émotionnel (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.1**). Il repose sur le traitement des distances entre les différents éléments internes, et l'alternance entre les différents éléments dans l'exploration visuelle est considérée comme un indicateur du recours à celui-ci (Gallay, Baudouin, Durand, Lemoine & Lecuyer, 2006 ; Maurer, LeGrand & Mondloch, 2002 ; Mondloch, Le Grand & Maurer, 2002 ; Xiao et al., 2013). Ainsi, l'accès progressif aux éléments internes du visage précédemment décrit pourrait être de prime importance dans le développement d'une expertise dans le traitement des visages, puisqu'il permettrait à la fois d'accéder aux différents éléments distinctifs des expressions, mais aussi d'avoir recours au traitement configural. L'application de ce type de traitement par le nourrisson a pu être prouvé chez l'enfant dès 4 mois pour la reconnaissance de visage (Gallay et al., 2006), et à partir de 7 mois non seulement pour le traitement de l'identité, mais aussi pour le traitement des expressions faciales (Cohen & Cashon, 2001 ; Kestenbaum & Nelson, 1990 ; Schwarzer & Zauner, 2003). Ce développement des stratégies d'exploration des visages est rapporté dans des études se focalisant sur des thématiques autres

que celles du traitement des expressions. Dans les expériences sur le *Other Race Effect*, il a pu être démontré qu'au fur et à mesure que se développe leur expertise pour le traitement des visages de leur ethnie, les nourrissons développent également des stratégies d'exploration visuelle spécifiques pour le traitement de ces visages (Liu et al., 2010, 2015 ; Xiao, et al., 2013). Il est observé qu'à 9 mois, les enfants explorent plus la région du nez et font plus d'alternances entre les éléments du haut du visage (i.e., yeux et nez) quand ils explorent un visage de leur ethnie, tandis qu'ils explorent plus la bouche des visages d'une autre ethnie et font plus d'alternances entre les éléments du bas du visage (i.e., nez et bouche). Enfin, cette importance d'un bon développement des stratégies d'exploration des visages, avec notamment un accès aux différents éléments internes, s'illustre tout particulièrement au travers des études sur les pathologies associées à un déficit dans le traitement des expressions faciales : là où les adultes suivent typiquement un pattern triangulaire dans leur exploration des visages (i.e., comprenant la bouche, les yeux et le nez) (Pelphrey et al., 2002), une perturbation dans l'accès aux différents éléments et les stratégies exploratoires des visages et des expressions faciales est observée chez les schizophrènes et les autistes (Jones & Klin, 2013 ; Pephrey et al., 2013 ; Spezio, Adolphs, Hurley & Piven, 2007).

1.1.2. L'attraction pour les visages en tant que base développementale pour l'acquisition d'une expertise

Dès la naissance, les nouveau-nés manifestent une attraction préférentielle pour les visages et les patterns similaires au visage. Cette attraction a tout particulièrement été testée au moyen de stimuli en deux dimensions de taille et de forme similaires au visage et comprenant différents éléments (i.e., yeux, bouche, nez et sourcils) (pour une revue voir de Schonen, 2009 ; Mondloch et al., 2002 ; Morton & Johnson, 1991). En utilisant ces stimuli, Goren, Sarty et Wu (1975), ont pu démontrer que dès la naissance (environ 9 minutes post-partum), les nourrissons vont de façon significative suivre plus le déplacement d'un pattern similaire au visage plutôt qu'un pattern dissimilaire (i.e., pattern dont la position des éléments a été modifiée) (voir **figure 1** pour illustration).

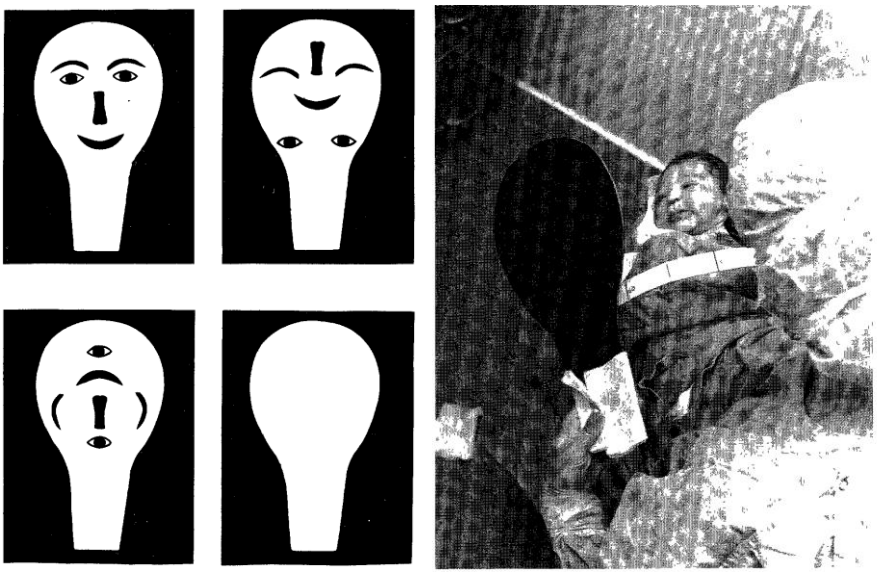


Figure 1 : Illustration des stimuli utilisés dans les expériences de Goren, Sarty et Wu (1975). A gauche les différents types de stimuli utilisés (i.e., pattern facial, pattern légèrement mélangé, pattern très mélangé, forme sans éléments internes) et à droite le dispositif expérimental employé.

Dans le but de rendre compte de ces phénomènes d'attraction précoce pour les visages, mais aussi de rendre compte des modifications de sélectivité de cette préférence au cours des premiers mois de vie (pour une revue sur ce point voir Simion, Leo, Turati, Valenza & Dalla Barba, 2007), Morton et Johnson (1991) ont formulé un modèle théorique nommé le modèle « CONSPEC-CONLERN ». Se basant sur leurs propres études ainsi que celles de différents chercheurs, les auteurs décrivent que dès la naissance les enfants montrent une poursuite plus longue des visages et des patterns similaires aux visages même quand ceux-ci n'incluent que 3 blobs noirs reprenant la configuration globale du visage (i.e., 2 yeux et 1 bouche). Cette attraction vers les visages deviendrait par la suite de plus en plus sélective : à un mois, la configuration n'est plus suffisante, il faut que les éléments faciaux soient spécifiquement présents ; à partir de 2 mois, l'enfant peut montrer une habituation aux visages et montre une sensibilité supérieure à la structure du visage plutôt qu'à l'amplitude de contraste.

Dans ce modèle, il est proposé qu'à la naissance l'enfant disposerait déjà d'un mécanisme lui permettant de manifester de façon innée une préférence pour les visages. Ce dernier est nommé CONSPEC et réfère à une unité de l'architecture mentale contenant des informations structurales sur les caractéristiques visuelles du visage (i.e., la position relative des yeux et de la bouche au sein du pattern). Il régulerait l'approche et/ou l'attraction de l'attention vers les visages et n'aurait besoin d'aucune exposition préalable à des stimuli spécifiques pour être fonctionnel. Ainsi, bien que l'allocation attentionnelle du nouveau-né vers un stimulus soit en partie déterminée par différentes variables de bas niveau (e.g., couleur, taille, complexité, fréquence spatiale, contraste), leur attention demeurera tout

particulièrement sensible à la structure du visage humain. Concernant ses substrats anatomiques, les auteurs supposent que le CONSPEC serait localisé au niveau de structures sous-corticales telles que le colliculus supérieur (structure impliquée dans l'attention et l'orientation).

Dans les semaines suivant la naissance, le CONSPEC serait progressivement supplanté par un second mécanisme : le CONLERN. Ce dernier consisterait en un mécanisme d'apprentissage pouvant acquérir et retenir les caractéristiques spécifiques sur le visage. Il serait initialement aspécifique, et sa spécialisation pour les visages émergerait du fait que les enfants sont exposés principalement aux visages et que le CONSPEC viendrait diriger tout particulièrement l'attention vers ces derniers. L'attraction précoce du nouveau-né pour les visages (CONSPEC) contribuerait donc directement à l'élaboration et à l'émergence des apprentissages sur le visage (CONLERN). Concernant les interactions entre ces deux mécanismes, celles-ci ne seraient pas directes : le CONLERN bénéficierait uniquement du biais attentionnel résultant du CONSPEC.

Toutefois, il est à mentionner que ce modèle a donné lieu à un débat théorique, à l'heure actuelle toujours vif (pour revue voir de Schonen, 2009 ; Macchi-Cassia, Kuefner, Westerlund & Nelson, 2006 ; Mondloch et al., 1999). En effet, certains auteurs viennent contredire l'idée même selon laquelle l'enfant naîtrait avec une représentation de la configuration du visage. Différentes hypothèses alternatives sont ainsi envisagées pour expliquer l'attraction précoce pour le visage, comme : la présence d'une sensibilité du système visuel du jeune nourrisson à certains niveaux de contrastes et de fréquences spatiales (Kleiner & Banks, 1987), ou encore à certaines caractéristiques structurales telle qu'une plus forte répartition d'éléments (et donc de contrastes) sur la partie haute et la plus large de la configuration (Macchi-Cassia, et al., 2006 ; Simion et al., 2007 ; Simion, Macchi-Cassia, Turati & Valenza, 2001 ; Turati, Simion, Milani & Umiltà, 2002 ; Valenza, Simion, Macchi-Cassia & Umiltà, 1996).

Malgré ces désaccords sur le CONSPEC et les facteurs à l'origine de l'attraction dès la naissance pour les visages, les auteurs s'accordent tout de même sur l'idée avancée par Morton & Johnson selon laquelle cette attraction préférentielle servirait de base pour que se développe une expertise dans le traitement des visages. Il est avancé que du fait que les visages attirent de façon préférentielle l'attention du nourrisson, ils seraient traités de façon privilégiée au quotidien, ce qui favoriserait l'élaboration de représentations et

d'apprentissages sur ces derniers ; et par voie de fait promouvrait le développement d'une expertise dans leur traitement (Morton & Johnson, 1991 ; Nelson, 2001).

A l'heure actuelle, l'une des idées les plus partagées est que, comme supposé par Morton & Johnson (1991), l'enfant disposerait à la naissance d'une représentation grossière et non-spécifiée du visage. Cette représentation serait à la fois le fruit de notre héritage évolutif et des acquisitions proprioceptives sur le visage au cours de la vie in-utero. Cette dernière permettrait une sensibilité et une attraction préférentielle pour les visages chez le nourrisson, facilitant ainsi l'acquisition d'apprentissages et de représentations sur les visages (pour revue voir de Schonen, 2009 ; Simion, et al., 2007). De plus, cette première représentation est considérée comme plastique et venant se modifier/complexifier à mesure des expériences et apprentissages sur les visages (Pascalis & Kelly, 2009). Il est également supposé que les tissus cérébraux pour le traitement des visages seraient codés génétiquement pour avoir un potentiel à se spécialiser pour le traitement des visages (Nelson, 2001 ; Pascalis & Kelly, 2009). Toutefois, l'expérience avec les visages est nécessaire pour que le système se spécialise dans leur traitement et dans l'extraction des différentes informations qui leurs sont inhérentes. Ainsi, concernant de façon plus spécifique les capacités de traitement des expressions faciales, si l'on suit ces différents éléments, celles-ci seraient le fruit de l'attraction pour les visages et de leur traitement privilégié par le nourrisson, ainsi que des expériences de l'enfant avec les visages. Ces deux facteurs permettraient ainsi une acquisition rapide des capacités de traitement des expressions et l'acquisition d'une expertise au cours de la première année.

1.2. ONTOGENESE DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS AU COURS DE LA PREMIERE ANNEE

Dans cette section, nous nous intéresserons à l'ontogenèse des capacités de traitement des expressions faciales au cours de la première année de vie. Cette présentation s'effectuera en considérant le développement au travers de 3 étapes clés dans le développement socio-émotionnel du nourrisson. Ces étapes renvoient à des périodes spécifiques au cours desquelles

ont lieu des bouleversements dans les dynamiques de préférences des nourrissons, et où de nouvelles aptitudes de traitement des expressions émergent.

1.2.1. Le nourrisson de la naissance à 3 mois

Comme évoqué précédemment, dès les premiers jours de vie, le nourrisson manifeste une préférence pour les visages de joie par rapport aux visages de peur (Farroni, et al., 2007). Toutefois, ce n'est qu'à partir de 3 mois qu'une capacité de l'enfant à discriminer les expressions a pu être clairement établie et solidement démontrée. C'est à cet âge qu'a pu être observée la présence d'une aptitude fiable et solide du nourrisson à discriminer les visages de joie et à être plus attiré par eux, par rapport aux visages renfrognés (Barrera & Maurer, 1981 ; Haviland & Lelwica, 1987 ; Young-Browne, Rosenfeld & Horowitz, 1977). Deux types de paradigmes sont majoritairement employés pour l'étude des capacités de traitement des expressions chez le jeune nourrisson : le paradigme de préférence visuelle (présentation simultanée de deux visages exprimant des émotions différentes et analyse du temps d'exploration ; le visage exploré le plus longtemps est celui dont l'expression est préférée) et le paradigme d'habituation (présentation répétée de la même expression jusqu'à diminution de 50% du temps d'exploration du visage pour 2 à 3 essais successifs, puis présentation d'une nouvelle expression : si l'enfant augmente de façon significative son temps d'exploration, c'est qu'il y a détection de la variation d'expression). Au travers du recours au second type de paradigme, il a pu être observé que les nourrissons de 3 mois discriminaient les visages exprimant la joie lorsqu'ils sont mis en concurrence avec des visages exprimant différents types d'expressions telles que la colère et la surprise (Barrera & Maurer, 1981 ; Young-Brown, Rosenfeld & Horowitz, 1977). Dans leur expérience au cours de laquelle ils ont utilisés le même type de paradigme, mais cette fois-ci en présentant en audiovisuel (i.e., voix et visage) le visage expressif de la mère, Haviland et Lelwicka (1987) ont eux aussi observé une discrimination de la joie par rapport aux expressions de colère et de tristesse en se basant sur des indicateurs comportementaux de réaction affective du nourrisson (i.e., temps de regard, réactions faciales, immobilité). Par le recours au paradigme de préférence visuelle, il a aussi pu être observé que les nourrissons de 3 mois discriminent les différentes intensités de joie et préfèrent les plus fortes intensités d'expressivité de cette émotion (Kuchuk, Vibbert & Bornstein, 1986). Il est supposé que cette plus forte précocité des capacités de traitement de la joie par rapport aux autres expressions, et l'orientation préférentielle vers ces dernières

seraient liées à la présence d'un avantage perceptif pour ces dernières, du fait qu'elles sont plus fréquentes dans l'environnement du jeune nourrisson (Bayet, Pascalis & Gentaz, 2014).

C'est également à 3 mois que sont rapportées les premières preuves de réactions cérébrales spécifiques aux visages en électroencéphalographie (EEG). Dans les expériences en potentiels évoqués (ERP) s'intéressant au traitement des visages et des expressions faciales chez le nourrisson, cinq composantes sont classiquement étudiées : la P100, la N290, la P400, la Nc et la PSW (Bayet, Pascallis & Gentaz, 2014 ; de Haan, Johnson & Halit, 2003 ; Hoehl & Wahl, 2012 ; de Schonen, 2009). Ces différentes composantes et leurs sites de mesure sont illustrés en **figure 2**. La P100 est la déflection positive la plus précoce (≈ 100-220 ms) et est une onde reflétant les premiers processus d'intégration visuelle tels que les traitements de contraste, de couleur, d'orientation, etc. Suite à celle-ci, va pouvoir être observée, une onde négative appelée N290 (≈ 200–450 ms) elle-même suivie d'une onde positive, la P400 (≈ 400-650 ms). Ces deux composantes sont de prime intérêt dans la recherche sur le développement socio-émotionnel du nourrisson, puisqu'elles reflètent spécifiquement le traitement des visages. Ces dernières vont se montrer réactives à la fois à la structure/configuration faciale du visage humain, mais aussi aux modifications de sa configuration. Cette spécificité des N290 et P400 pour le visage a notamment pu être démontrée au cours de différentes expériences manipulant l'orientation du visage, l'arrangement des éléments faciaux et l'espèce (i.e., visage animal/singe versus visage humain) (de Haan, Pascalis & Johnson, 2002 ; Gliga & Dehaene-Lambertz, 2005 ; 2007 ; Halit, Csibra, Volein & Johnson, 2004 ; Halit, de Haan & Johnson, 2003 ; Rigato, Farroni & Johnson, 2010 ; Vanderwert et al., 2014). Elles sont considérées comme étant les précurseurs de la N170 adulte (i.e., onde spécifique du traitement de visage, qui est sensible à diverses variables telles que l'identité et l'expression chez l'adulte) et refléteraient différents processus spécifiques de l'encodage structural des visages. Ces derniers seraient initialement sériels, et donc mesurés sur deux ondes distinctes, et deviendraient parallèles à mesure du développement (grâce à la myélinisation, à la maturation cérébrale et aux expériences), donnant ainsi lieu à la mesure d'une seule onde à l'âge adulte : la N170 (de Haan, Johnson & Halit, 2003 ; de Haan, Pascalis & Johnson, 2002). Plus tard, sur l'enregistrement EEG, va être observée une seconde onde négative, la Nc (≈ 400 – 800ms), qui reflète directement l'engagement attentionnel de l'enfant (Reynolds & Richards, 2005). Plus cette onde est négative et plus l'engagement attentionnel est fort. Enfin, la dernière onde mesurée, la PSW, est une déflection positive lente observée en queue du signal (après 700 ms) (de Haan, et al., 2003 ; Reynolds & Richards, 2005 ; Striano, Kopp,

Grossmann & Reid, 2006). Elle reflète la mise en correspondance avec les représentations en mémoire et la création/modification des représentations stockées. Cette onde est observée comme étant de plus forte amplitude lorsqu'il y a nouveauté du stimulus, et donc absence de correspondance avec les représentations en mémoire et la création/mise à jour de celles-ci.

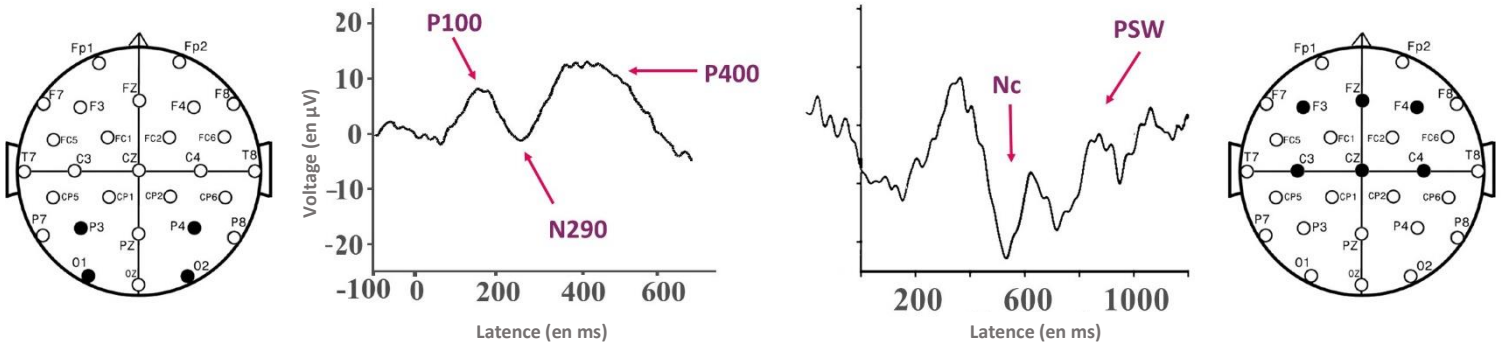


Figure 2 : Illustration des différentes ondes enregistrées en électroencéphalographie chez le nourrisson pour le traitement des expressions faciales. Sont illustrées à gauche les ondes les plus précoces (P100, N290 et P400) ainsi que la localisation des électrodes d'intérêt pour leur enregistrement ; à droite les ondes tardives (Nc et PSW) sont illustrées avec la localisation des électrodes pour leur enregistrement.

Concernant de façon plus spécifique les résultats sur les nourrissons de 3 mois, comme susmentionné, il est rapporté qu'à cet âge ont pu être observées les premières preuves de réactions cérébrales signant une sensibilité à la structure du visage (Gliga & Dehaene-Lambertz, 2005, 2007 ; Macchi Cassia, et al., 2006). Par exemple, la P400 est de plus forte amplitude en réaction à un visage dont les éléments ont été déplacés plutôt qu'à un visage dont la configuration n'a pas été modifiée (Gliga & Dehaene-Lambertz, 2005). Il est aussi prouvé que dès 3 mois, les nourrissons pourraient être sensibles à l'orientation du regard additionné à l'expression : un objet vu précédemment fixé par un visage de joie fera l'objet d'une plus forte allocation attentionnelle de la part de l'enfant (indiquée par une plus forte amplitude de la Nc) lors de sa présentation seul par la suite, mais aussi lorsqu'il a été précédemment associé à un visage de peur, peu importe l'orientation de son regard (Hoehl & Striano, 2010b, 2010c ; Hoehl, Wiese & Striano, 2008). Cette sensibilité aux signaux du regard et de l'expression a pu recevoir plus ample confirmation au travers d'une expérience de Rigato, Farroni & Johnson (2010) sur les nourrissons plus âgés de 4 mois. Ils ont observé que non seulement les visages de joie déclenchaient une P400 plus précoce, mais également que la N290 était plus précoce et que la Nc était d'amplitude plus grande en réaction aux

visages de joie dont le regard était orienté vers le nourrisson. Le fait que les modulations des réponses cérébrales aux expressions s'opèrent au niveau de la N290 et de la P400 constitue une évidence directe que les réponses ne sont pas simplement dues à une réponse à des informations de bas niveau (e.g., présence/absence de hauts niveaux de contraste liés aux dents), mais qu'elles sont liées à une intégration différenciée des visages selon leur expression.

1.2.2. Le nourrisson de 3 à 7 mois

Au cours de cette période, s'observe dans un premier temps, une complexification des capacités de discrimination de l'enfant. Aux alentours du sixième mois, le nourrisson ne différencie plus simplement les visages de joie par rapport aux autres expressions ; il commence à distinguer les différentes expressions négatives entre elles (i.e., peur, colère et tristesse) et par rapport à la neutralité (Hoehl & Striano, 2008 ; Schwartz, Izard & Ansul, 1985 ; pour une revue voir de Schonen, 2009 ; Vanderwert et al., 2014). Dans leur étude en potentiels évoqués, Yrttiaho et collaborateurs (2014) ont pu observer la présence de cette distinction au niveau cérébral : une N290 d'amplitude différente est observée en réponse à des visages de peur en comparaison non seulement à des visages joyeux, mais aussi à des visages neutres.

C'est également au cours de cette période que l'on va voir émerger les premières capacités de perception catégorielle des expressions : le nourrisson est capable de traiter les aspects invariants propres à l'expression, c'est-à-dire de traiter l'arrangement des éléments plutôt que les changements des éléments de façon isolée, et est ainsi capable de percevoir une même expression comme similaire malgré les variations d'identité, de point de vue ou d'intensité d'expression. Cette perception catégorielle s'exprime dans un premier temps au niveau de la joie aux alentours de 4-6 mois (Bornstein & Arterberry, 2003 ; Serrano, Iglesia & Loeches, 1992, 1995), puis va se maintenir pour l'expression positive et s'étendre aux expressions négatives, notamment la peur, au septième mois (Kestenbaun & Nelson, 1990 ; Ludemann & Nelson, 1988 ; Nelson & Dolgin, 1985 ; Nelson, Morse & Leavitt, 1979). D'un point de vue expérimental, cette aptitude est avérée au moyen du paradigme d'habituation, avec recours à des identités variables : l'enfant est habitué à une expression arborée par des identités différentes, puis en phase test l'enfant se voit montrer une nouvelle identité exprimant une nouvelle expression ou la même qu'en phase d'habituation. Si l'enfant

démontre une déshabituation uniquement en réaction à la nouvelle expression, et non pas simplement au changement d'identité, cela signifie qu'il a perçu et extrait les éléments pertinents de l'expression et a catégorisé ces derniers (Serrano, Iglesias & Loeches, 1995). De même, il a pu être démontré que comme l'adulte, le nourrisson distingue et catégorise les expressions en ayant recours à des frontières catégorielles (i.e., meilleure distinction des expressions quand elles sont de part et d'autre de la frontière entre deux catégories émotionnelles) (Kotsoni, de Haan & Johnson, 2001). Concernant toujours la perception catégorielle des expressions, il a pu être démontré par Kestenbaum et Nelson (1990), que cette dernière repose sur un traitement de type configural, étant donné qu'elle n'est observée que lorsque les visages expressifs sont présentés à l'endroit et non à l'envers ; excluant ainsi la possibilité qu'elle ne repose que sur un traitement componentiel.

Un autre phénomène majeur ayant lieu aux alentours du sixième mois est l'apparition du biais de négativité. Ce biais se décrit par la présence d'une plus forte allocation attentionnelle vers les stimuli négatifs, ainsi qu'une plus forte influence et un plus fort recours à ces derniers par rapport aux stimuli positifs (pour une revue voir Vaish, Grossman & Woodward, 2008). Ainsi, avant 6 mois les nourrissons vont s'orienter de façon préférentielle vers les stimuli positifs (LaBarbera, Izard, Vietze & Parisi, 1976 ; Montague & Walker-Andrews, 2001), tandis que passé cet âge, ce sont les stimuli négatifs qui vont davantage attirer leur attention (Peltola, Hietanen, Forssman & Leppänen, 2013 ; Peltola, Leppänen, Maki & Hietanen, 2009). Cette instauration du biais de négativité aux alentours du sixième mois est également corroborée par de nombreuses études en ERP (De Haan, Beksy, Reid, Volein & Johnson, 2004 ; Grossman, Striano & Friederrici, 2007 ; Kobiella, Grossmann, Reid & Striano, 2008 ; Leppänen, Moulson, Vogel-Farley & Nelson, 2007 ; Nelson & de Haan, 1996 ; Peltola, et al., 2009 ; Striano et al., 2006 ; Yrttiaho, et al., 2014). Par exemple, à 7 mois, l'expression de peur déclenche une Nc plus négative que l'expression de joie, reflétant ainsi une plus forte allocation attentionnelle vers la peur par rapport à la joie (De Haan et al., 2004).

Enfin, c'est aussi au cours de cette période que le nourrisson va commencer à faire de la référenciation sociale. Cette dernière a été définie par Feinamn et Lewis (1983), comme l'aptitude de l'individu à recourir à l'information qu'il peut percevoir chez autrui sur son interprétation de la situation, pour pouvoir lui-même former sa propre compréhension de cette situation. De façon simplifiée, et plus spécifiquement pour le visage, elle renvoie à l'aptitude de l'individu à lire l'expression faciale relayée par un autre individu ainsi que son regard,

pour pouvoir comprendre et/ou lever l'ambiguïté d'une situation ou d'un objet. Bien que la capacité de poursuite du regard (i.e., d'attention conjointe), qui constitue l'une des bases de la référenciation sociale, est déjà présente chez les nourrissons de 3-5 mois (de Groote, Roeyers & Striano, 2007 ; Reid & Striano, 2005 ; Reid, Striano, Kaufman & Johnson, 2004 ; Striano, et al., 2006 ; Striano & Reid, 2006), ce n'est qu'à partir du sixième mois qu'une véritable aptitude du nourrisson à utiliser de façon conjuguée le regard et l'expression apparaît. A cet âge, il est observé en EEG que le nourrisson ne répond pas uniquement à la valence de l'expression, il effectue un traitement différencié de celle-ci en prenant en considération le regard et le contexte : une Nc plus négative est observée en réaction à des visages de peur regardant un objet en comparaison avec des visages neutres regardant eux aussi un objet, tandis que cette différence est absente lorsque que les visages expressifs ne regardent pas en direction de l'objet (Hoehl & Striano, 2010c). Le recours du nourrisson à cette stratégie pour lever l'ambiguïté d'une situation n'est rapporté qu'à partir de 7 mois au niveau comportemental : lorsqu'il est confronté à un objet inconnu/ambigu ou à une action ambiguë, le nourrisson va manifester une attention plus soutenue vers le visage de l'adulte, et maintenir plus fortement son attention sur ce dernier s'il ne fournit aucune clé expressive pour lever l'ambiguïté (Striano & Rochat, 2000 ; Striano & Vaish, 2006). Cette considération du nourrisson pour l'association entre regard et expression a également reçu plus amples confirmations au travers d'études en ERP (Hoehl, Palumbo, Heinisch & Striano, 2008 ; Hoehl & Striano, 2008, 2010a), notamment au travers d'une plus forte amplitude de la Nc en cas de congruence entre orientation du regard et expression faciale (i.e., regard direct et colère (expression orientée vers l'approche) ; regard évitant et peur (expression orientée vers l'évitement)).

1.2.3. Le nourrisson de 7 mois à 1 an

A l'approche du douzième mois, les nourrissons vont manifester des capacités plus fines de catégorisation des différentes expressions faciales de base (e.g., Ludemann, 1991), ainsi qu'une plus grande adaptation de leurs réponses comportementales aux expressions faciales affichées par l'adulte. Cet ajustement des comportements en réponse aux expressions de l'adulte a été observé dans de multiples études s'intéressant à la référenciation sociale. L'un des paradigmes expérimentaux les plus connus et les plus classiquement cités est celui de la « falaise visuelle » (visual cliff ; pour illustration voir **figure 3**) utilisé par Sorce et

collaborateurs (1985). La falaise correspond ici à une table couverte d'une vitre en plexiglas divisée en deux parties : une partie de surface, au niveau de laquelle un pattern à carreau est directement placé sous la surface en plexiglas ; et une partie profonde, où le même pattern est cette fois-ci placé à distance sous la vitre en plexiglas. La profondeur de la seconde partie est ajustée de façon à créer une ambiguïté de la situation et donc une hésitation de l'enfant à la traverser (i.e., pause à l'approche de la partie profonde et regards fréquents vers la mère, mais pas d'évitement franc de la zone profonde). Au cours de l'expérience, l'enfant est initialement placé sur la partie de surface, tandis que la mère de l'enfant est placée à l'opposé du dispositif, sur le bord de la partie profonde. Les mères des enfants avaient pour instruction d'exprimer de la joie, de la peur, de la tristesse, de la colère ou de l'intérêt lorsque leur enfant s'approchait du bord de la falaise visuelle. Il a pu être observé que les enfants traversaient significativement plus la partie profonde pour rejoindre leur mère lorsqu'elle exprimait de la joie ou de l'intérêt, plutôt que lorsqu'elle exprimait de la colère ou de la peur (Sorce, Emde, Campos & Klinnert, 1985). Cette étude avère donc que dans sa confrontation à une situation ambiguë, l'enfant utilise l'expression affichée par la mère pour lever l'ambiguïté et répondre de façon adaptée à la situation à laquelle il est confronté. Par le recours à ce même paradigme, il a aussi pu être observé qu'en l'absence de clés informatives fournies par la mère (i.e., paroles et voix rassurantes) pour lever l'ambiguïté de la situation, les enfants traversent significativement moins le dispositif et s'énervent (Striano, Vaish & Benigno, 2006).



Figure 3 : Photographie illustrant le dispositif de la « falaise visuelle » (photographie : Dahl et al., 2013 : http://sciencenordic.com/infants-have-learn-fear-heights).

Ce même recours aux expressions et regard de l'adulte dans le but d'adapter la réponse comportementale a été rapporté dans des études appliquant divers types de paradigmes expérimentaux, comme la rencontre d'un étranger (Feinman & Lewis, 1983), ou encore l'exposition à un objet nouveau ou ambigu (Carver & Vaccaro, 2007 ; Gunnar & Stone, 1984 ; Hernstein & Campos, 2004 ; Hornik, Risenhoover & Gunnar, 1987 ; Klinnert, 1984 ; Moses, Baldwin, Rosicky & Tidball, 2001 ; Stenberg, 2003 ; Striano & Rochat, 2000). Bien que la plupart de ces études se sont reposées sur une transmission audiovisuelle du signal émotionnel (i.e., voix et expression faciale), certaines d'entre elles ont confirmé que l'expression faciale seule suffisait à déclencher un ajustement comportemental chez l'enfant d'un an (Doi, Kagawa & Shinohara, 2010 ; Klinnert, 1984 ; Matsunaka & Hiraki, 2014 ; Sorce, et al., 1985). De même, différentes évidences accumulées en EEG confirment le recours à l'expression et au regard dans le traitement d'objet. Chez l'enfant de 9 et 12 mois, la Nc est plus ample en réaction aux objets précédemment fixés par des visages avec une expression négative (i.e., peur ou dégoût) plutôt qu'aux visages neutres ou exprimant de la joie (Carver & Vaccaro, 2007 ; Hoehl & Striano, 2010a). Il est à préciser, que c'est au même âge que va pouvoir s'observer une aptitude de l'enfant à utiliser l'émotion exprimée par l'adulte et son regard pour prédire et estimer ses intentions d'action. Par exemple, lorsqu'ils sont face à un expérimentateur exprimant de la joie vers l'une des deux peluches disposées devant lui, les enfants de 12 mois sont capables d'estimer laquelle des deux peluches l'expérimentateur devrait saisir, et vont réagir en cas de rupture avec les attentes (i.e., temps de regard plus long lorsque la peluche saisie n'est pas celle vers laquelle l'expérimentateur a exprimé un affect positif) (Phillips, Wellman & Spelke, 2002).

1.2.4. Le rôle clé de l'expérience dans cette ontogenèse

Le rôle clé de l'expérience dans la mise en place des futures capacités de traitement du visage a pu être mis en avant au travers de différents travaux. Les résultats cumulés au travers de ces derniers soulignent tout particulièrement l'importance des expériences précoces du nourrisson avec les visages et les différentes expressions dans la mise en place de ses futures capacités socio-émotionnelles.

Dans les études sur le « perceptual narrowing », et plus spécifiquement dans les études s'intéressant au « other-race effect » et à la capacité de discrimination d'identité sur les visages de singes, l'importance des expériences quotidiennes de l'enfant avec les visages a

longtemps été pointée comme contributeur majeur à ce phénomène. Il est observé qu'à mesure du développement, le nourrisson va se spécialiser dans le traitement des visages de sa propre espèce et de sa propre ethnie ; tandis qu'ils vont devenir moins sensibles aux variations présentes sur les visages d'autres espèces et ethnies (voir **Chapitre 1 section 1.1**). Dans leur étude sur des enfants de 6-14 ans, de Heering et collaborateurs (2010), ont pu démontrer la présence d'une influence des expériences précoces avec des visages de différentes ethnies sur les futures capacités de traitement facial. En comparaison avec un enfant caucasien élevé par une famille caucasienne, un enfant asiatique adopté à 2 ans par une famille caucasienne ne présente pas d'avantage dans la reconnaissance de visages dans une ethnie par rapport à une autre. Au contraire, il est tout aussi bon dans le traitement des deux ethnies. Toujours en lien avec l'influence des expériences précoces, des études ayant eu recours à l'entrainement d'enfant de 6 à 9 mois au moyen d'un livre contenant des photographies individualisées de visages de singes ou de visages d'une autre ethnie (i.e., asiatique), ont permis de démontrer un impact significatif de l'exposition à ces autres visages sur la spécialisation du système pour le traitement d'un seul type de visage. Trois mois d'exposition à des visages de singes ou des visages d'une autre ethnie suffisent pour qu'à 9 mois le nourrisson continue à discriminer ces visages, là où normalement cette aptitude devrait avoir disparu à mesure que la spécialisation pour les visage humains de son ethnie se met en place (Heron-Delaney et al., 2011 ; Pascalis et al., 2005 ; Scott & Monesson, 2009).

Ce rôle critique des expériences visuelles précoces dans l'ontogenèse d'une expertise dans le traitement des visages est tout particulièrement mis en avant dans les travaux de Maurer et collaborateurs sur les effets à long terme des cataractes congénitales. Du fait de cette pathologie, les nourrissons sont privés d'une large partie de l'information visuelle jusqu'au retrait chirurgical de la cataracte, qui a lieu en général entre 2 et 6 mois. Bien qu'à l'âge adulte ces patients développent une sensibilité visuelle normale aux basses fréquences spatiales et aux hautes fréquences temporelles, ces derniers vont tout de même montrer un déficit dans le traitement des hautes fréquences spatiales et basses fréquences temporelles, dans le traitement global de formes et de mouvements, ainsi qu'une plus faible acuité visuelle (Robbins, Nishimura, Mondloch, Lewis & Maurer, 2010). Pour le traitement des visages, ils vont là aussi montrer des effets à long terme de la privation précoce d'une partie des informations visuelles : les patients affichent un déficit spécifique pour le traitement des visages dans une tâche de discrimination impliquant le recours au traitement configural (i.e., différence dans l'espacement des éléments internes), là où aucun déficit n'est observé pour

des maisons ou des visages de singes (Le Grand, Mondloch, Maurer & Brent, 2001 ; Robbins, et al., 2010). De même, la reconnaissance d'un visage est perturbée lorsqu'elle doit être effectuée sur un visage après changement d'orientation (i.e., rotation du visage de face selon un angle de 45°, 90° ou 135°) (Geldart, Mondloch, Maurer, de Schonen & Brent, 2002). Plus récemment, il a été rapporté que ces impacts des cataractes congénitales s'étendent aussi au traitement des expressions faciales. En effet, bien que leur capacité de discrimination des expressions soit intacte, il apparaît que leurs représentations des différentes expressions diffèrent de celles des individus sans déprivation visuelle précoce : contrairement au groupe contrôle, ils regroupent la neutralité avec les expressions négatives plutôt qu'avec les positives, ils regroupent la peur avec l'ensemble des expressions négatives de façon indifférenciée plutôt que de la rapprocher de la surprise, ils ne vont pas avoir l'arousal (i.e., état d'activation physique et psychologique) comme dimension de regroupement des expressions et vont utiliser d'autres dimensions (Goa, Maurer & Nishimura, 2013).

Des études sur l'influence de la dépression maternelle, mettent quant à elles en exergue l'importance de l'environnement expressif (i.e., expressions faciales présentes dans l'environnement quotidien du nourrisson) dans l'établissement des capacités de traitement des expressions faciales. Au cours de l'épisode dépressif de leur mère, les nourrissons sont exposés à moins d'expressions de joie, plus d'expressions de tristesse, et une moindre expressivité (i.e., quantité et variété des expressions) au quotidien. Au niveau expérimental, il a pu être observé qu'entre 0 et 3 mois, ces enfants de mères dépressives ont moins de facilité à s'habituer aux expressions de joie (Hernandez-Reif, Field, Diego, Vera & Pickens, 2006), sont moins répondant à l'absence de contingence maternelle dans l'interaction et au still face (i.e., lorsque le visage s'immobilise avec une expression fixe) (Field, Diego & Hermandez-Reif, 2009), et semblent moins réagir à la « nouveauté » de l'expression de tristesse (Field, Pickens, Fox, Gonzalez & Nawrocki, 1998). Il est également observé que ces enfants discriminent moins efficacement l'expression de joie à 5 mois, et qu'ils s'orientent plus fortement vers les visages de forte expressivité que les enfants de mère non dépressive à 6 mois (Bornstein, Arterberry, Mash, & Manian, 2011 ; Striano, Brennan & Vanman, 2002). Il est supposé que ces particularités observées chez les enfants de mères dépressives seraient liées aux spécificités de leur environnement expressif au quotidien (i.e., moins d'expression de joie et moindre expressivité globale) qui mèneraient à de moins bonnes représentations des expressions et à une moindre expertise dans leur traitement (à l'exception de la tristesse (et de la neutralité) qui est plus fréquemment présente dans leur environnement quotidien).

Se basant notamment sur ces études réalisées sur les enfants de mères dépressives, de Haan et collaborateurs (2004) ont testé si les capacités de traitement des expressions émotionnelles des enfants de 7 mois pouvaient être liées à la personnalité des mères. La personnalité a été prise en considération étant donné qu'elle reflète la disposition émotionnelle de la mère, et, par conséquent, l'environnement émotionnel et expressif qu'elle fournit à son enfant au quotidien. Ils ont ainsi pu observer que seuls les enfants dont les mères étaient en général d'humeur plus positive montraient le biais de négativité classiquement décrit à cet âge (i.e., exploration préférentielle d'un visage de peur par rapport à un visage de joie). Toujours en lien avec cette question des expériences avec les expressions, dans une étude où ils ont étudié la discrimination des expressions de peur et de joie, Nelson et collaborateurs (1979) rapportent chez les enfants de 7 mois, la présence d'une difficulté d'habituation à la peur. Les auteurs interprètent cet effet comme pouvant être lié à la moindre familiarité de cette expression par rapport à la joie. Enfin, certains auteurs avancent également une importance des expériences quotidiennes avec les différentes expressions dans la mise en place du biais de négativité aux alentours du 6ème mois. En effet, selon ces auteurs, les modifications dans la dynamique d'interaction des parents avec leur enfant (i.e., augmentation d'expressions négatives), consécutives à l'émergence des capacités de locomotion autonome, seraient à l'origine de l'émergence du biais de négativité aux alentours de 6 mois [2](Biringen, Emde, Campos & Appelbaum, 1995 ; Campos, Kermoian & Zumbahlden, 1992).

En résumé, il ressort de cette revue d'études, que les nourrissons traversent 3 étapes clés dans la mise en place de leurs capacités sociales, et plus spécifiquement dans l'établissement de leur expertise dans le traitement des expressions faciales : (a) Dans un premier temps, les enfants vont manifester une capacité à discriminer certaines expressions à 3 mois, (b) puis à l'approche du septième mois leurs capacités de discrimination s'étendent aux expressions négatives et ils démontrent les premières preuves de perception catégorielle des expressions et les premiers signes de référenciation sociale. (c) Enfin, ils atteignent l'âge de 12 mois, âge auquel ils sont capables de reconnaître les différentes expressions faciales basiques et d'adapter leur comportement en fonction du signal émotionnel. Suite à la première année, les enfants vont poursuivre l'affinement de leurs capacités catégorielles dans le traitement des visages expressifs, jusqu'à atteindre un niveau adulte vers 11-12 ans (Durand,

[2] Des facteurs maturationnels entrent également en ligne de compte dans ce développement du biais de négativité. Dans leur article, Leppänen et Nelson (2012), avancent notamment des éléments en faveur d'une contribution de la maturation fonctionnelle des circuits neuronaux impliqués dans le traitement émotionnel (e.g., amygdale, Cortex orbitofrontal, etc.).

Gallay, Seigneuric, Robichon & Baudouin, 2007). Il apparaît que ce développement dans les capacités socio-émotionnelles du nourrisson est sous dépendance directe de ses expériences précoces avec les différentes expressions faciales. Enfin, il est à souligner que bien que de nombreuses études attestent d'une émergence des capacités de discrimination des expressions faciales à 3 mois, peu d'études se sont penchées sur la nature de cette discrimination au niveau cérébral chez les nourrissons de cet âge. De plus, certaines expressions de base demeurent non-testées.

1.3. LA PERCEPTION DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ L'ADULTE ET LE NOURRISSON

Le modèle de Bruce et Young (1986) est dominant dans les modèles des sciences cognitives tachant de représenter les différents processus permettant le traitement des visages et l'extraction d'informations spécifiques à ces derniers. Ce modèle ayant pour vocation de modéliser la reconnaissance des visages, propose une vision modulaire et hiérarchisée du traitement du visage, où chaque module joue un rôle fonctionnel différent, et exerce sa fonction indépendamment des autres modules. Ici, le traitement de l'identité repose sur un passage de l'information au travers de différents modules reflétant une série de traitements de l'information visuelle. La reconnaissance de l'identité est notamment permise par une extraction des éléments invariants du visage et une mise en correspondance avec les représentations de visages connus en mémoire, permettant ainsi la reconnaissance, ainsi que l'accès au nom et aux informations sémantiques liées à la personne. Concernant l'expression faciale, peu d'éléments sont avancés dans ce modèle. Il est considéré qu'elle serait extraite indépendamment des autres informations et engagerait des processus cognitifs spécifiques différents de ceux engagés pour le traitement de l'identité, représenté dans ce modèle par l'addition d'un module spécifique pour le traitement de l'expression. Il est aussi supposé qu'elle se baserait uniquement sur une analyse restreinte aux éléments variables du visage (i.e., « code pictural »). Du fait que ce modèle ait pour vocation initiale de modéliser le traitement de l'identité, celui-ci ne développe que peu sur le traitement des expressions (excepté qu'il reposerait sur un traitement des éléments variables du visage) et ne décompose pas les processus spécifiques au traitement expressif.

Dans cette section, nous nous donnerons pour objectif, dans un premier temps, de venir préciser qu'elles sont les différents processus engagés dans la perception et la reconnaissance des expressions, tout en les mettant en écho avec les données issues des recherches en développement. Puis, dans un second temps, nous viendrons décrire les bases cérébrales sous-tendant le traitement des expressions faciales.

1.3.1. Comment distingue-t-on les expressions ?

Chez l'adulte, le traitement des visages et l'extraction de différents types d'informations – expressives ou non – reposent tous deux sur 4 types de traitements différents. Ces différents traitements permettent respectivement d'extraire différents types d'informations et vont pouvoir être testés au moyen de paradigmes spécifiques (pour une revue voir Calder, Young, Keane & Dean, 2000 ; Maurer, Mondloch & Le Grand, 2002).

- Le traitement componentiel : qui correspond au traitement isolé des éléments du visage tels que la pigmentation de la peau, la forme des différents éléments internes, la couleur des yeux, etc. Il pourra être testé par création de différents visages au sein desquels ces éléments sont modifiés (cf. **figure 4d**).
- Le traitement configural de premier ordre : qui correspond au traitement global de l'arrangement des éléments du visage. Il permet de détecter, reconnaitre et différencier les visages par rapport à d'autres types de stimuli sur la base de leur configuration basique (i.e., deux yeux et une bouche dans une forme ovale). L'application de ce type de traitement peut notamment s'observer au travers de la perception de visages sur des images telles que les visages de Mooney ou les peinture d'Arcimboldo (cf. **figure 4a**).
- Le traitement configural de second ordre : il réfère au traitement des relations de distance entre les éléments internes du visage (e.g., distance yeux-bouche, distance entre les yeux, etc.). Ce type de traitement peut par exemple être investigué en créant différents visages contenant les mêmes éléments internes dont la position relative les uns par rapport aux autres a été modifiée (cf. **figure 4c**).
- Le traitement holistique : il mène à la perception du visage comme une gestalt. Du fait de ce type de traitement, les différents éléments sont difficilement

traités de façon isolée puisqu'ils sont liés les uns aux autres au sein d'un même ensemble. Il peut par exemple être observé au moyen de l'effet composite (i.e., la moitié haute d'un visage est moins bien reconnue lorsqu'elle est alignée avec la partie basse d'un autre visage) ou encore au travers d'une moindre reconnaissance d'un élément facial propre à une identité lorsqu'il est inséré dans un autre visage plutôt que présenté de façon isolée (cf. **figure 4b**).

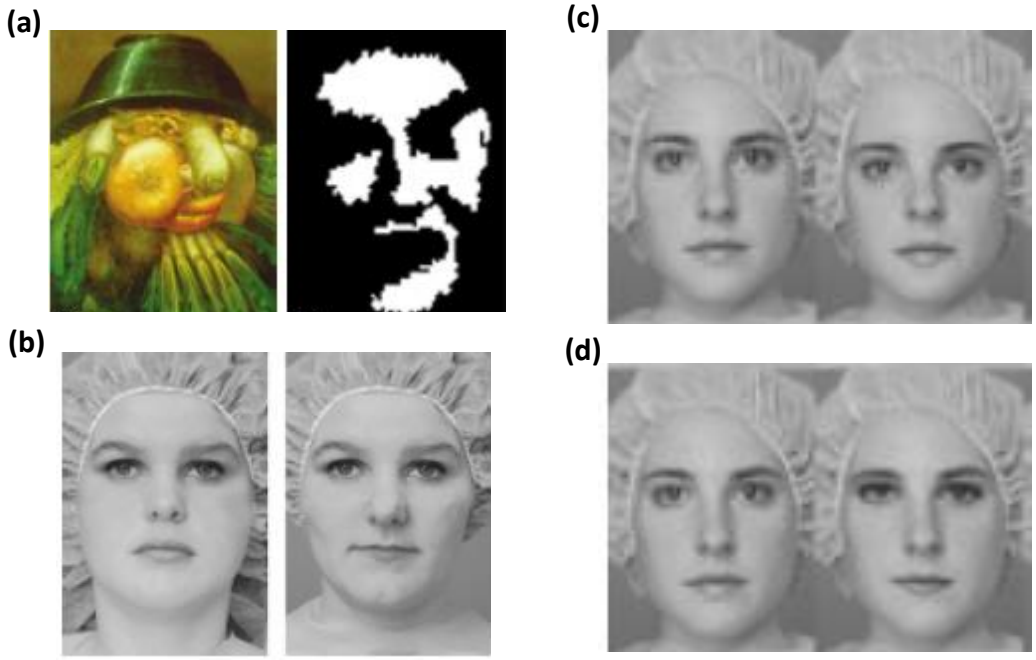


Figure 4 : Illustrations des différentes méthodes d'instigations des divers types de traitements du visage extraites de l'article de Maurer, Le Grand & Mondloch (2002). Sur la figure (a) est représentée une peinture d'Arcimboldo (à gauche) et un visage de Mooney (à droite). Sur la figure (b) est représenté l'effet composite avec 2 visages dont les parties supérieures sont identiques et les parties inférieures sont différentes. Sur la figure (c) est représenté un visage dont les relations de distance entre les éléments internes ont été modifiées. Sur la figure (d), ici les éléments internes du visage (i.e., yeux et bouche) ont été changés.

Lors de leur production, les différentes expressions faciales impliquent des unités d'actions distinctes, et ont ainsi peu de parties se recouvrant les unes par rapport aux autres (Ekman, 1973 ; Ekman & Friesen, 1976 ; Ekman & Keltner, 1997). Leur distinction va donc pouvoir reposer sur l'exploration visuelle de ces parties de moindre recouvrement et l'extrapolation des différences par le cerveau (Smith, Cottrell, Gosselin &, Schyns, 2005). Ainsi, toujours chez l'adulte, l'application de divers types de paradigmes et de techniques a permis de révéler que lors de l'exploration des visages expressifs, les différents éléments

faciaux vont attirer plus ou moins l'attention selon l'expression à traiter ; avec notamment une exploration plus soutenue des éléments distinctifs de l'expression (i.e., traitement componentiel) (présentation isolée des éléments expressifs : Fox & Damjanovic, 2006 ; variation des éléments expressifs : Lunqvist, Esteves & Öhman, 1999 ; avec le paradigme Bubble : Gosselin & Schyns, 2001 ; Schyns, Bonnar & Gosselin, 2002 ; Smith, et al., 2005 ; en enregistrement des mouvements oculaires : Adolphs et al., 2005 ; Green, Williams & Davidon, 2003 ; Kret, Stekelenburg, Roelofs & de Gelder, 2013 ; Schurgin et al., 2014 ; en IRMf : Whalen et al., 2004). La prépondérance des différentes zones du visage dans le traitement des expressions peut se résumer de la façon suivante : les éléments de la partie haute du visage (i.e., les yeux et la zone péri-oculaire comprenant les sourcils) vont jouer un rôle crucial dans le traitement de la tristesse, de la peur et de la colère ; les éléments de la partie basse (i.e., la bouche et la zone péri-bucale comprenant le sillon naso-labial et certaines zones du nez et autour du nez) vont être fortement impliqués dans la reconnaissance de la joie et du dégoût. Il a pu être démontré que cette exploration spécifique des éléments distinctifs n'est pas guidée par la présence d'informations de bas niveau (i.e., contraste, luminance, etc.), mais plutôt par la saillance des éléments expressifs (e.g., élargissement des lèvres et dents saillantes pour la joie) (Calvo & Nummenmaa, 2008, 2011 ; Frischen, Eastwood & Smileck, 2008). Une importance du traitement configural de second ordre et du traitement holistique dans le traitement des visages expressifs a également pu être démontrée au travers d'expériences démontrant la présence d'effets d'inversions (i.e., difficulté de discrimination et reconnaissance des expressions sur les visages à l'envers plutôt qu'à l'endroit) et d'effets composites (i.e., difficulté à percevoir l'équivalence d'expression sur les parties hautes de visages alignées sur des parties basses exprimant des émotions différentes) (Calder, Young, Keane & Dean, 2000 ; Calvo & Nummenmaa, 2008 ; Chambon, Baudouin & Franck, 2006 ; Langton, Law, Burton & Scweinberger, 2008 ; avec le paradigme Bubble : Shyns, Bonnar & Gosselin, 2002). Le rôle du traitement configural dans la perception des expressions faciales a été récemment réaffirmé au travers des études sur les visages inexpressifs de Martinez et Neth. Dans leurs études, ils ont observé que la simple modification des distances entre les éléments faciaux suffisait pour engendrer la perception d'une émotion : un visage neutre dont la bouche et les yeux ont été rapprochés va être perçu comme étant en colère, tandis qu'un visage sur lequel ces éléments ont été éloignés va être perçu comme triste (Neth & Martinez, 2009). Se basant sur ces observations, mais aussi sur le Modèle Continu de Russell (2003), les auteurs proposent que les représentations des expressions faciales soient regroupées en un *Face Space* au sein duquel leur organisation serait déterminée par différentes dimensions

autour desquelles elles se regrouperaient et se différencieraient. Les relations de second ordre (i.e., distance) entre les éléments et leur position relative au sein du visage constitueraient une dimension forte, déterminant la distribution des expressions au sein du *Face Space*. Ainsi, ce modèle suppose une contribution forte de la configuration dans la répartition des représentations, la perception et l'expertise dans le traitement des expressions. Il est également mentionné que les changements de forme des éléments faciaux (i.e., les informations componentielles telles que l'incurvation de la bouche, l'écarquillement des yeux, etc.) seraient à la base d'autres dimensions du *Face Space* (Martinez & Du, 2012 ; Neth & Martinez, 2009, 2010).

Chez l'enfant, différentes études en enregistrement des mouvements oculaires ont porté sur les stratégies d'exploration visuelles appliquées par les nourrissons lorsqu'ils traitent un visage expressif. Toutefois, du fait de leur faible nombre et des divergences dans la méthodologie employée (i.e., stimuli utilisés, procédure expérimentale, taille et forme des zones d'intérêt), des résultats contradictoires sont rapportés par ces études. Chez les 8 mois, Baudouin et collaborateurs (2012) ont observé que les nourrissons explorent de manière différenciée les différentes expressions faciales. Ils regardent plus longuement la bouche et la région péri-oculaire lorsque la joie est exprimée, tandis que ce sont les sourcils pour la colère, le nez et la bouche pour le dégoût, et la bouche et les yeux pour la peur. Cette prévalence de l'exploration de la zone des yeux est également rapportée par Amso, Fitzgerald, Davidow, Gilhooly & Tottenham (2010) chez les enfants de 6-11 mois, puisqu'ils ont observé une corrélation positive entre le temps passé à fixer les yeux et l'habileté à discriminer l'expression de joie de celle de peur chez ces enfants. Toutefois, en contradiction avec ces résultats, certaines études décrivent une plus forte exploration de la bouche et un évitement des yeux sur les expressions de menace (i.e., colère et peur) (Hoehl, 2013), tandis que d'autres n'ont trouvé aucun effet de l'expression sur l'exploration visuelle des enfants (à 4 et 7 mois : Hunnius, de Wit, Vrins & Von Hofsten, 2011 ; à 7 mois : Peltola, Leppänen, Vogel-Farley, Hietanen & Nelson, 2010).

Concernant l'application d'un traitement configural lors du traitement des expressions faciales, là aussi peu d'éléments sont disponibles à l'heure actuelle. Le recours à ce type de traitement dans la reconnaissance des visages a pu être rapporté chez le nouveau-né (e.g., Turati et al., 2006), et l'étude des mouvements oculaires chez les enfants de 4 mois en reconnaissance de visages a permis de mettre en avant que ce type de traitement se baserait sur l'exploration des différents éléments internes et l'alternance d'exploration entre ces

éléments (Gallay et al., 2006). Toutefois, ce n'est qu'à partir de 7 mois que l'application du traitement configural pour le traitement des expressions faciales a pu être attesté chez le nourrisson (Cohen & Cashon, 2001 ; Schwarzer & Zauner, 2003).

Au vu de ces éléments, il semble donc que les nourrissons au cours de la première année appliquent des stratégies d'exploration spécifiques lorsqu'ils observent les différentes expressions. Toutefois, du fait des contradictions entre les différentes études disponibles sur le sujet, une confusion demeure concernant les zones et éléments du visage spécifiquement explorés par les nourrissons dans leur traitement des différentes expressions. De plus, l'ontogenèse de ces stratégies d'exploration au cours de la première année reste encore à déterminer.

1.3.2. Comment accède-t-on à la signification des expressions ?

Chez l'adulte, différents modèles se confrontent concernant l'accès à la signification des expressions. En effet, même s'il est conventionnellement admis que cet accès reposerait sur le recouvrement entre l'entrée sensorielle et la représentation stockée d'une expression faciale, certains modèles proposent une contribution majeure de différents facteurs dans le processus de traitement de visages expressifs. Ces modèles font également des prédictions différentes sur les réactions faciales aux expressions. Dans cette section, nous viendrons nous pencher sur 3 modèles majoritaires chez l'adulte concernant cette question, et tâcherons de mettre les données de la littérature actuelle chez le nourrisson en écho avec ces modèles.

Les théories de l'embodied cognition mettent en avant un rôle clé de l'incarnation de l'émotion dans le traitement des expressions faciales. Dans ces courants théoriques, il est avancé que les représentations ne seraient pas amodales, mais qu'elles seraient basées et ancrées sur les patterns d'activations cérébrales modalité-spécifiques établies lors de la perception (i.e., pendant le processus d'acquisition *online*). Les différentes régions et réseaux activés lors d'une expérience seraient réactivés lorsque la représentation est activée : perception et représentation partageraient les mêmes réseaux et substrats cérébraux. Ainsi, il est proposé que la perception d'une expression sur le visage d'autrui ne serait pas basée sur l'activation d'une représentation amodale et abstraite de toute expérience. Au lieu de cela, il est proposé que les états modalité-spécifiques (i.e,., l'émotion, l'activation motrice et

l'expérience somatosensorielle) présents et expérimentés lors de la production d'une expression faciale et du ressenti émotionnel seraient réactivés lors de la perception de cette même expression sur le visage d'autrui. En d'autre termes, percevoir l'expression faciale d'autrui impliquerait une réactivation du pattern d'activation cérébrale présent lors de l'exécution de cette même expression (cortex somatosensoriel, cortex moteur, circuit limbique, amygdale, cortex préfrontal, ….), menant ainsi l'individu à adopter à nouveau l'état physiologique, l'émotion et l'activité motrice présents lors de l'expérience. Tous ces éléments permettraient à l'individu de pouvoir déterminer l'état émotionnel de l'émetteur (Gallese, 2007 ; Niedenthal, 2007 ; Niedenthal, Barsalou, Winkielman, Gruber & Ric, 2005 ; Niedenthal, Mermillod, Maringer & Hess, 2010). Ainsi, dans les théories de l'*embodied cognition*, l'imitation spontanée des expressions faciales ferait partie d'une reprise corporelle de l'état de l'autre et participerait de façon active à la perception de son état interne[3]. Au niveau expérimental, cette théorie trouve de nombreuses confirmations. En effet, outre différentes études en imagerie venant confirmer les prédictions de ce modèle (Buccino et al., 2001 ; Wicker et al., 2003 ; pour une revue, voir : Niedenthal, et al., 2010), des études au niveau comportemental ont pu par exemple montrer des effets de la posture sur l'auto-évaluation, l'état émotionnel et le jugement (Brinõl & Petty, 2008 ; Briñol, Petty & Wagner, 2009 ; Förster, 2004 ; Riskind & Gotay , 1982). Concernant plus particulièrement l'imitation spontanée des expressions faciales, celle-ci a pu être confirmée par des études en électromyographie démontrant la présence d'une activation des muscles faciaux impliqués dans la production de l'expression observée (e.g., Bornemann, Winkielman & Van der Meer, 2011 ; Dimberg & Thunberg, 1998). Son importance dans le traitement des expressions faciales est soulignée par la présence d'une corrélation entre réaction faciale spontanée et score d'empathie (Chartrand & Bargh, 1999), mais aussi et surtout, par des études démontrant que la contrainte dans une expression et/ou le blocage du mimétisme interfèrent de façon spécifique sur l'évaluation émotionnelle, ainsi que sur la perception et la reconnaissance des expressions faciales (Niedenthal, 2007 ; Niedenthal, Brauer, Halbersdadt & Innes-Ker, 2001 ;

[3] Cette vision trouve de nombreux parallèles dans la littérature adulte. En effet, différents auteurs proposent que le feedback et l'efférence faciale fassent partie intégrante du processus d'évaluation émotionnelle. Dans les différents modèles formulés sur ce propos, il est proposé que l'individu ait accès à l'état émotionnel d'autrui sur la base d'une simulation de l'expression faciale arborée. Selon les modèles, il est tantôt spéculé que l'individu passerait par un processus d'appariement progressif de son expression avec les représentations en mémoire, tantôt que cela passerait par une reproduction spontanée de l'expression faciale perçue (pour une revue, voir, Adelamann & Zajonc, 1989 ; Golman & Sripada, 2005 ; Soussignan, 2002). D'autres auteurs font également l'hypothèse qu'une imitation spontanée/automatique des expressions et actes d'autrui serait présente ; et qu'elle servirait au ressenti empathique et aurait des effets au niveau affiliatif (i.e., si X imite l'acte, la posture ou l'expression de Y, alors Y appréciera plus X) (Chartrand & Bargh, 1999 ; Preston & de Waal, 2002).

Oberman, Winkielman & Vilayanur, 2007 ; Ponari, Conson, d'Amico, Grossi & Trojano, 2012).

Dans *la shared-signal hypothesis*, il est proposé que l'expression faciale et la direction du regard contribuent toutes deux au traitement et à la perception de l'état émotionnel d'autrui. Dans leur formulation de ce modèle, Adams et Kleck (2005 ; Adams, Gordon, Baird, Ambady & Kleck, 2003 ; Hess, Adams & Kleck, 2007), avancent que lorsque l'intention communiquée par une expression faciale est combinée avec une direction congruente du regard, alors la perception de l'émotion correspondante est décuplée. Ainsi, la perception des expressions faciales reflétant des émotions orientées vers l'approche (e.g., joie, colère) serait augmentée/facilitée lorsqu'elles sont accompagnées d'un regard direct, tandis que la perception des expressions orientées vers l'évitement (e.g., peur) serait augmentée/facilitée lorsqu'elles sont accompagnées d'un regard évitant. Concernant les réactions faciales spontanées, il est ici supposé qu'elles correspondent à une réaction émotionnelle à l'expression, et qu'elles sont donc elles aussi sujettes aux influences de la congruence regard-expression. Cet effet du regard est lié au fait qu'il constitue une clé contextuelle importante dans l'interprétation des intentions. Ainsi, contrairement aux théories de l'*embodied cogniton,* la *shared signal hypothesis* met en avant un rôle clé de l'orientation du regard sur le traitement de l'expression faciale. En effet, dans les modèles de l'*embodied cognition* l'orientation du regard a un rôle plus limité, puisqu'il se restreint à l'amélioration de l'imitation faciale spontanée et la simulation incarnée en cas de regard direct (Niedenthal, 2007 ; Niedenthal, et al., 2005 ; Niedenthal, et al., 2010). La *shared signal hypothesis* trouve notamment validation au travers d'études démontrant des effets de congruence expression-regard sur la vitesse et l'exactitude de catégorisation d'expressions (Adams & Kleck, 2003 ; Adams et al., 2005 ; Hess, Adams & Kleck, 2007 ; Klucharev & Sams, 2004). Des évidences ont également pu être amenées grâce à des études en EEG (i.e., P200 plus ample en cas de congruence expression-regard) (Rigato, Farroni & Johnson, 2010) et en IRMf (i.e., amygdale plus active lorsqu'il y a congruence) (Adams, et al., 2003 ; N'Diaye, Sander et Vuillemier, 2009). Concernant l'impact du regard sur les réactions faciales spontanées, il a pu être démontré que ces dernières étaient plus amples en cas de congruence entre expression et regard (e.g., joie avec regard direct pour les zygomatiques, peur avec regard évitant pour le *frontalis* latéral), et qu'il en allait de même pour l'intensité de l'expérience émotionnelle et la vitesse de catégorisation (Ganel, Goshen-Gottstein & Goddale, 2005 ; Schrammel, Pannasch, Graupner, Mojzisch & Velichkovsky, 2009 ; Soussignan et al., 2013).

D'après *les théories de l'appraisal* les réactions émotionnelles sont considérées comme étant la résultante d'un processus d'évaluation progressif incluant le stimulus et l'ensemble des circonstances l'englobant. De façon plus précise, ce courant théorique fait l'hypothèse que l'expérience émotionnelle serait générée par une séquence d'évaluations, dont chacune des évaluations viendrait modifier la nature de l'émotion expérimentée. Au cours de cette séquence, serait évaluée : la nouveauté du stimulus, sa pertinence, sa valeur plaisante versus déplaisante intrinsèque, la pertinence selon les motivations actuelles de l'individu (besoin, but, valeurs), la maitrise sur la situation et la capacité à l'éviter/surmonter, et les différentes dimensions sociales (normes, valeur, justice, ….) (Ellsworth & Scherer, 2003). Ainsi, selon ce courant théorique, les réactions émotionnelles aux expressions seraient assurées par une séquence de processus d'évaluation englobant l'expression et l'ensemble de la situation l'environnant : à la fois la situation directe, mais aussi et surtout, la pertinence pour soi de l'expression dans le contexte courant (incluant les motivations et intentions de l'individu). Concernant les réactions faciales, il est supposé que celles-ci reflètent directement ce processus d'évaluation (Smith, 1989), et qu'elles soient donc dépendantes de l'état émotionnel généré par le stimulus et la pertinence pour soi de ce dernier selon les facteurs contextuels (Soussignan et al., 2013 ; Soussignan, Schaal, Boulanger, Garcia, & Jiang, 2015). Les principales différences de cette théorie par rapport aux deux précédemment évoquées, concernant les réactions faciales spontanées aux expressions, sont qu'elles ne seraient pas uniquement dépendantes de l'expression et/ou du regard observé, mais qu'elles dépendraient également des facteurs contextuels et motivationnels. L'importance de ces deux facteurs dans le traitement des expressions faciales, et les réactions émotionnelles à ces dernières, trouvent de nombreuses validations au sein de la littérature (Bavelas, Lemery & Mullet, 1986 ; Bayliss, Frischen, Fenske & Tripper, 2007 ; Bayliss, Schuch & Tripper, 2010 ; Grèzes et al., 2013 ; Kret, Roelofs, Stekenbeurg & de Gelder, 2013 ; Mathews, Fox, Yiend & Calder, 2003 ; Moody, McIntosh, Mann & Weisser, 2007 ; Sander, Grandjean, Kaiser, Wehrle & Scherer, 2007). Concernant l'impact de ces facteurs sur les RFRs (i.e., Réactions Faciales Rapides, appelées aussi Réactions Faciales Spontanées), Soussignan et collaborateurs présentent des résultats en accord avec cette hypothèse. Dans leurs études, ils démontrent que les RFRs varient selon la congruence entre expression faciale et orientation du regard (Soussignan et al., 2013), mais qu'elles vont aussi être fortement dépendantes des facteurs contextuels accompagnant l'apparition du visage expressif (i.e., présence d'un aliment appétant versus non-appétant) (Soussignan, et al., 2015). Il est également à préciser qu'en parallèle de cette théorie, Hess & Fisher (2014) ont avancé une

hypothèse alternative selon laquelle les réactions faciales refléteraient une imitation des expressions émotionnelles par autrui, se basant sur l'évaluation de l'expression en contexte (comme décrit dans les modèles de l'*appraisal*). Cette imitation de l'expression « évaluée » chez autrui aurait pour but ultime de remplir des fonctions affiliatives, à la fois au travers de la synchronisation/partage de l'expression (ou tout du moins de valence d'expression) avec cette personne et du partage de sa perspective émotionnelle (Hess & Fischer, 2013, 2014).

Concernant les nourrissons, du fait de l'absence d'accès direct à leur ressenti émotionnel, et donc à leur interprétation du signal expressif, il est difficile de déterminer si les différents facteurs invoqués dans les théories susmentionnées contribuent et influent sur leur perception des expressions. Toutefois leurs réactions faciales aux expressions pourraient fournir une porte d'accès aux réponses à cette question, étant donné les différences dans les prédictions des différents modèles.

Dans un premier temps, parmi les travaux sur les réactions faciales du nourrisson, figurent en première ligne les travaux d'Andrew Meltzoff sur l'imitation[4]. Dans leur article de 1997, Meltzoff et Moore, rapportent notamment une capacité précoce de l'enfant à reproduire les mouvements faciaux observés sur le visage d'un adulte. Ils observent que, dès 2 semaines post-partum, les enfants reproduisent les mouvements répétés de protrusion de la langue, de protrusion des lèvres et d'ouverture de la bouche produits par l'expérimentateur situé en face d'eux, et ce, avec ou sans délai temporel entre la production et l'imitation (Meltzoff & Moore, 1977). Plus récemment cette capacité d'imitation des nouveau-nés a également pu être rapportée pour d'autres mouvements faciaux tels que les mouvements d'ouverture de la bouche et de resserrement des lèvres présents lors de la production de sons langagiers (i.e., /*a*/ et /*m*/) (Chen, Striano & Rakoczy, 2004). Dans le modèle AIM (Active Intermodal Mapping), les auteurs font l'hypothèse que cette capacité d'imitation se baserait sur la présence d'un lien inné entre la perception et la production des actes humains, par le partage de représentations neuronales (Meltzoff, 2007 ; Meltzoff & Morre, 1997 ; Meltzoff & Decety, 2003).

[4] René Zazzo fait partie des premiers auteurs à avoir cité et décrit la présence de ce phénomène dans son article « à propos de « l'imitation » précocissime de la protrusion de la langue » (Zazzo, 1957). Dans cet article il fait état de la présence d'une imitation du geste de protrusion de la langue, qu'il observe sur son fils alors âgé d'une quinzaine de jours : « Je n'avais donc aucunement l'intention de provoquer une imitation, d'ailleurs inconcevable pour moi à cette époque-là, le jour où avec mon fils, je me suis amusé à lui tirer la langue. A mon grand étonnement le bébé me tira la langue à son tour. Puis il s'arrêta. Je recommençai. Il recommença. Et ainsi plusieurs fois de suite ».

Concernant les expressions faciales, les auteurs font l'hypothèse que ce même réseau permettrait à l'enfant de projeter des états mentaux liés par expérience à des réactions faciales/vocales/corporelles à l'adulte produisant la même action (Meltzoff & Decety, 2003). Plus simplement, l'enfant apprendrait par expérience le lien unifiant état mental et expression faciale, et par la suite attribuerait à l'adulte des états mentaux spécifiques selon le recouvrement entre l'expression perçue et l'expression liée à un état émotionnel par expérience (Meltzoff & Decety, 2003). Cette formulation théorique est non sans rappeler celle formulée dans les modèles de l'*embodied cognition*. Différentes études affirment la présence d'une imitation spontanée des expressions faciales chez le nourrisson. Dans leur étude, Field et collaborateurs ont exposé des nouveau-nés à un expérimentateur venant leur exprimer la joie, la peur et la surprise. Ils observent que les nouveau-nés imitent de façon sélective les différentes expressions qu'ils observent (Field et al., 1982 ; 1983). Similairement, des études sur les enfants allant de 2,5 à 9 mois, rapportent la présence d'une imitation de l'émotion (vocale et faciale) à laquelle ils sont exposés (Haviland & Lelwica, 1987 ; Izard et al., 1995 ; Termine et Izard, 1988). Ainsi, d'après ces études, les nourrissons feraient preuve d'une aptitude à imiter les émotions exprimées facialement par l'adulte, et ce, dès la naissance.

Toutefois, cette idée est à l'heure actuelle remise en cause. Dans leur étude sur les nouveau-nés, Kaitz et collaborateurs (1988) ne sont pas parvenus à répliquer le mimétisme des expressions rapporté dans l'étude de Field et collaborateurs. Ils ont pu toutefois observer un mimétisme du geste de protrusion de langue. Cette différence est interprétée comme étant liée à une différence fondamentale dans la nature des deux gestes : l'un étant instrumental et l'autre étant communicatif ; l'un bien représenté dans le répertoire comportemental de l'enfant, l'autre émergeant plus tard. Les auteurs, ainsi que d'autres chercheurs, vont même jusqu'à annoncer que cette différence pourrait être liée au fait que la protrusion de la langue ne soit en réalité pas un geste imitatif, mais un « pattern d'action fixe» pouvant être déclenché par une certaine classe de stimuli (e.g., Heyes, 2001 ; Jacobson, 1979). Cette dernière proposition a cependant été contredite par Soussignan et collaborateur (2011) qui ont démontré la présence d'une amélioration du geste de protrusion avec la répétition de sa démonstration ; ce qui est en désaccord avec l'hypothèse d'un pattern d'action fixe, et davantage en accord avec les prédictions du modèle de Meltzoff (Soussignan, Courtial, Canet, Danon-Apter & Nadel, 2011). Un second point soulevé concerne la méthodologie employée pour le codage des réactions faciales de l'enfant. Parmi les travaux suscités faisant état d'une imitation des expressions chez le nourrisson, la plupart ont eu recours au MAX pour coder les

réactions faciales des enfants. Or, ce système de codage basé sur les réactions faciales adultes, s'est révélé inefficace pour le codage des réactions faciales du nourrisson (e.g., Camras et al., 2007 ; Oster, Hegley & Nadel, 1992). Dans ces recherches critiquant le système de codage utilisé, il a également été pointé que les réactions faciales de l'enfant semblent davantage correspondre à une réaction émotionnelle à la signification et/ou à la valence des expressions plutôt qu'à une imitation. Certains auteurs avancent aussi que bien qu'ils soient aptes à percevoir et répondre aux différentes expressions faciales de l'adulte, il semblerait que les nourrissons n'expriment quant à eux pas d'expressions faciales discrètes (e.g., en situation de peur et de colère, bien qu'ils expriment des réactions faciales négatives, les nourrissons n'expriment pas d'expressions distinctes (peur et colère classiquement observé chez l'adulte)) (Camras et al., 2007 ; Hoehl & Striano, 2010a ; Oster, Hegley & Nadel, 1992). Ces propos concernant la présence d'une réaction émotionnelle de l'enfant aux expressions sont également rejoints par différentes études se penchant sur la sensibilité de l'enfant à la contingence en situation d'interaction (i.e., sensibilité de l'enfant au fait que l'autre, ici l'adulte, répondent de façon adaptée aux signaux faciaux, vocaux et gestuels émis). Dans ces études, il est démontré qu'à partir de 2-3 mois l'enfant devient sensible à la contingence de l'adulte et aux signaux multimodaux positifs qu'il lui exprime, et que l'enfant y répond à son tour de façon émotionnellement contingente (i.e., augmentation des vocalisations positives et plus de sourires) (Bertin & Striano, 2006 ; Bigelow & Rochat, 2006 ; Legerstee & Varghese, 2001). Cette sensibilité s'observe chez l'enfant tout au long de la première année (D'Entremont & Muir, 1999 ; Kreutzer & Charlesworth, 1973). Ainsi, concernant la nature des réactions faciales du nourrisson aux expressions émotionnelles, il apparaît au vu de ces derniers éléments, qu'elles reflètent davantage une réaction émotionnelle plutôt qu'un acte imitatif.

Concernant les évidences d'un effet du regard sur les réactions faciales de l'enfant, celles-ci ne sont à l'heure actuelle que très parcellaires. En effet, bien qu'il ait été démontré que les nourrissons soient sensibles à l'orientation du regard dès la naissance (Farroni, Csibra, Simion & Johnson, 2002) et que cette sensibilité va s'affiner par la suite (Symons, Hains & Muir, 1998), à notre connaissance, aucune étude ne s'est encore penchée sur les impacts directs de l'orientation du regard sur les réactions faciales de l'enfant aux expressions émotionnelles. Nos connaissances actuelles semblent se limiter à des études comportementales et en électroencéphalographie démontrant que les enfants allouent plus d'attention au visage lorsqu'il y a congruence entre orientation du regard et expression (e.g.,

joie et regard direct, colère et regard direct, peur et regard évitant) (Hoel, et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2008, 2010b, 2010c ; Hoel, Wiese & Striano, 2008 ; Rigato, Farroni & Johnson, 2009 ; Rigato, Menon, Farroni & Johnson, 2013 ; Rigato, Menon, Johnson & Farroni, 2011).

Il apparaît donc au vu de ces différents éléments sur les réactions faciales du nourrisson aux expressions émotionnelles, que ces derniers sont sensibles au signal émotionnel relayé par les expressions. Toutefois, les détails concernant l'ontogenèse de cette sensibilité à la signification et la contribution de différents facteurs, tels que le regard et la pertinence pour soi, sont encore floue à l'heure actuelle.

Ainsi, l'un des objectifs de cette thèse est de lever les ambiguïtés relatives à l'ontogenèse des capacités du nourrisson à traiter les expressions faciales, à la fois concernant les stratégies d'explorations visuelles des expressions (i.e., les zones et éléments du visage spécifiquement explorés), mais aussi concernant les réactions faciales du nourrisson aux expressions et l'accès à leur signification. Nous tâcherons également de venir préciser la nature de la discrimination des expressions faciales chez les nourrissons de 3 mois en nous intéressant à leurs réactions cérébrales aux différentes expressions.

1.3.3. Les bases cérébrales du traitement du visage et des expressions faciales

Différentes structures ont été pointées comme étant impliquées dans le traitement des visages et la perception des expressions. Le gyrus fusiforme (i.e., FFA = Fusiforme Face Area ; Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997) constitue une zone clé, puisqu'elle est spécifiquement impliquée dans le traitement des visages, la détection et l'encodage de sa structure, ainsi qu'un contributeur majeur dans la reconnaissance des visages (Gobbini & Haxby, 2007 ; Haxby et al., 2001). Il est à préciser que bien qu'il soit généralement considéré que la FFA n'est pas impliquée dans le traitement des expressions faciales, certaines études montrent qu'elle répond aux expressions (e.g., Ganel, Valyear, Goshen-Gottstein & Goodale, 2005). Bien que cette structure soit centrale dans le traitement des visages, un réseau plus étendu de structures a pu être désigné comme étant impliqué dans la perception et la reconnaissance des expressions faciales. Dans un premiers temps, le rôle joué par l'amygdale, ainsi que sa forte sensibilité aux visages expressifs, ont pu être robustement démontrés. En

effet, de nombreuses études rapportent son activation lors de la présentation des expressions tant positives que négatives (même en subliminal) (Adolphs et al., 2005 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Lidell et al., 2005 ; Morris & Dolan, 2002 ; Morris, Ohman & Dolan, 1999 ; Suslow et al., 2010 ; Whalen et al., 2004). Adjacent à la FFA, le sillon temporal supérieur a également été désigné comme étant spécifiquement impliqué dans l'intégration des variations d'expressions (Haxby et al., 2001 ; Gobbini & Haxby, 2007). Enfin, différentes régions cérébrales n'étant pas uniquement dédiées à la perception des expressions faciales ont pu, elles aussi, être identifiées comme faisant partie intégrante de la perception des expressions. Parmi ces structures figurent notamment : le cortex orbito-frontal, l'insula et le gyrus cingulaire antérieur (Critchley, 2000 ; Fairhall & Ishai, 2006 ; McGlone, Österbauer, Dematte & Spence, 2013 ; Phillips, Drevets, Scott, Rauch & Lane, 2003 ; Phillips & Heining, 2002 ; Royet et al., 2000 ; Seubert et al., 2010 ; Steinberg et al., 2011 ; Wicker et al., 2003). Ces dernières structures ainsi que l'amygdale sont généralement observées comme étant activées lors de l'expérience des différents états émotionnels (Kassam, Markey, Cherkassky, Loewenstein & Just, 2013 ; LeDoux, 2000).

Dans leur volonté d'unifier les connaissances issues des recherches en imagerie et de modéliser les interactions entre les différents systèmes cérébraux en charge de la perception des visages, ainsi que les différents processus cognitifs qu'ils sous-tendent, Haxby et collaborateur, ont proposé « le modèle du système neuronal distribué humain pour la perception du visage » (Haxby, Hoffman & Gobbini, 2000) (pour illustration voir **figure 5**). Dans une volonté de synthèse et de clarté, nous nous restreindrons ici à ne décrire que les aspects relatifs au traitement des expressions faciales.

Le modèle est organisé en une structure hiérarchique composée de deux structures principales : un système cœur – en charge de l'analyse visuelle des visages et spécifique à ce traitement – et un système étendu – traitant la signification des informations extraites du visage et faisant partie de systèmes cérébraux effectuant d'autres fonctions cognitives. Dans ce modèle, le traitement des expressions faciales est sous-tendu par trois structures organisées de façon hiérarchique. L'information visuelle parvient dans un premier temps au niveau du gyrus occipital inférieur, qui serait en charge de la décomposition du signal visuel et qui fournirait l'input au gyrus fusiforme et au sillon temporal supérieur (STS). Le STS va quant à lui extraire et traiter les aspects variables du visage, et ainsi assurer le traitement de l'expression, mais aussi du regard et des mouvements de lèvres. L'information extraite par le STS va ensuite être retransmise au niveau de structures spécifiques comprises dans le système

étendu (i.e., l'amygdale, l'insula, le cortex somatosensoriel et le système limbique) qui vont permettre la perception et la reconnaissance des expressions émotionnelles.

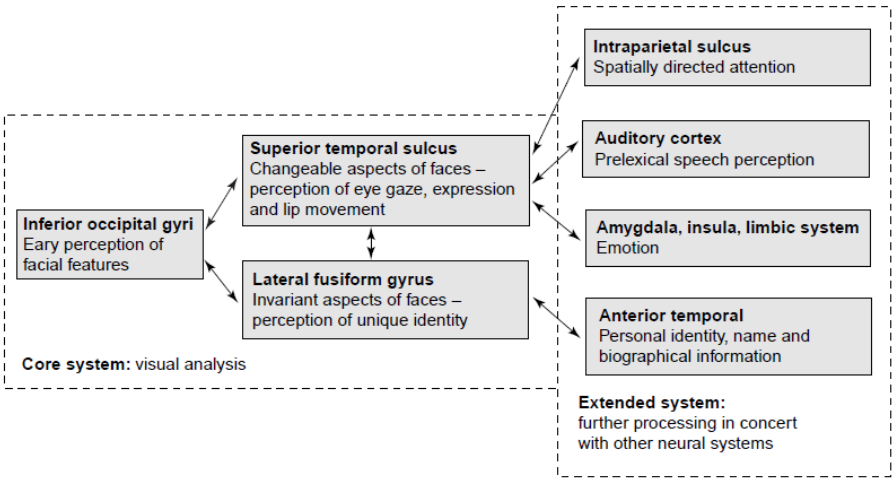


Figure 5 : Schéma du système neuronal distribué humain pour la perception du visage de Haxby, Hoffman et Gobbini (2000).

En 2011, les auteurs ont revisité ce modèle. Dans leur reformulation du modèle (illustration fournie en **figure 6**), le système cœur demeure inchangé, c'est toutefois le système étendu qui se voit modifié (Haxby & Gobbini, 2011). Dans cette nouvelle formulation, l'extraction et le traitement des expressions faciales et de l'orientation du regard sont désormais inclus au sein d'un même système en charge de la simulation motrice. Les auteurs supposent ici que l'extraction de ces deux types d'informations serait sous-tendue par une simulation de l'orientation du regard et de l'expression observés sur autrui. Le traitement du regard serait effectué au niveau du champ oculomoteur frontal et du sillon intrapariétal – deux régions jouant un rôle central dans le contrôle oculomoteur et attentionnel. Le traitement de l'expression serait quant à lui assuré par l'opercule frontal et le lobe pariétal inférieur, deux régions en charge des représentations motrices des expressions. Il y aurait donc engagement du système des neurones miroirs et engagement des représentations en charge de l'exécution motrice lors de la perception. Cette reformulation est également complétée par l'addition d'un nouveau module en charge de la génération des réponses émotionnelles qui est sous-tendu par l'insula, l'amygdale et le système récompense. Ce système est non seulement sous l'influence de l'input provenant du système en charge du traitement de l'expression, mais aussi de ceux fournis par les systèmes de traitement de l'identité et de l'orientation du regard. Ainsi, il y

aurait génération d'un état émotionnel spécifique non seulement en lien avec la reconnaissance d'une expression, mais aussi lors de la reconnaissance de l'identité et de la perception d'une orientation de regard. Cette nouvelle formulation du modèle est plus en accord avec les éléments de la littérature faisant état de l'implication des réactions faciales spontanées et des neurones miroirs dans le traitement des expressions faciales ; mais aussi avec les travaux sur l'influence du regard et de l'identité sur la réponse émotionnelle aux visages expressifs et non-expressifs. Enfin, la présence des différentes boucles rétroactives vers le système cœur permet la prise en considération des effets descendants (i.e., effets « top-down ») pouvant se refléter au travers des effets contextuels, d'amorçages et d'information observés expérimentalement.

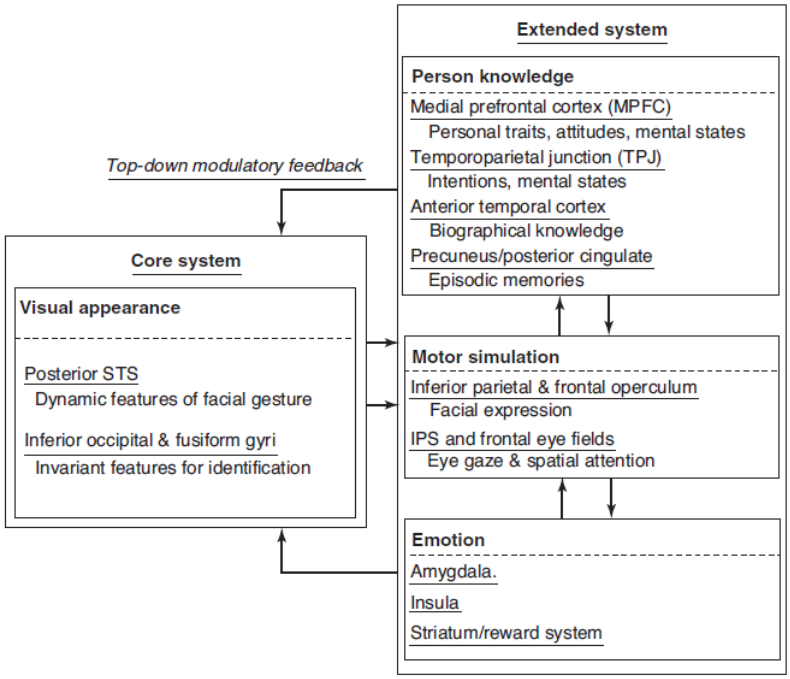


Figure 6 : Schéma du modèle mis à jour du système neuronal distribué humain pour la perception du visage de Haxby & Gobbini (2011).

Il apparaît ainsi que le traitement des expressions faciales implique un réseau complexe de structures largement distribuées dans le cerveau. Malgré un accord global sur l'implication des différentes structures désignées par Haxby et leurs fonctions respectives, il est à préciser que certains désaccords sont tout de même présents. En effet, selon Adolphs (2002), un réseau de structures plus large pourrait être impliqué dans le traitement et la perception des expressions (avec notamment implication du cortex somatosensoriel et des

noyaux gris centraux). Dans un second temps, est aussi critiquée l'organisation hiérarchique du modèle. Selon Adolphs, du fait des activations précoces du cortex orbito-frontal et de l'amygdale, ces structures pourraient participer à la reconnaissance des émotions de trois façons différentes : par modulation de la représentation perceptive de l'expression par feedback direct sur les différentes structures en charge de son intégration, par leur action sur la récupération de concepts perceptifs sur les émotions, ou encore, par l'activation d'une réponse émotionnelle. L'auteur souligne également la possibilité d'une participation plus large du cortex occipito-temporal, puisqu'il pourrait aussi être impliqué dans l'extraction des relations configurales entres les éléments faciaux (Adolphs, 2002 ; Atkinson & Adolphs, 2011). Enfin, il est à préciser, que les régions définies comme centrales dans le traitement des visages (i.e., gyrus fusiforme, région occipitale inférieure et sillon temporal supérieur) ont pu être observées comme étant actives lors du traitement de visage chez le nourrisson dès 2 mois (Tzourio-Mazoyer et al., 2002).

Chapitre 2 :
Le traitement multi-sensoriel des expressions faciales

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés au développement des capacités de traitement des expressions faciales chez les nourrissons au cours de la première année. Cette revue de la littérature met notamment en avant la présence d'un rôle clé des expériences quotidiennes de l'enfant dans l'établissement progressif de son expertise de traitement des visages et des expressions faciales. En effet, il apparaît que c'est au travers de leurs expériences répétées avec les différentes expressions que les nourrissons établiraient et affineraient leur capacité à discriminer, catégoriser et à attribuer une signification spécifique aux différentes expressions ; pour ainsi pouvoir *in fine* adapter leur réponses comportementales aux signaux émotionnels véhiculés par le visage d'autrui. Toutefois, lors de leur production, les expressions faciales ne constituent pas un phénomène apparaissant de façon isolée. Elles apparaissent dans un contexte multi-sensoriel, puisqu'elles vont être produites en cooccurrence avec des modulations de l'environnement olfactif, visuel, tactile, auditif et gustatif (e.g., production d'une expression en réaction à une stimulation, intonation particulière produite avec l'expression, etc.). Dans ce chapitre, nous viendrons donc nous intéresser au traitement multi-sensoriel chez le nourrisson et au rôle crucial que pourrait avoir ce type de traitement dans la mise en place des capacités de traitement des expressions faciales. Enfin nous nous intéresserons plus particulièrement au rôle que le contexte olfactif, et son intégration lors du traitement des expressions faciales, pourrait jouer dans le développement socio-émotionnel du nourrisson.

2.1. LE TRAITEMENT MULTI-SENSORIEL CHEZ LE NOURRISSON

D'un point de vue historique, les recherches sur le nourrisson se sont majoritairement focalisées sur le développement des capacités d'intégration sensorielle en considérant de façon isolée chacune des différentes modalités. En a ainsi résulté une approche unimodale du développement avec des chercheurs se spécialisant traditionnellement dans la recherche sur une modalité spécifique, ainsi qu'une vision compartimentée et non-interactive de l'intégration sensorielle. Toutefois, les résultats des études contemporaines viennent contredire cette approche : les nourrissons sont capables de percevoir les informations redondantes entre les différents sens provenant d'un même objet ou événement. Il apparaît

même que cette aptitude à percevoir la redondance inter-sensorielle constitue un pivot du développement perceptuel, puisqu'elle permettrait un déploiement attentionnel optimal, ainsi que la mise en place d'aptitudes perceptives de plus haut niveau.

Cette vision est notamment avancée par Bahrick et Lickliter (2002), dans leur « hypothèse de la redondance inter-sensorielle ». Dans cette formulation théorique, les auteurs proposent que dès la prime enfance, les différentes stimulations sensorielles provenant d'un même stimulus ou événement, soient unifiées en un percept unique sur la base de la redondance/simultanéité des informations relayées par les différents sens. Cette unification serait assurée par les différentes zones de convergence multi-sensorielles présentes au niveau cortical et sous-cortical. De cette convergence découlerait un effet super-additif (une gestalt) se retrouvant au niveau comportemental et cognitif, par une plus forte saillance des informations présentes simultanément au niveau de différentes modalités sensorielles. Ainsi, nourrissons et adultes porteraient plus attention, encoderaient mieux et récupèreraient mieux les événements multi-sensoriels plutôt qu'uni-sensoriels (Barhick & Lickliter, 2002).

L'intérêt de la convergence des flux sensoriels est donc double : elle permet l'unification des différents flux sensoriels en un percept unique et cohérent, et vient également permettre une mise en relation ainsi qu'une emphase des événements multi-sensoriels dans la perception et la récupération des informations (Barhick & Lickliter, 2002 ; Jouen & Molina, 2000 ; Robinson & Sloutsky, 2010).

La capacité à lier les stimulations provenant de différents sens pourrait être antérieure à la naissance et remonter à la vie in-utéro. Différents travaux démontrent la présence d'une aptitude du fœtus à effectuer des mises en relation et des apprentissages inter-sensoriels (Feijoo, 1981 dans Herbinet & Busnel, 1995 ; James, 2010). Dès 7 mois de grossesse, le fœtus peut apprendre le lien entre un son et une vibration, et démontrer par la suite une réaction à la présentation seule du son (pour illustration du dispositif voir **figure 7**) (Spelt, 1948). A la naissance, l'aptitude précoce du nourrisson à intégrer et mettre en cohérence les informations émanant des différents flux sensoriels se retrouve tout particulièrement dans les travaux de Streri. En effet, dans ses études sur le transfert intermodal, l'auteur démontre une aptitude du nouveau-né et du jeune nourrisson à mettre en équivalence un objet exploré tactilement avec sa forme visuelle, et inversement (Sann & Steri, 2007 ; Streri, 2012 ; Steri & Gentaz, 2003). Par exemple, à 2 mois, un nourrisson abandonne plus rapidement l'exploration tactile d'un objet et le rejette plus vite si ce dernier correspond à la forme visuelle à laquelle il est

simultanément exposé (Jouen & Molina, 2000 ; Streri & Milhet, 1988). Concernant le visage, l'établissement progressif d'une aptitude de l'enfant à venir effectuer des apprentissages inter-sensoriels et traiter les équivalences inter-sensorielles a pu être démontré (Blass & Camp, 2001 ; Brookes et al., 2001 ; Patterson & Werker, 2003). Par exemple, à 2 mois les enfants explorent plus longtemps un visage produisant la syllabe qu'ils sont simultanément en train d'entendre par rapport à un visage en prononçant une autre (Patterson & Werker, 2003). Il est notamment avancé que l'aptitude du nourrisson à établir ces équivalences entre les différentes modalités est issue d'un apprentissage progressif, si la mise en équivalence ne peut se baser sur des informations de bas niveau (e.g., synchronie, amplitude, temporalité, …). Cet apprentissage s'effectuerait au travers des expériences quotidiennes de l'enfant avec les visages et les informations multi-sensorielles qui lui sont liées (Boisferon et al., 2015). Enfin, la présence d'une contribution des différents sens dans l'intégration des informations faciales peut aussi se retrouver au travers d'une fusion de ces derniers. Un exemple illustrant ce propos est l'effet McGurk, qui se reflète par une fusion audio-visuelle entre la syllabe entendue et celle vue prononcée par un visage : voir un visage émettre « ga » et entendre la syllabe « ba » entraîne la perception de la syllabe « da » ; voir un visage émettre « va » et entendre « ba » entraine la perception de la syllabe « va » (McGurk & MacDonald, 1976). Un effet similaire a pu être observé chez le nourrisson dès 5 mois : un nourrisson habitué simultanément à un visage et à une voix prononçant « va », ne réagit pas lorsque la syllabe entendue est remplacée par « ba » et que la syllabe prononcée par le visage reste « va ». Ce résultat est interprété comme étant lié à une fusion des informations audio-visuelles. L'enfant ne perçoit pas les changements de syllabe entendue puisqu'il continue de percevoir « va » (Rosenblum, Schmuckler & Jonson, 1997).

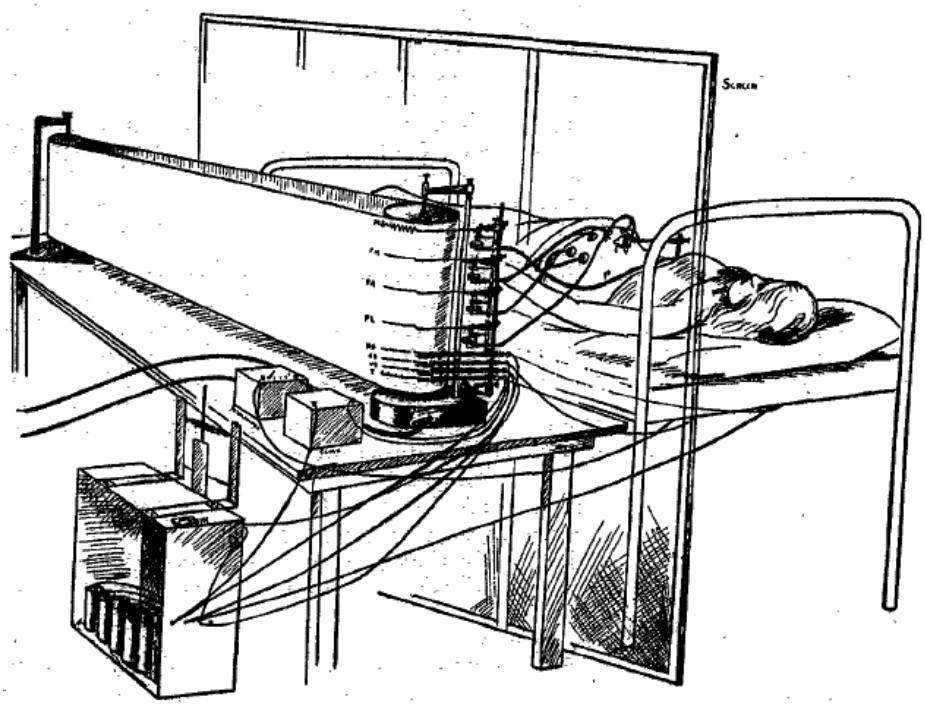


Figure 7 : Illustration du dispositif utilisé par Spelt (1948), pour le conditionnement audio-tactile des fœtus. La collecte des mouvements fœtaux est effectuée avec un kymographe (en haut à gauche) connecté à des capteurs placés sur le ventre de la mère. La stimulation est permise par l'agitation d'un stylet sur le ventre de la mère, tandis que la stimulation auditive est permise par la frappe d'un battant sur une boite en bois (en bas à gauche).

Concernant la saillance des événements multi-sensoriels dans la perception du nourrisson, différentes expériences rapportent directement la présence de ce phénomène dans la perception et l'apprentissage du visage chez le nouveau-né. En effet, il est démontré que les nouveau-nés reconnaissent mieux un visage (celui de leur mère ou celui d'un étranger) s'ils l'ont précédemment vu et entendu parler plutôt que si le visage demeurait silencieux (Coulon, Guellaï & Streri, 2011 ; Sai, 2005). L'importance de la multi-sensorialité de l'événement et de la redondance inter-sensorielle est d'autant plus mise en avant par le fait que voir le visage en mouvement (i.e., parler mais sans bande son) ou entendre une voix parler pendant que le visage reste statique ne suffit pas ; il faut que ces deux informations (audition et mouvement) soient simultanément présentes (qu'elles soient synchrones et en redondance) (Guellaï, Coulon & Streri, 2011).

Au vu de ces différents éléments, il en ressort que précocement, le nourrisson disposerait déjà d'un bagage sensoriel et cognitif lui permettant de percevoir et d'encoder les stimuli et événements de façon multi-sensorielle. Il apparaît également que la perception et l'intégration multi-sensorielle est prépondérante chez le nourrisson. Leur intégration des

visages et des différents signaux faciaux est favorisée lorsqu'il y a multi-sensorialité et redondance entre les sens. Il est donc logique d'assumer que les nourrissons puissent percevoir les informations multi-sensorielles présentes dans le contexte lors de l'occurrence de différents événements faciaux, et lier ces derniers. De ce fait, les nourrissons pourraient démontrer une sensibilité aux différents facteurs contextuels intégrés par les différents sens dans leur traitement des expressions faciales, à l'image des effets contextuels observés chez l'adulte. Ces influences du contexte d'apparition des expressions seront décrites dans les sections suivantes.

2.2. INFLUENCE DU CONTEXTE SUR LE TRAITEMENT DU VISAGE CHEZ L'ADULTE

La considération du contexte dans les études sur le traitement du visage et la perception des expressions faciales est relativement récente. En effet, se basant sur la présence de six expressions de base reconnues automatiquement et universellement, de nombreux chercheurs ont mené leurs études en étant uniquement guidés par l'idée selon laquelle les émotions sont affichées sur le visage au moyen d'un arrangement spécifique d'unités d'actions qu'un autre individu pourra décrypter. La majorité des études sur la thématique se sont ainsi attachées à l'étude du traitement des expressions faciales en utilisant des visages décontextualisés. Toutefois, dans notre vie quotidienne, les visages et expressions n'apparaissent que rarement de manière isolée. Bien au contraire, ils sont généralement intégrés au sein d'un contexte multi-sensoriel, incluant la voix, les mouvements et postures corporels, ainsi que l'ensemble de la situation au sens large (i.e., stimuli visuels, olfactifs, auditifs, tactiles et gustatifs contigus à leur apparition).

Depuis les dernières décennies, la scène de la recherche a pu toutefois voir émerger de plus en plus d'études prenant en considération l'impact des facteurs contextuels sur le traitement et la perception des expressions. Ces recherches ont ainsi permis de mettre en avant que la perception des expressions faciales ne se base pas uniquement sur le traitement des différents éléments faciaux et de leur configuration, mais qu'elle dérive également du contexte dans lequel elles sont perçues ; sans nécessité de traitement conscient de ce contexte

(pour une revue voir Barrett, Mesquita & Gendron, 2011). Le traitement perceptif serait donc perméable aux influences contextuelles.

Un effet reflétant parfaitement cet impact des informations contextuelles sur la perception des expressions est l'influence des informations concernant la situation. S'il vous est par exemple expliqué que la photographie qui vous est présentée ci-dessous (**figure 8**) a été prise par le colocataire de cette personne, au moment où il lui a annoncé avoir parié au poker sa télévision et son ordinateur de travail dans lequel sont enregistrés des données et documents importants, et avoir perdu la mise. Votre perception sur cette photo penchera, suite à cette information, davantage en faveur d'une perception de colère. Au contraire s'il vous est demandé de juger directement l'émotion de cette personne sans vous donner de situation particulière, votre jugement ira davantage en faveur de la peur.

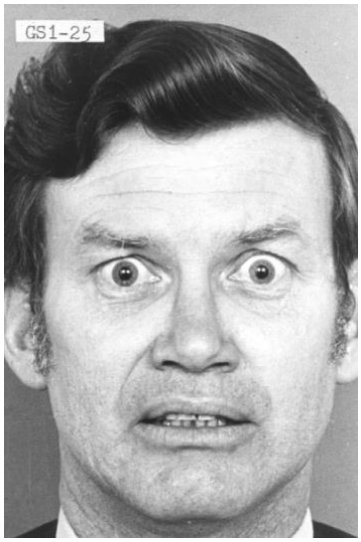


Figure 8 : Photographie d'un homme exprimant la peur, extrait de la base de visages d'Ekman (Ekman & Friesen, 1976).

De la même manière Caroll et Russell (1996) ont étudié les impacts du contexte sur la perception de différentes expressions. Dans leurs expériences, le contexte était dans un premier temps planté au moyen de la narration d'une histoire venant dépeindre une situation menant à un état émotionnel spécifique du protagoniste. Suite à cela, les participants avaient pour consigne de catégoriser l'expression qui leur était présentée. Ils ont pu observer la présence d'une modulation du jugement expressif en congruence avec l'émotion suscitée par le contexte (Caroll & Russel, 1996).

Ces effets du contexte sur le traitement des expressions ne se limitent pas qu'aux informations amodales relayées au cours d'une narration. En effet, les différentes

informations présentes au niveau de la scène visuelle font aussi partie intégrante de la perception des expressions faciales. Au cours de leurs expériences, Aviezer et collaborateurs (2008), ont ainsi montré une modulation de la perception des expressions selon les informations relayées par la posture corporelle et les objets présents au sein de la scène visuelle. Un visage de dégoût – au sens d'Ekman – pourra ainsi être perçu comme exprimant du dégoût, de la colère, de la tristesse ou de la peur selon le contexte dans lequel il est inséré (pour illustration voir **figure 9**). Il est également rapporté une meilleure reconnaissance des expressions lorsque l'émotion véhiculée par l'expression faciale et celle suscitée par le contexte est la même (Aviezer,et al., 2008 ; Righart & De Gelder, 2008b) ; mais aussi la présence d'une influence du degré de similarité entre l'émotion à traiter et celle évoquée par le contexte lorsque celles-ci sont différentes : plus les deux émotions sont physiquement similaires plus il y aura confusion (e.g., un visage de colère dans un contexte de dégoût sera souvent perçu comme exprimant du dégoût) ; plus elles sont physiquement dissimilaires moins il y a confusion (e.g., par rapport à un visage de colère, un visage de peur dans un contexte de dégoût est moins souvent perçu comme exprimant du dégoût) (Aviezer,et al., 2008 (Etude 1)). L'addition d'un système d'enregistrement des mouvements oculaires à l'étude a permis en supplément de révéler que le contexte venait biaiser l'exploration visuelle des expressions en congruence avec l'émotion qu'il suggère : les différentes régions faciales sont explorées de la même façon que si le visage exprimait l'émotion suscitée par le contexte, et ce, qu'il y ait congruence ou non avec l'émotion exprimée par le visage (Aviezer et al., 2008 (Etude 2)). Ces effets de la scène visuelle sont également observés au niveau cérébral. Une N170 de plus forte amplitude est observée en cas de congruence entre expression et contexte, plutôt qu'en cas d'incongruence (Righart & de Gelder, 2008a). Enfin, des effets de modulation du traitement de visages expressifs selon le contexte visuel dans lequel ils s'insèrent se retrouvent aussi aux travers d'études en amorçage : ici la présentation subliminale d'un visage expressif ou d'un stimulus émotionnel (i.e., images de la IAPS, mots) modifie le traitement subséquent des expressions faciales (i.e., provoque une facilitation, une interférence ou un biais d'évaluation) (Li, Zinbarg, Boehm & Paller, 2008 ; Neumann & Lozo, 2012 ; Sweeny, Grabowecky, Suzuki & Paller, 2009).



Figure 9 : Exemple de stimuli utilisés par Aviezer et collaborateurs (2008) dans leurs expériences. Une expression faciale de dégoût identique est insérée dans 4 contextes évocateurs d'émotions différentes : dégoût (en haut à gauche), colère (en haut à droite), tristesse (en bas à gauche) et la peur (en bas à droite).

Le regard constitue un autre élément de la scène visuelle pouvant affecter le traitement expressif. En effet, comme annoncé précédemment (**Chapitre 1 section 1.3.2.**), de nombreuses études attestent d'une plus grande efficacité de catégorisation des expressions, et d'une accentuation de la perception de celles-ci, en cas de congruence entre expression et direction du regard (e.g., peur et regard évitant ; colère et regard direct) (Adams & Kleck, 2003, 2005 ; Hess et al., 2007 ; Klucharev & Sams, 2004). Cette influence de la direction du regard se retrouve là aussi au travers d'études en électroencéphalographie (N'Diaye, Sander & Vuillemier, 2009 ; Rigato, et al., 2009). Il apparaît donc que les différentes informations présentes concurremment à l'expression au niveau de la scène visuelle (i.e., regard, posture corporelle, objets, …) sont directement intégrées et participent à la perception des expressions faciales.

Concernant les impacts du contexte multi-sensoriel et des interactions inter-sensorielles sur l'intégration et la perception des expressions, à l'image de l'effet McGurk, des effets ont pu être démontrés sur l'intégration et la perception des expressions au niveau audio-visuel. En effet, du fait de la forte corrélation dans leurs apparitions, une sensibilité

prononcée à la concordance entre expressions prosodiques et faciales est présente, ainsi qu'une possibilité d'influence réciproque dans la perception de ces dernières. Différentes études rapportent ainsi la présence d'effets de facilitation du traitement des expressions lorsqu'elles sont présentées avec la prosodie correspondante, tandis qu'une interférence/perturbation du traitement est rapportée en cas de non-congruence (pour une revue voir Pell, 2005). Dans une étude où ils ont eu recours à des *morphs* de visages constituant un continuum entre la joie et la tristesse, de Gelder et Vroomen ont ainsi démontré la présence d'un décalage perceptuel lié à l'audition d'une voix expressive en simultané : les expressions sont détectées à des taux d'expressivité plus faibles lorsqu'il y a correspondance entre expression vue et entendue (e.g., visage triste avec voix triste) ; et inversement en cas de non-congruence (e.g., visage triste et voix joyeuse) (de Gelder & Vroomen, 1995 : voir de Gelder, 1999).

Ainsi, il apparaît au vu de ces éléments, que le traitement des expressions faciales est perméable aux différentes influences du contexte dans lequel elles sont ancrées[5]. Toutefois, le contexte ne se limite pas à la scène visuelle et auditive seule, puisqu'il est continuellement intégré par les flux sensoriels émanant des différents récepteurs sensoriels. Par conséquent, les effets observés du contexte auditif sur le traitement visuel des expressions faciales pourraient également être observés au niveau du contexte intégré par d'autres sensorialités.

2.3. INFLUENCES DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LE TRAITEMENT DE VISAGE CHEZ L'ADULTE

Les odeurs constituent une source d'information continuellement présente dans notre environnement. Elles vont par exemple nous permettre de nous renseigner sur la présence de différents objets (e.g., sentir l'odeur du gâteau cuisiné dans la pièce adjacente), sur différentes qualités d'un stimulus (e.g., l'odeur rance de cette viande m'indique que je devrais éviter de la consommer), sur la présence d'un danger potentiel (e.g., présence d'un feu) ou encore sur certaines qualités de nos congénères (e.g., bonne ou mauvaise hygiène). L'action des odeurs

[5] Dans cette section référençant différentes dimensions du contexte pouvant moduler le traitement des expressions faciales, n'est pas abordée la question de l'état émotionnel de l'individu. En effet, bien que ce paramètre contextuel ait un impact significatif, son effet sur le traitement des expressions sera abordé en détail dans la **section 2.4. de ce chapitre**.

sur les réponses émotionnelles, tant d'un point de vue cognitif que comportemental, est constante, et peut découler de leurs qualités hédoniques intrinsèques (i.e., caractère plaisant ou déplaisant d'une odeur lié à ses propriétés sensorielles (stimulation trigéminale, intensité, etc.)), mais aussi de leurs liaisons à des expériences et événements émotionnellement chargés (Schaal, 1988). De plus, les odeurs peuvent agir sur les réponses comportementales et faire l'objet d'apprentissages émotionnels sans même qu'il y ait nécessité d'une perception consciente (Holland, Hendriks & Aart, 2005 ; Kirk-Smith, Todder & Dodd, 1983 ; Zucco, Paolini & Schaal, 2009).

Concernant les interactions entre olfaction et vision, relativement peu d'études se sont intéressées à cette thématique. Toutefois, les recherches effectuées ont permis de mettre en évidence la présence d'une aptitude de l'olfaction à agir sur le traitement visuel, se reflétant au travers d'effets de facilitation et d'interférence (Chen, Katdare & Lucas, 2006 ; Seigneuric et al., 2010 ; Seo, Roidl, Müller & Negoias, 2010 ; Walla & Deecke, 2010). En effet, dans leur étude sur l'influence du contexte olfactif sur l'exploration visuelle de scènes complexes, Seigneuric et collaborateurs (2010) ont pu observer, au moyen de l'enregistrement des mouvements oculaires de leurs participants, un engagement attentionnel plus rapide vers l'objet correspondant à l'odeur sentie, ainsi qu'un traitement plus rapide de ces derniers. Des effets similaires d'amélioration du traitement en cas de congruence entre contexte olfactif et stimulus visuel à traiter, sont également rapportés au travers de plusieurs expériences impliquant des cibles et réponses comportementales diverses (e.g., traitement de mots : Hermans, Bayens & Eelen, 1998 ; Holland, Hendriks & Aarts, 2005 ; traitement d'images : Gottfried & Dolan 2003 ; saisie d'objets : Castiello, Zucco, Parma, Ansuini & Tirindelli, 2006). Ces effets sont une fois de plus corroborés par des études en électroencéphalographie : plus forte amplitude de la N400 en cas de non-congruence (Grigor, 1995 ; Grigor, Van Toller, Behan & Richardson, 1999) et une P300b plus négative pour le signal rare non-congruent en paradigme oddball (Lorig, Mayer, Moore & Warrenburg, 1993 ; Lorig, Turner, Matia & Warrenburg, 1995). Il est à souligner, que ces effets peuvent être observés à la fois sans nécessiter que la tâche à effectuer implique un traitement conscient de l'odeur et/ou se porte sur la congruence odeur-item visuel, mais aussi lorsque l'odeur est présentée à des concentrations subliminales (i.e., en dessous des seuils de détection) (Li, Moallem, Paller & Gottgried, 2007).

Concernant maintenant l'impact plus spécifique des odeurs sur le traitement des visages, il a dans un premier temps pu être rapporté la présence d'un effet du contexte olfactif

sur l'apprentissage des visages (Walla, 2008 ; Walla, Mayer, Deecke & Lang, 2005). Est également observé un effet du contexte olfactif sur le jugement et l'évaluation de visages neutres sur différents critères tels que l'attractivité, la valence, et l'appréciation : un visage est par exemple jugé plus négatif s'il est, ou a été, associé à une odeur négative (Dalton, Mauté, Jaén & Wilson, 2013 ; Demattè, Osterbauer & Spence, 2007 ; McGlone, et al., 2013 ; Steinberg et al., 2012 ; Todrank, Byrnes, Wrzesniewski & Rozin, 1995). Ces impacts des odeurs sur le traitement des visages ont aussi pu être étendus au traitement des expressions faciales. En ayant recours à l'odeur de transpiration collectée en situation anxiogène, de nombreuses études ont ainsi démontré une forte potentialité des odeurs corporelles de stress à moduler le traitement de visages expressifs, et ceci tout particulièrement lorsqu'il y a ambiguïté de l'expression. Ce type d'odeur a pour effet de faciliter la catégorisation des visages de valence congruente (i.e., visages de peur et de colère) (Mujica-Parodi et al., 2009 ; Rubin, Botanov, Hajcak & Mujica-Parodi, 2012 ; Zhou & Chen, 2009) et d'interférer sur le traitement des visages non-congruents (i.e., visages de joie) (Zernecke et al., 2011).

Les études ayant eu recours à des odeurs non-corporelles (i.e., odeurs alimentaires ou artificielles) sont encore peu nombreuses. Toutefois, là aussi la présence d'interactions olfacto-visuelles dans le traitement des émotions exprimées facialement a pu être retrouvée. Seubert et collaborateurs (2010) ont observé une amélioration du traitement du dégoût consécutivement à l'exposition à un odorant, et ce, qu'il soit de valence positive (i.e., vanilline) ou négative (i.e., sulfure d'hydrogène). A l'inverse, Leppänen et Hietanen (2003) ont rapporté la présence d'effets de facilitation et d'interférence en cas de congruence/incongruence entre odeur et expression (i.e., plus forte rapidité de détection de la joie lors de l'exposition à un contexte olfactif positif plutôt que négatif). Dans une étude récente menée au sein de notre laboratoire, Leleu et collaborateur (2015) ont trouvé des effets similaires : l'exposition non-consciente à une odeur positive (i.e., la fraise) permet une détection de la joie à des seuils d'expressivité plus faibles, tandis que l'exposition à une odeur aversive (i.e., l'acide butyrique) diminue les seuils de détection du dégoût et de la colère. Dans le but d'approfondir les connaissances relatives à la perméabilité du traitement des expressions faciales aux influences du contexte olfactif, nous avons mené une étude au cours de laquelle nous avons tâché de déterminer si des odeurs non-alimentaires subliminales pouvaient influer sur la détection des expressions faciales. Au cours de cette expérience, le seuil de détection des participants pour deux odorants hédoniquement contrastés (i.e., la fraise et l'acide butyrique) était déterminé dans un premier temps. Puis, dans un second temps, les

participants étaient engagés dans une tâche de détection visuelle où il leur était demandé de détecter si une cible expressive (i.e., visage exprimant la colère, le dégoût, la joie, la peur ou la tristesse) était présente au sein d'un pattern de visages. Les patterns présentés contenaient soit 6 visages inexpressifs (i.e., distracteur), soit un visage expressif parmi 5 neutres (i.e., cible). Au cours de la tâche de détection visuelle, les participants étaient exposés aux odorants à des concentrations subliminales (i.e., inférieures à leur seuil de détection) ou ils étaient en condition contrôle (i.e., pas d'odeur). La récolte des paramètres oculaires au cours de l'expérience a permis de révéler une accélération significative du traitement de la cible expressive (quelle que soit son expression) lors de l'exposition à l'odeur subliminale de fraise (Dollion, Baudouin, Durand & Schaal, soumis).

Ainsi, malgré la présence de certaines contradictions dans les résultats rapportés par ces différentes études, ces dernières s'accordent toutes sur l'influence des odeurs sur l'intégration et la perception des expressions. Notre traitement des visages et de leurs expressions ne s'opère pas de façon décontextualisée. Au contraire, il est perméable aux influences du contexte multi-sensoriel dans lequel les expressions apparaissent et au sein duquel les odeurs semblent jouer un rôle non négligeable. Toutefois, il est à soulever qu'un flou théorique reste à éclaircir concernant la dynamique cérébrale de cette interaction.

2.4. PISTES INTERPRETATIVES DES INTERACTIONS OLFACTION-TRAITEMENT EXPRESSIF

Différentes pistes interprétatives se confrontent dans l'interprétation des interactions entre olfaction et vision dans le traitement des expressions faciales. Nous nous proposons dans cette section de présenter ces différentes interprétations, ainsi que les modèles théoriques dans lesquels elles s'inscrivent.

L'une des possibilités les plus évidente, est que l'odeur déclenche une modulation de l'état émotionnel venant en retour moduler le traitement des stimuli émotionnellement chargés. En effet, l'aptitude des stimuli olfactifs à déclencher et moduler les états affectifs est largement décrite au sein de la littérature (Alaoui-Ismaïli, Vernet-Maury, Dittmar, Delhomme & Chanel, 1997 ; Herz, 2002 ; Schaal, 1988 ; Zucco, Paolini & Schaal, 2009). Ce potentiel des odeurs à moduler l'état affectif est décrit comme pouvant découler des qualités

hédoniques intrinsèques de l'odorant, ou comme résultant d'une association de l'odeur à certains stimuli ou événements au travers des expériences. De ce déclenchement d'un état affectif particulier, va résulter un biais dans le traitement des stimuli émotionnels. Cet effet a été défini en 1981 par Bower, sous l'appellation de biais de congruence émotionnelle. Dans sa description, l'auteur explique que la saillance perceptive des stimuli émotionnels sera biaisée en faveur des stimuli qui sont congruents avec l'état émotionnel courant de l'individu ; il y aura avantage dans l'engagement attentionnel vers ces derniers, dans leur détection et dans leur perception. En cas de non-congruence, le traitement du stimulus émotionnel sera cette fois-ci perturbé. Cette hypothèse est corroborée par de nombreux travaux ayant recours au paradigme d'amorçage émotionnel qui montrent la présence d'un biais perceptif et/ou attentionnel congruent avec l'état émotionnel amorcé (amorçage avec des visages : Pause, Ohrt, Prehn & Fersti, 2004 ; avec des vidéos : Chen & Dalton, 2005 ; Niedenthal, et al., 2001 ; Niedenthal , Halberstadt, Margolin & Innes-Ker, 2000 ; Schmid & Schmid Mast, 2010 ; avec de la musique : Chepenik, Cornew & Farah, 2007). Il est par exemple observé que suite à l'induction de la joie par le succès d'un pari, les participants vont engager plus facilement leur attention vers des visages exprimant la joie (Ritchie, 1986).

Le partage de substrats cérébraux entre olfaction et perception des expressions pourrait également être un facteur menant aux interactions observées. Au niveau cérébral, une association étroite entre traitement olfactif et traitement des expressions est observable, puisque les deux fonctions reposent sur des structures et circuits cérébraux communs. L'amygdale, par exemple, est alimentée par l'entrée olfactive en seulement deux synapses (Aggleton & Sanders, 2000 ; Kandel, Schwartz & Jessel, 2000 ; Richard & Orsal, 2007), et est activée à la fois par les odeurs (Royet et al., 2000 ; Savic, 2002 ; Zald & Pardo, 1997) et les expressions faciales qu'elles soient positives ou négatives (Adolphs et al., 2005 ; Breiter et al., 1996 ; Gläscher & Adolphs, 2003 ; Lidell et al., 2005 ; Morris & Dolan, 2002 ; Morris, Ohman & Dolan, 1999 ; Suslow et al, 2010). Cette convergence anatomique des deux types d'informations se retrouve au niveau d'autres structures, telles que le cortex orbito-frontal, le gyrus cingulaire antérieur et l'insula (McGlone, et al., 2013 ; Phillips & Heining, 2002 ; Royet et al., 2000 ; Seubert et al., 2010 ; Sobel et al., 1999 ; Steinberg et al., 2011 ; Wicker et al, 2003). Il est donc tout à fait probable que la présence d'odeur au sein du contexte pré-active ces structures, ce qui faciliterait par la suite le traitement de visages expressifs congruents. Cette vision selon laquelle l'implication de structures communes pour différentes sensorialités mènerait à des phénomènes de pré-activation, et donc de facilitation/interférence,

peut notamment se retrouver dans différents modèles de cognition située/incarnée (e.g., Barsalou, 2008 ; Versace et al., 2014). Cette formulation théorique est supportée par des études qui rapportent une activation des aires visuelles lors de la dénomination et de la reconnaissance d'odeurs (Qureshy et al., 2000) ou qui observent que la stimulation de ces aires en rTMS activatrice facilite la discrimination entre odorants (Jadauji, Djordjevic, Lundström & Pack, 2012).

Les odeurs ont aussi un fort potentiel à déclencher des réactions faciales : des expressions distinctes sont déclenchées par des odeurs hédoniquement contrastées (Alaoui-Ismaïli, et al., 1997 ; de Groot, Smeets, Kaldewaij, Duijndam & Semin, 2012), et ce, dès le premier jour de vie (Soussignan, Schaal, Marlier & Jiang, 1997 ; Steiner 1979). Comme mentionné dans la section sur l'accès à la signification des expressions (**Chapitre 1 section 1.3.2.**), les théories de l'*embodied cognition* supposent que l'incarnation – et donc la reprise sur son propre visage - de l'expression, fasse partie intégrante du traitement et de la perception des expressions faciales (Gallese, 2007, Niedenthal, 2007 ; Niedenthal, et al., 2005 ; Niedenthal, et al., 2010). Les études s'encrant dans ce courant théorique ont notamment insisté sur l'importance de cette simulation en démontrant que le blocage du mimétisme d'une expression interfère sur sa reconnaissance (Niedenthal, 2007 ; Oberman, Winkielman & Vilayanur, 2007 ; Ponari, et al., 2012). Ainsi, en accord avec les principes de l'*embodied cognition*, il est plausible que lorsqu'une odeur est présente, celle-ci déclenche une réaction faciale, venant en retour faciliter le traitement de l'expression d'autrui lorsque celle-ci implique les mêmes unités d'actions que celles impliquées dans la réaction faciale à l'odeur, et interfère sur la reconnaissance d'autres expressions. Il est à préciser que l'*embodied cognition* n'est pas le seul courant théorique à faire l'hypothèse d'une contribution de l'expression faciale dans le traitement émotionnel. En effet, différentes théories avancent que le feedback facial ferait partie intégrante du traitement des expressions (e.g., Goldman & Sripada, 2005), tandis que d'autres avancent que le feedback facial modulerait l'expérience subjective, et par voie de fait l'évaluation émotionnelle (e.g., Adelamnn & Zajonc, 1989 ; Kraut, 1982 ; Laird, 1974). Dans tous les cas, à la lueur de l'ensemble de ces théories, les modulations des capacités de traitement des expressions pourraient s'expliquer par la présence d'une réaction faciale à ces dernières.

Enfin, dans les théories de l'*appraisal*, il est considéré que l'évaluation de tout stimulus émotionnel ne repose pas simplement sur le traitement de ce dernier et la perception de ses qualités intrinsèques ; elle résulterait également du traitement de l'ensemble du

contexte et de l'évaluation de la pertinence pour soi du stimulus dans la situation courante (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.**) (Ellsworth & Scherer, 2003 ; Smith, 1989). Des évidences en faveur de cette hypothèse sont fournies par les études qui démontrent des effets du contexte et de l'expression sur l'engagement attentionnel et le temps de traitement (Bayliss, et al., 2010 ; Kret, et al., 2013). Ainsi, selon les modèles de l'*appraisal*, les interactions entre olfaction et traitement des expressions seraient liées au fait que, selon les informations présentes au niveau olfactif, la pertinence pour soi d'une expression ne serait pas la même, et donc son traitement et sa perception seraient différents.

Il ressort de cette présentation des différentes interprétations et modèles permettant de rendre compte des interactions olfacto-visuelles dans le traitement des expressions faciales, que des mécanismes très divers pourraient être à l'origine de ce phénomène : réaction émotionnelle à l'odeur, réaction faciale à l'odeur, modulation de la pertinence. Dans tous les cas, malgré les divergences entre ces modèles et des débats théoriques à l'heure actuelle toujours vifs, tous permettent de prédire et d'expliquer l'impact du contexte olfactif sur le traitement expressif.

2.5. LE TRAITEMENT MULTI-SENSORIEL DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ LE NOURRISSON

2.5.1. La multi-sensorialité, base de traitement et d'apprentissage des expressions

D'un point de vue développemental, l'aptitude précoce de l'enfant à percevoir/encoder les objets/événements de façon multi-sensorielle et la prépondérance de ce type d'informations dans l'univers perceptif de l'enfant, amène logiquement à assumer que l'enfant perçoive et encode les visages de la même façon. Au travers de ses expériences, le nourrisson intégrerait et apprendrait les différentes clés contextuelles liées à l'émission des différents signaux faciaux, et ce, au travers de l'ensemble de ses sens. Ainsi, d'après cette hypothèse, le nourrisson serait apte à percevoir le contexte multi-sensoriel lié à l'occurrence des différentes expressions faciales, et ce dernier serait intégré au sein des représentations et des apprentissages sur les expressions. Cette vision est notamment partagée par Flom et Bahrick (2007) qui avancent que les informations amodales, telles que les affects, seraient

détectées et perçues de façon multimodale (i.e., synchronie de variations au travers de différents sens) avant de pouvoir être perçues efficacement de façon unimodale (Barhick, 1994). Selon eux, la redondance inter-sensorielle promouvrait initialement la discrimination des affects, grâce à une promotion de l'engagement attentionnel vers les éléments amodaux redondants entre les sens. Par la suite, grâce aux apprentissages intégrant ces redondances, et à l'acquisition d'une expertise de traitement des expressions, le nourrisson pourrait se reposer sur l'information relayée par un seul sens dans sa perception des affects (Flom & Barhick, 2007). Cette vision théorique trouve écho auprès d'autres auteurs tels que Lewkowicz (Lewkowicz, 2010 ; Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012 ; Lewkowicz, Minar, Tift & Brandon, 2015 ; Lewkowicz & Röder, 2012), Walker-Andrews & Lennon (1991) et Caron, Caron et Maclean (1988), qui eux aussi font l'hypothèse d'une prépondérance et d'une précocité du traitement multi-sensoriel dans l'extraction des signaux faciaux et en apportent des évidences dans leurs études. Enfin, l'hypothèse selon laquelle les jeunes nourrissons traiteraient les éléments faciaux sur la base des informations multimodales avant de pouvoir faire de même sur la base d'une information unimodale, est non-seulement supportée par les travaux de Flom et Barhick (2007) sur la discrimination des expressions émotionnelles en bi- et unimodal chez les enfants de 3 à 7 mois ; mais aussi au travers des travaux de Lewkowikz. Dans ses travaux, ce dernier montre une augmentation progressive de l'exploration visuelle d'une zone de concordance inter-sensorielle lors de l'audition de sons langagiers (i.e., la bouche) jusqu'à 8 mois, suivie par la suite d'une diminution de l'intérêt pour cette de zone de redondance avec l'acquisition progressive d'une expertise dans le traitement des sons de la langue natale (Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012). En d'autres termes, la revue de ces différents éléments théoriques mène à la conclusion que les signaux et expressions faciales sont plus saillants, mieux perçus et mieux encodés par le jeune nourrisson lorsqu'ils sont intégrés au travers de différents sens plutôt qu'uniquement au travers de la vision. Ainsi, la multi-sensorialité des expressions faciales et de leur contexte d'apparition joueraient un rôle proéminant dans la perception et les apprentissages sur les expressions, et, par conséquent, dans le développement d'une expertise de traitement.

Différentes études attestent de la présence d'une aptitude précoce des nourrissons à venir intégrer les différentes clés contextuelles présentes lors de l'occurrence des expressions faciales dans leur traitement de ces dernières. Le regard figure parmi les éléments contextuels ayant été spécifiquement étudiés concernant leur impact sur le traitement des expressions faciales. Il a pu être démontré au cours d'études en électroencéphalographie que ce dernier

module les réponses cérébrales aux expressions chez le jeune nourrisson de 7 mois et moins (Hoehl, et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2008, 2010b, 2010c ; Rigato, et al., 2009), tandis que des études sur la référenciation sociale ont pu avérer son impact sur le plan comportemental durant la seconde moitié de la première année (Doi, Kagawa & Shinohara, 2010 ;Feinman & Lewis, 1983 ; Hernstein & Campos, 2004 ; Klinnert, 1984 ; Matsunaka & Hiraki, 2014 ; Stenberg, 2003 ; Striano, Vaish & Benigno, 2006). Un autre élément contextuel dont l'importance dans le traitement du visage et des expressions a largement été étudiée est la voix. Différents types d'interactions audio-visuelles dans le traitement des visages ont ainsi pu être observés chez le nourrisson. Il est par exemple démontré que dès la première moitié de la première année, les enfants sont capables de faire correspondre une syllabe entendue avec l'image d'une personne prononçant cette dernière (Paterson & Werker, 2003 ; Pons, Lewkowicz, Soto-Faraco & Sebastian-Gallés, 2009). Il en va de même pour le traitement de la parole et des sons (Lewkowicz, Leo & Simion, 2010 ; Lewkowicz, Minar, Tift & Brnadon, 2015 ; Pons, et al., 2009). Concernant de façon plus spécifique le traitement des visages expressifs, là aussi une apparition progressive d'une aptitude à détecter les équivalences entre l'émotion vue et celle entendue est rapportée chez les nourrissons de 4-7 mois (Vaillant-Molina, Barhick & Flom, 2013 ; Walker, 1982 ; Walker-Andrews, 1986, 1988, 1997). Dans ces expériences, les enfants sont simultanément exposés à deux vidéos d'un visage exprimant des expressions différentes et à la bande son d'une des deux vidéos. Les résultats montrent que les enfants de 5 et 7 mois explorent significativement plus longtemps le visage exprimant l'émotion entendue, et ce, pour différentes expressions (i.e., colère, joie, neutralité et tristesse) ; tandis que cette aptitude se limite à la joie chez les enfants de 4 mois et est absente chez ceux de 2 mois. Ces études attestent ainsi de la présence d'une perception et d'une intégration multi-sensorielles des expressions faciales chez le nourrisson, leur permettant par la suite de progressivement effectuer une mise en correspondance audio-visuelle des expressions émotionnelles. Ces interactions inter-sensorielles dans la perception des signaux expressifs émaneraient d'une mise en place progressive de représentations intégrant les informations des différentes sensorialités lors des expériences quotidiennes de l'enfant avec les différentes expressions faciales et donc de l'apprentissage du lien les unifiant.

De plus, différentes études confirment l'hypothèse d'un effet super-additif de la multi-sensorialité dans le traitement expressif, en démontrant la présence de meilleures capacités de discrimination des expressions en cas de bimodalité chez le nourrisson (Caron, Caron & MacLean, 1988 ; Walker-Andrews & Lennon, 1991) ; mais aussi au travers des travaux

démontrant que la capacité à discriminer les expressions en présentation bimodale est antérieure à celle observée en présentation unimodale (Flom & Barhick, 2007). Les éléments contextuels multi-sensoriels concomitants à l'expression des émotions participent donc fortement au traitement, à la perception et à l'apprentissage de celles-ci. Il apparaît aussi que ceux-ci sont liés/intégrés/ancrés aux seins des représentations sur les expressions élaborées progressivement par le nourrisson.

2.5.2. Rôle potentiel de l'olfaction dans le traitement et l'apprentissage des expressions

En considérant la revue des études sur le traitement multi-sensoriel chez le nourrisson présentée dans la section précédente (**Chapitre 2 section 2.5.1.**), il est aisé de constater que, sauf rares exceptions, la majorité des études qui se sont penchées sur la question du traitement multi-sensoriel des expressions faciales chez le nourrisson se sont cantonnées à l'étude de cette question au travers des interactions audio-visuelles. Toutefois, il est évident que le contexte d'occurrence des différentes expressions faciales ne se limite pas aux variations sonores/acoustiques (i.e., variations vocales de l'émetteur dans son intonation, sa prosodie, etc.). En effet, l'apparition de ces variations sur le visage de l'émetteur peut être liée à des variations plus globales du contexte, impliquant les différents sens. Elles sont ancrées dans un contexte qui est par essence multi-sensoriel. Un émetteur affichera par exemple une expression de dégoût en réaction au goût d'un aliment à l'amertume prononcée, à l'audition de bruits corporels, à la vue d'un plat peu appétissant, à l'odeur de fèces ou au toucher d'une texture visqueuse. Au cours de la première année, la perception et l'intégration des expressions faciales et de leur contexte multi-sensoriel peut constituer une pierre angulaire du développement socio-émotionnel. En effet, selon différents auteurs, tels que Bahrick (1994 ; Barhick & Lickliter, 2002 ; Flom & Barhick, 2007), Lewkowikz (2010 ; Lewkowicz & Hansen-Tift, 2011 ; Lewkowicz, Minar, Tift & Brandon, 2015 ; Lewkowicz & Röder, 2012), et Walker-Andrews et Lennon (1991), l'intégration multi-sensorielle des mouvements et expressions du visage reposerait dans un premier temps sur l'habileté de l'enfant à pouvoir intégrer les informations relayées par le visage de façon multi-sensorielle, avant qu'un traitement unimodal de l'information puisse être effectué. Ce rôle de la multi-sensorialité serait promu à la fois du fait de l'aptitude de l'enfant à percevoir, intégrer et unifier les informations relayées par les différents sens, mais aussi par la plus forte

prépondérance/saillance des redondances inter-sensorielles, y compris dans le traitement des expressions (pour plus de détails sur la question voir **Chapitre 2 section 2.1.**). Dans sa vie quotidienne, le nourrisson pourra ainsi intégrer et unifier les variations des expressions faciales de son entourage avec les variations du contexte relayées par les différents sens (e.g., variations d'expressions du parent au cours du changement de couche ou de l'introduction d'un nouvel aliment). Il y aurait donc une élaboration progressive de représentations multi-sensorielles intégrant les expressions faciales et le contexte dans lequel elles sont ancrées, au fur et à mesure du développement et des expériences du nourrisson. *In fine,* cette considération et intégration du contexte multi-sensoriel d'apparition des expressions pourraient mener, au travers des expériences répétées du nourrisson, à l'établissement d'apprentissages et de liaisons avec les différents contextes d'occurrence des expressions, permettant progressivement à l'enfant de leur attribuer une valeur signalétique. Au vu de ces différents éléments, il se révèle essentiel d'étendre les études sur le traitement multi-sensoriel des expressions faciales et leur dynamique développementale à d'autres modalités.

Parmi les différents sens, l'odorat constitue une sensorialité jouant un rôle proéminant dans l'écologie du jeune nourrisson. En effet, d'un point de vue maturationnel l'olfaction est l'un des premiers sens fonctionnellement viable, bien avant la vision et l'audition. Le système olfactif serait morphologiquement similaire à celui de l'adulte dès 11 semaines de gestation, et le foetus présente une réactivité aux odeurs dès 28 semaines d'âge gestationnel (Schaal, 2012 ; Schaal & Durand, 2012). Cette primauté de l'olfaction permet à l'enfant d'effectuer des apprentissages sur son environnement olfactif dès la vie in-utero grâce au traitement et à la perception des différents composés olfactifs présents dans le milieu amniotique (Marlier, Schaal & Soussignan, 1998 ; Schaal, et al., 2009 ; Schaal & Durand, 2012 ; Schaal, Marlier & Soussignan, 2000). Par exemple, des nourrissons dont la mère a consommé des aliments anisés au cours de la gestation montrent moins de mimiques aversives et plus de comportements d'orientation en réponse à l'odeur d'anis dans les premières heures et jours de vie que ceux qui n'y ont pas été exposés (Schaal, Marlier & Soussignan., 2000). Une fois la naissance et le passage en milieu aérien, le nouveau-né présente une forte sensibilité aux odeurs (corporelles et non-corporelles), ainsi que des capacités fines de discrimination et d'apprentissage de ces dernières (Schaal, 1988). De plus, l'olfaction joue un rôle clé dans la survie et l'écologie du nouveau-né, puisqu'elle sert de support majeur à l'établissement du lien à la mère et à l'alimentation. Concernant ce dernier point, de nombreux travaux rapportent une forte sensibilité de l'enfant aux différentes clés olfactives liées au sein

maternel (e.g., sécrétions auréolaires, colostrum et lait). Cette sensibilité est attestée au travers des différentes modulations observées sur de nombreux paramètres comportementaux de l'enfant tels que l'ouverture des yeux, leur état d'éveil/activité, la respiration, le comportement d'orientation et le comportement de succion (Doucet, Soussignan, Sagot & Schaal, 2006, 2009, 2012 ; Marlier, Schaal & Soussignan, 1998 ; Schaal, Doucet, Herlting, Sagot & Soussignan, 2006). Toujours en lien avec le sein maternel et l'alimentation, il a pu être démontré que les nourrissons sont capables d'intégrer les variations de composition du lait, mais aussi les variations de l'environnement olfactif présents au niveau du sein maternel lors de la tétée : les enfants dont les mères appliquent un baume à la camomille sur leurs seins manifestent une forte attraction pour l'odeur seule de camomille par la suite ; contrairement aux enfants de mère n'en appliquant pas (Delaunay-El Allam, Marlier & Schaal, 2006 ; Delaunay-El Allam, Soussignan, Patris, Marlier & Schaal, 2010 ; Marlier, et al., 1998). L'aptitude du nourrisson à effectuer des intégrations et des apprentissages multi-sensoriels impliquant l'olfaction ne se limite pas uniquement au sein maternel mais s'étend à d'autres objets et événements. On peut trouver des évidences d'interactions olfacto-visuelles tout au long des premiers mois de vie (Rubin, Fagen & Carroll, 1998 ; Sullivan et al., 1991 ; Wada et al., 2012). En tâche de préférence visuelle, par exemple, les nourrissons de 4 mois engagent plus leur attention vers l'objet précédemment apparié à l'odeur de cerise lorsqu'ils sont exposés en phase test à cette même odeur (Fernandez & Barhick, 1994). Ainsi, l'olfaction est un sens prédominant dans l'écologie du nourrisson, et ces derniers disposent d'une aptitude précoce à percevoir et encoder les liens olfacto-visuels présents simultanément et de façon redondante dans leurs expériences quotidiennes. En résulterait par la suite des interactions intermodales se retrouvant au niveau perceptif, mnésique et comportemental.

Du fait de cette importance de l'olfaction dans l'univers sensoriel du nourrisson, mais aussi de l'aptitude précoce de l'enfant à percevoir, encoder et lier de façon multi-sensorielle les informations olfactives, l'olfaction se révèle être une sensorialité d'intérêt pour l'étude des impacts du contexte multi-sensoriel dans le traitement des expressions faciales chez le nourrisson. Un argument crucial venant s'additionner à ceux précédemment évoqués dans la justification de l'intérêt pour l'olfaction, est la présence d'un lien étroit entre olfaction et expressions faciales. En effet, les odeurs sont des modulateurs d'état émotionnel et de fort déclencheurs d'expressions faciales (Alaoui-Ismaïli, et al., 1997 ; Herz, 2002 ; Zucco, et al., 2009), et ce, dès la naissance (Schaal, 2012 ; Soussignan & Schaal, 2001 ; Soussignan, Schaal & Marlier, 1999 ; Steiner, 1979). Ces expressions sont le reflet d'une réaction au caractère

hédonique de l'odorant. Dans leurs études sur les nouveau-nés, Soussignan et collaborateurs rapportent par exemple la présence d'une plus forte occurrence de mimiques faciales négatives en réponse à un odorant aversif tel que l'acide butyrique (Soussignan, et al., 1997). Ces réactions du nouveau-né aux odeurs peuvent être aussi bien innées que acquises : elles peuvent correspondre à une réaction de l'enfant au caractère hédonique intrinsèque de l'odeur, ou peuvent être liées à l'apprentissage/familiarisation étant donné les multiples occasions d'exposition aux odorants durant les périodes anté- et post-natales (Schaal, 1997). Ces éléments s'additionnent à ceux de la littérature adulte démontrant une association étroite entre olfaction, émotion et expression tant au niveau cérébral que cognitif et comportemental, qui s'observe que l'odeur soit ou non perçue de manière consciente (voir **Chapitre 2 section 2.3.**).

Il apparaît ainsi que l'olfaction est un sens bien représenté dans l'univers perceptif du jeune nourrisson, et que ces derniers manifestent non seulement des réactions émotionnelles et faciales aux odeurs, mais également qu'ils sont capables de les intégrer au sein de représentations et d'apprentissages multi-sensoriels. Il est donc hautement probable que les odeurs puissent, tout comme les informations émanant des autres sensorialités, être intégrées au sein de représentations multi-sensorielles unifiant odeurs et expressions faciales. Ces dernières s'établiraient au travers des expériences répétées de l'enfant avec les expressions et la présence de modulations de l'environnement olfactif pouvant leurs être contingentes. Par conséquent, au travers de ses expériences, le nourrisson intégrerait/apprendrait le lien unifiant expression faciale et valence des odeurs. L'olfaction se présente ainsi comme un sens pouvant être de prime intérêt dans l'investigation du traitement multi-sensoriel des expressions faciales chez le nourrisson, mais aussi comme pouvant être un acteur primordial du développement des capacités de traitement des expressions et, plus largement, du développement socio-émotionnel. A l'heure actuelle, les recherches sur le sujet sont extrêmement rares. Il a toutefois pu être observé que les odeurs impactent significativement le traitement des visages. Par exemple, en paradigme de préférence visuelle, il est observé que les nourrissons de 4 mois à qui l'on présente en concurrence des visages de femmes non-familières et des voitures, ont une préférence pour le visage qui est accentuée lorsqu'ils sont simultanément exposés à l'odeur de leur mère (i.e., t-shirt porté par la mère pendant plusieurs nuits). Il est également observé que cet accroissement de l'intérêt pour le visage est lié spécifiquement à une augmentation du temps d'exploration de la zone des yeux (Durand, Baudouin, Lewkowicz, Goubet & Schaal, 2013). Dans leur étude s'intéressant plus

spécifiquement à l'impact du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales chez le jeune enfant, Godard et collaborateurs (sous presse) ont exposé des enfants de 3, 5 et 7 mois à des contextes olfactifs hédoniquement contrastés (i.e., plaisant/fraise, déplaisant/acide butyrique, neutre/pas d'odeur) pendant que deux visages aux expressions elles aussi contrastées (i.e., présentation côte à côte de deux visages dynamiques l'un exprimant le dégoût et l'autre la joie) leurs étaient présentés. Ils ont observé que dès 3 mois, les nourrissons regardaient significativement plus l'expression qui congrue avec l'odeur sentie, mettant ainsi en avant une habileté du nourrisson à lier les informations olfactives et les expressions, et à les mettre en correspondance sur la base de leur contenu émotionnel/affectif. Toutefois, ces effets du contexte olfactif n'étaient pas observés chez les nourrissons plus âgés. En effet, il était observé qu'à 5 mois les enfants exploraient plus longuement l'expression de dégoût quel que soit le contexte olfactif auquel ils étaient exposés. A 7 mois, les enfants n'exploraient pas une expression plus que l'autre, et là aussi le contexte olfactif n'avait aucune influence. Les résultats sur les enfants de 5 mois sont notamment interprétés comme indicateurs d'une forte sensibilité à l'expression de dégoût chez les enfants à cet âge (puisqu'observé même en l'absence d'odeur), qui semble venir supplanter les effets du contexte olfactif. Cette sensibilité au dégoût est avancée comme pouvant être liée au fait qu'à cet âge les enfants sont au début de la diversification alimentaire (i.e., introduction des aliments solides et donc exposition à toute une gamme de nouveaux stimuli potentiellement déclencheurs de cette expression). Pour les 7 mois, les résultats sont vus comme pouvant être liés à une question de correspondance *versus* rupture avec les attentes déclenchées par l'odeur : les enfants vont regarder l'expression qui coïncide avec l'odeur sentie puisqu'il y a correspondance avec les attentes, mais ils vont également explorer l'autre expression puisqu'elle rompt avec les attentes suscitées par l'odeur. Il semble donc que bien qu'adapté pour les nourrissons de 3 mois, le paradigme de préférence visuel ne soit pas un paradigme suffisamment sensible pour l'investigation d'une mise en correspondance affective entre expression faciale et contexte olfactif chez les nourrissons plus âgés.

A la lueur de ces différents éléments il apparaît que l'olfaction affecte le traitement visuel des visages, et que des interactions olfaction-vision sont présentes dans le traitement expressif aussi bien chez l'adulte que chez le nourrisson. Le contexte olfactif influe donc sur le traitement des expressions faciales, et pourrait contribuer de façon importante à l'émergence de ces capacités au cours de la première année. Ainsi, en plus de lever certaines ambiguïtés relatives à l'ontogenèse des capacités de traitement des expressions faciales au

cours de la première année ; le second objectif des travaux présentés dans cette thèse est d'apporter de plus amples précisions sur ces interactions, en venant étudier, dans un premier temps, si des interactions entre contexte olfactif et traitement des expressions faciales peuvent être observées chez les nourrissons plus âgés. Pour cela, nous tâcherons de déterminer si, comme le suggèrent Godard et collaborateurs, les enfants de 7 mois manifestent bien une attente de réaction spécifique sur le visage d'autrui sur la base du contexte olfactif auquel ils sont exposés. Nous préciserons dans un second temps la nature et le décours temporel des interactions olfacto-visuelles dans le traitement expressif observées chez l'adulte et le nourrisson. Pour cela, nous étudierons les impacts du contexte olfactif sur les réactions cérébrales aux expressions faciales chez l'adulte, et aux visages chez le nourrisson de 3 mois.

Chapitre 3 :
Stratégie d'exploration visuelle et réactions faciales aux expressions émotionnelles chez les enfants de 3, 7 et 12 mois (Expérience 1)

L'étude présentée dans ce chapitre a donné lieu à la rédaction de deux articles actuellement soumis :

- Dollion, N., Soussignan, R., Durand, K., Schaal, B., & Baudouin, J.-Y. (soumis). When do babies become emotional screeners? Visual exploration of emotional facial expressions in 3, 7 and 12 month-old infants. *Journal of Experimental Child Psychology*
- Soussignan, R., Dollion, N., Schaal, B., Durand, K., Reissland, N., & Baudouin, J.-Y. (soumis). Do 3-12 months old infants mimic facial expressions? A study of emotional development using eye movement tracking and fine grained coding of facial expressions. *Developmental Psychology*

Ainsi, ce chapitre reprend en partie ces articles, certaines parties consistant en une traduction de ceux-ci. Ces articles sont disponibles, respectivement, en annexes 1 et 2.

3.1. INTRODUCTION

La première année de vie constitue une période cruciale du développement socio-émotionnel de l'enfant. Nous avons pu voir, au cours du premier chapitre, que les jeunes enfants vont passer au travers de 3 étapes clés dans le développement de leurs capacités de traitement des visages : à 3 mois ils sont capables de discriminer certaines expressions (notamment les visages de joie vis-à-vis des visages renfrognés). A l'approche du 7éme mois, ils sont capables de discriminer les expressions négatives, commencent à catégoriser certaines expressions et les premiers signes de référenciation sociale sont observés ; à 12 mois ils reconnaissent les différentes expressions faciales et adaptent leurs comportements selon leur signification.

Bien que le développement des capacités de discrimination et de catégorisation des expressions au cours de la première année ait été largement étudié, deux questions restent encore à clarifier : 1) qu'elles sont les stratégies visuelles d'exploration des expressions auxquelles les enfants ont recours, et plus particulièrement, sur quels éléments faciaux se focalisent-ils dans leur traitement des expressions ? (2) A quoi correspondent les réponses

faciales des nourrissons aux expressions ? Correspondent-elles à une reproduction des mouvements faciaux observés sur le visage d'autrui, à une reproduction de l'émotion perçue ou encore à une réaction émotionnelle au signal communiqué par l'expression ? De plus, concernant toujours ces deux questions, la trajectoire développementale au cours de la première année reste encore à clarifier.

Dans le but de lever l'ambiguïté relative à l'ontogenèse des capacités du nourrisson à traiter les expressions faciales, à la fois concernant leurs stratégies visuelles d'explorations des expressions (i.e., les zones et éléments du visage spécifiquement explorés), mais aussi concernant leurs réactions faciales aux expressions et l'accès à leur signification, nous avons créé une expérience permettant d'étudier simultanément ces différents points. Durant cette expérience, des avatars dynamiques exprimant 6 émotions de base (i.e., la colère, le dégoût, la joie, la peur, la tristesse et la neutralité) étaient présentés à des enfants de 3, 7 et 12 mois, tandis que leurs mouvements oculaires et leurs réactions faciales étaient enregistrés. Nous avons décidé de focaliser notre étude sur ces trois âges étant donné qu'ils reflètent des étapes clés dans le développement des capacités de traitement des expressions faciales. Le recours à des avatars dynamiques se justifie à la fois parce qu'ils constituent des stimuli plus réalistes et attractifs pour le jeune enfant que des photographies du fait de leur mouvement, mais aussi du fait qu'ils permettent un contrôle précis de la cinématique et de l'intensité des mouvements faciaux ; ce qui ne pourrait être garanti par le recours à un émetteur réel.

De plus, étant donné les impacts significatifs de la direction du regard de celui qui exprime une expression sur le traitement et l'évaluation de son expression, ainsi que sur les réactions faciales aux expressions à l'âge à adulte, d'une part, et la sensibilité précoce des jeunes enfants à l'orientation du regard (seul ou en interaction avec l'expression), d'autre part, nous avons également manipulé l'orientation du regard des avatars expressifs au cours de notre expérience. Le but était ici de déterminer si, comme supposé dans les théories de *l'appraisal*, les enfants évaluent différemment, ou non, la pertinence pour soi des expressions faciales selon les clés contextuelles (ici le regard).

Un matériel et un protocole identique ont été utilisés au trois âges, afin de pouvoir comparer les enfants de 3, 7 et 12 mois, et ainsi d'étudier l'ontogenèse des capacités de traitement et des réactions faciales aux expressions émotionnelles. Sur la base de la littérature antérieure sur le développement des capacités de traitement des expressions faciales au long de la première année (voir **Chapitre 1 sections 1.2.1., 1.2.2. et 1.2.3.**), nous avons formulé

l'hypothèse qu'entre les différents âges considérés (chacun représentant une phase clé dans le développement des capacités socio-émotionnelles) devrait s'observer un affinement des stratégies d'exploration visuelle des expressions, ainsi qu'une complexification progressive des réactions faciales des nourrissons aux émotions exprimées par les visages.

3.2. METHODE

3.1.1. Participants

Les familles étaient recrutées au moyen d'un courrier postal suivi d'un appel téléphonique. Au cours de cet appel, les parents étaient informés des buts et de la procédure de l'expérience. Une description complète du matériel expérimental et de la procédure leur étaient fournie une fois sur place, juste avant l'expérience, dans le laboratoire d'étude sur l'enfant du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation. Un ensemble total de 243 enfants a ainsi participé à cette étude, au sein duquel trois groupes d'âge différents ont été considérés : 3 mois (n = 96), 7 mois (n = 76) et 12 mois (n = 71).

Pour l'analyse des paramètres oculométriques, seuls les enfants demeurant calmes et paisibles durant l'expérience, et dont le regard était détecté pendant au moins 30% du temps de la session expérimentale étaient considérés. Ainsi, sur le groupe total, 82 enfants ont été exclus de l'analyse pour l'une des raisons suivantes : né prématuré (n=2), énervement/agitation au cours de l'expérience (n=13), inattention trop élevée pendant l'expérience (n=4), régurgitation (n=1) ou pour cause de complications techniques avec le système de poursuite de mouvements oculaires [difficultés à capter (n=26) ou à calibrer le regard (n=33), ou perte trop importante du regard par le système durant l'expérience (n=3)]. Un échantillon final de 161 enfants fut ainsi retenu, comprenant 36 nourrissons de 3 mois (âge : *M* = 92,3 jours, SD = 2,96 ; 24 filles / 12 garçons), 66 enfants de 7 mois (âge : *M* = 214,8 jours, SD = 2,96 ; 32 filles et 34 garçons) et 59 enfants de 12 mois (âge : *M* = 365,8 jours, SD = 3,01 ; 27 filles et 32 garçons).

Concernant l'analyse des réactions faciales du nourrisson, 139 enfants furent écartés. Les causes de rejet étaient les suivantes : l'enfant s'est agité durant l'expérience (n=24), était né prématuré (n=2), a pleuré (n=42) ou était trop inattentif (n=36) ; ou encore du fait de complications techniques liées à l'enregistrement vidéo (n=24) ou d'autres types de

problèmes (l'enfant met sa main dans sa bouche ou régurgite, le parent a parlé en cours de session, bruit à l'extérieur de la pièce) (n= 11). Ainsi, pour l'analyse des réactions faciales des nourrissons aux expressions, un échantillon final de 104 enfants fut considéré, comprenant 36 enfants de 3 mois (âge : *M* = 92,3 jours, SD = 3,07 ; 18 filles et 18 garçons), 35 enfants de 7 mois (âge : *M* = 214,7 jours, SD = 3,19 ; 18 filles et 17 garçons) et 33 enfants de 12 mois (âge : *M* = 365,2 jours, SD = 2,90 ; 17 filles et 16 garçons).

Tous les enfants retenus pour cette étude avaient un poids de naissance supérieur à 2150 g, un score d'Apgar à 1 et 5 min supérieur à 6 et étaient en bonne santé au moment de l'expérience. Pour tous ces enfants, les parents n'ont rapporté aucun antécédent de problème neurologique ou de pathologie développementale.

L'ensemble des parents ont fourni leur accord écrit pour la participation de leur enfant à l'étude. L'un des parents, ou les deux, étai(en)t présent(s) pendant l'expérience, et pouvai(en)t interrompre celle-ci à tout moment si leur enfant s'agitait/pleurait et ne parvenait à se calmer. L'ensemble des tests a été effectué en accord avec la Déclaration de Helsinki pour l'expérimentation sur participants humains (*Bristich Medical Journal*, 1991 ; 302 : 1194).

3.2.1. Matériel et méthode

A. Stimuli

Nous avons utilisé des clips vidéo représentant les visages virtuels de 2 avatars tridimensionnels (un homme et une femme) exprimant cinq expressions de base (la colère, le dégoût, la joie, la peur, la tristesse) et une expression neutre, avec un regard direct ou évitant (i.e., 15° vers la gauche ou vers la droite). Ces visages dynamiques ont été créés au moyen du logiciel Poser 9 (Smith Micro Software, Watsonville, CA, USA). Chaque clip vidéo débutait avec l'avatar posant une expression neutre. Puis, lorsqu'il était expressif, l'avatar venait progressivement atteindre un pic d'expressivité (apex) en 500 ms et restait à cette expressivité maximale durant les 1500 ms qui suivaient. Le regard de l'avatar (aussi bien direct qu'évitant) demeurait, quant à lui, fixe sur toute la durée de la séquence. Concernant le clip dans lequel l'avatar était neutre, l'avatar restait inexpressif pendant toute la durée de la séquence de 2 secondes. Chacun de ces clips de 2 secondes était monté en une séquence de 6 secondes au sein de laquelle la même expression était répétée 3 fois consécutives. 36 séquences de 6

secondes ont ainsi été créées dans le but de contrebalancer toutes les conditions : 2 avatars (homme / femme) × 3 orientations de regard (direct / gauche / droite) × 6 expressions (colère / dégoût / joie / peur / tristesse / neutre).

Les différentes expressions faciales ont été obtenues par manipulation de différents groupes de polygones sur une structure tridimensionnelle représentant la structure faciale du visage de l'avatar. Ces différents groupes de polygones étaient comparables aux différentes Unités d'Actions (AUs) décrites dans le FACS (Ekman & Friesen, 1978 ; Ekman, Friesen & Hager, 2002), permettant ainsi la création des différentes expressions par déplacement de ces différents groupes de polygones. La manipulation de ces groupes de polygones correspondant aux AUs prototypiques des différentes expressions a été effectuée par un codeur FACS certifié (Robert Soussignan). Les AUs manipulées pour l'obtention de chaque expression prototypique sont les suivantes : AUs 4+24 pour la colère, AU 9 pour le dégoût, AUs 6+12+25 pour la joie, AUs 1+2+4+5+20 pour la peur et AUs 1+4+15 pour la tristesse. Les modifications d'orientation du regard, pour le regard évitant, étaient quant à elles effectuées par déviation angulaire de la structure de l'iris en utilisant un déplacement computationnel de 15° vers la gauche/droite, par rapport à l'axe relatif de la tête. Les clips vidéo générés étaient enfin montés sur un fond noir. Leur résolution était de 488 × 500 pixels, ce qui correspondait à une taille de 28,9 cm de largeur sur 29,6 cm de longueur une fois sur écran.

La validité de ces stimuli était garantie non seulement par le fait que la manipulation des AUs a été effectuée en accord avec la description des expressions prototypiques du FACS (Ekman & Friesen, 1978), mais aussi grâce à un prétest sur un panel adulte révélant que les 3 orientations de regard et les 6 expressions étaient correctement détectées/décodées (voir Soussignan et al., 2013).

B. Appareillage et enregistrement comportemental

Les séquences vidéo étaient présentées sur un écran de 22 pouces, d'une résolution de 1680 × 1050 pixels. La présentation des stimuli était gérée par le logiciel ExperimentCenter (version 3.4, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne), conçu pour le système de poursuite de mouvements oculaires SMI (RED250, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne) qui était fixé sous l'écran de présentation. Pendant l'expérience, l'enregistrement bidimensionnel des paramètres oculométriques sur chaque œil du nourrisson était effectué par

le logiciel iViewX (version 2.4, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne) avec une fréquence d'enregistrement à 250 Hz. Enfin, les données sur les mouvements oculaires étaient analysées après expérience sur les deux yeux des nourrissons avec le logiciel BeGaze (version 3.4, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne).

Concernant les réactions faciales des nourrissons, une caméra (Handycam, Sony) placée au-dessus de l'écran permettait de filmer et d'enregistrer le visage de l'enfant tout au long de la session expérimentale. Ces enregistrements vidéo étaient effectués dans le but d'être par la suite analysés par codage des réponses faciales du nourrisson aux différentes expressions arborées par l'avatar au moyen du BabyFACS.

3.2.2. Procédure

C. Dispositif expérimental

L'expérience avait lieu dans le laboratoire d'étude sur l'enfant, dans une salle dédiée, au sein de laquelle l'ambiance acoustique, visuelle et thermique était maintenue constante. A leur arrivée, les parents étaient confortablement installés tandis qu'une description complète de la session expérimentale et du matériel utilisé leur était donnée. Pendant qu'il donnait ces différentes informations aux parents, l'expérimentateur maintenait également une interaction chaleureuse et enjouée avec le nourrisson. Une fois l'enfant à l'aise et en confiance, celui-ci était confortablement installé dans un siège-auto sécurisé placé en face de l'écran de présentation. De sa position, le nourrisson était à une distance approximative de 60 cm du système de poursuite de mouvements oculaires et de 65 cm de la caméra. Il était demandé aux parents de s'assoir sur une chaise placée hors du champ de vision de l'enfant (i.e., chaise placée à 1,5 m derrière l'enfant) et de rester aussi silencieux et immobiles que possible durant l'expérience. Il leur était également précisé qu'ils pouvaient rassurer leur enfant et le sortir du siège-auto s'il s'avérait que ce dernier devenait trop agité. Avant le début de l'expérience, la position du système de poursuite de mouvements oculaires était ajustée dans le but de maximiser la détection du regard par le système. Chaque enfant passait deux étapes dans l'expérience : dans un premier temps une phase de calibration du regard, dans un second temps une phase de test. Au cours de l'expérience, l'expérimentateur était quant à lui assis derrière l'enfant au niveau de l'écran de contrôle ; afin de gérer la présentation des stimuli durant la phase de calibration et de surveiller l'état de l'enfant durant la phase test.

D. Phase de Calibration

Un personnage animé et produisant simultanément un son était présenté à l'écran. Il apparaissait en premier lieu au centre de l'écran. Une fois que le nourrisson posait son regard sur le personnage, l'expérimentateur déclenchait manuellement le déplacement du personnage vers une autre localisation où il restait jusqu'à ce que le nourrisson le fixe de nouveau et que l'expérimentateur déclenche un nouveau déplacement ; et cela jusqu'à ce que le personnage ait atteint 5 positions différentes sur l'écran (i.e., le centre et les 4 coins près du bord de l'écran). Si le regard de l'enfant n'était pas détecté sur au moins l'une des 5 positions ou si la précision de détection du regard n'était pas suffisante, alors la procédure de calibration était de nouveau effectuée. La précision spatiale de calibration pour les axes *x* et *y* devait être inférieure à 1°, ou tout du moins être le plus proche possible de cette valeur si elle en restait supérieure après plusieurs essais de calibration. Si après trois tentatives, le système ne détectait toujours pas correctement le regard de l'enfant, l'expérience était alors effectuée sans récolte des paramètres oculométriques.

E. Phase de test

Au cours de cette étape, les nourrissons étaient exposés à 12 essais consécutifs, correspondant à la présentation du même avatar (i.e., l'homme ou la femme) exprimant 5 émotions différentes (colère, dégoût, joie, peur, tristesse) ou demeurant neutre. Ils voyaient chaque expression deux fois : une fois avec un regard direct (i.e., 6 essais avec regard direct au total), une fois avec un regard évitant (i.e., 3 essais avec regard évitant à gauche, 3 essais avec regard évitant à droite, contrebalancés entre les enfants). Chaque essai correspondait à la présentation d'une séquence de 6 secondes durant laquelle l'avatar répétait la même expression 3 fois. Pendant l'expérience, l'ordre de présentation des différents essais était aléatoire et un intervalle inter-stimulus consistant en 3 secondes de présentation d'un écran bleu était fixé. La **figure 10** ci-dessous représente un essai avec l'avatar féminin exprimant la joie.

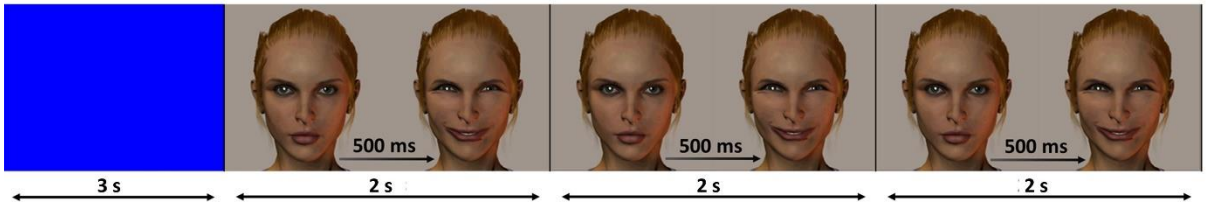


Figure 10 : Schéma d'un essai de 9 secondes d'une expression présentée à l'enfant. Suite à la présentation d'un écran bleu de 3 secondes, la même séquence de 2 secondes était répétée trois fois (i.e., colère, dégoût, joie, peur, tristesse ou neutre). Pour chaque expression dynamique d'une émotion, l'apex était atteint en 500 ms, suivit de 1500 ms d'expression statique.

Si au cours de cette étape, l'enfant manifestait des signes d'inconfort, l'expérimentateur pouvait lui donner quelques mots rassurants (i.e., « Tout va bien », « On est là bébé », « Ne t'inquiète pas »), mais seulement pendant les périodes inter-stimulus. Si jamais cela s'avérait insuffisant, l'expérience était arrêtée et le parent était invité à rejoindre l'enfant et à le sortir du siège pour le réconforter.

3.2.3. Analyses des données

Les données en eye-tracking. Au sein de l'échantillon final d'enfants retenus pour les analyses sur les données oculométriques, la précision spatiale moyenne de calibration pour les axes *x* et *y* était respectivement de : 1 ± 0,61° et 1,15 ± 0,71° pour les nourrissons de 3 mois ; 0,60 ± 0,40° et 0,80 ± 0,40 ° pour les enfants de 7 mois ; 0,70 ± 0,37° et 0.88± 0.38° pour ceux âgés de 12 mois. La collecte des données et leur analyse était effectuée sur les deux yeux.

Dans le but d'examiner les influences de l'expression de l'avatar sur l'exploration visuelle des visages chez les nourrissons aux différents âges, nous avons dans un premier temps calculé des cartes de densité représentant directement la distribution de l'exploration visuelle des différentes régions du visage. Ces cartes ont été créées en calculant, pour chaque pixel, le temps de regard de l'enfant dans un périmètre de 43 pixels (43 pixels représentant un angle visuel de 1° dans notre situation expérimentale). Les temps moyens de fixations ainsi calculés pour chaque pixel étaient ensuite convertis en code couleur pour les représenter

visuellement, et enfin être superposés sur le visage neutre de l'avatar. Une carte de densité a ainsi été construite pour chaque expression à chacun des trois âges et pour chaque avatar. Par exemple, la carte de densité ci-dessous (**figure 11**) représente l'exploration moyenne pour les trois groupes d'âge pour chacune des expressions de l'avatar féminin.

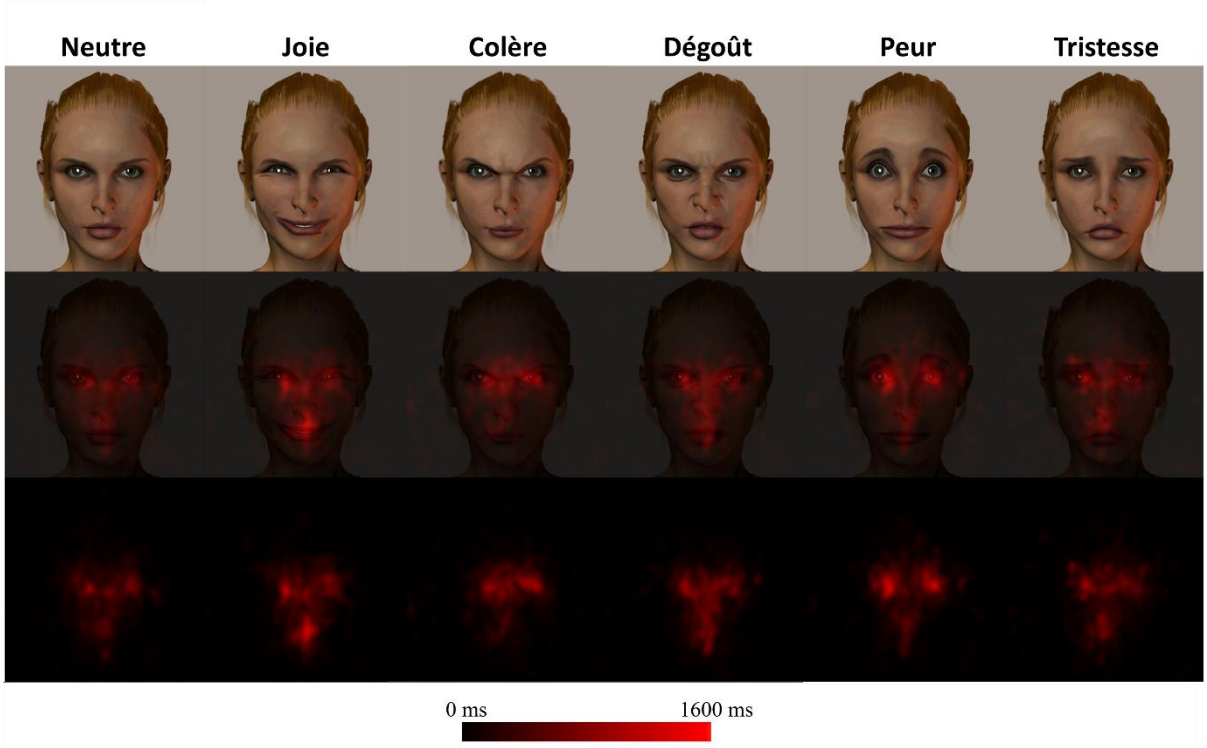


Figure 11 : Carte exploratoire représentant le temps moyen (en ms) que les enfants ont passé à regarder la région entourant chaque pixel selon l'expression de l'avatar. La figure ci-dessus représente l'exploration moyenne du visage de l'avatar féminin par les enfants des trois groupes d'âge.

Dans un second temps, afin d'analyser les données, différentes Aires d'Intérêts (AOIs) ont été définies dans le but de calculer le temps passé par les nourrissons à fixer les différentes régions du visage selon leur âge, l'émotion exprimée par l'avatar et l'orientation du regard de ce dernier. Pour la définition de ces AOIs, nous nous sommes basés à la fois sur les régions les plus explorées par le nourrisson au cours de l'expérience (comme observé avec les différentes cartes d'exploration), mais aussi sur les régions contenant des AUs pertinentes pour le traitement des expressions selon le FACS. Etant donné que nos stimuli impliquaient des éléments dynamiques, les AOIs ont été définies de façon à inclure ces éléments tout au long de leur mouvement. De cette façon, 7 AOIs ont été définies contenant : l'Œil Droit, l'Œil Gauche, le Haut du Nez, le Bas du Nez, la Bouche, l'Entre-Sourcils et les Traits Externes

(voir **figure 12**). Le temps de fixation des nourrissons au sein de chacune des AOIs était ainsi extrait et calculé pour chaque expression, selon l'âge du nourrisson, l'orientation du regard et le sexe de l'avatar.

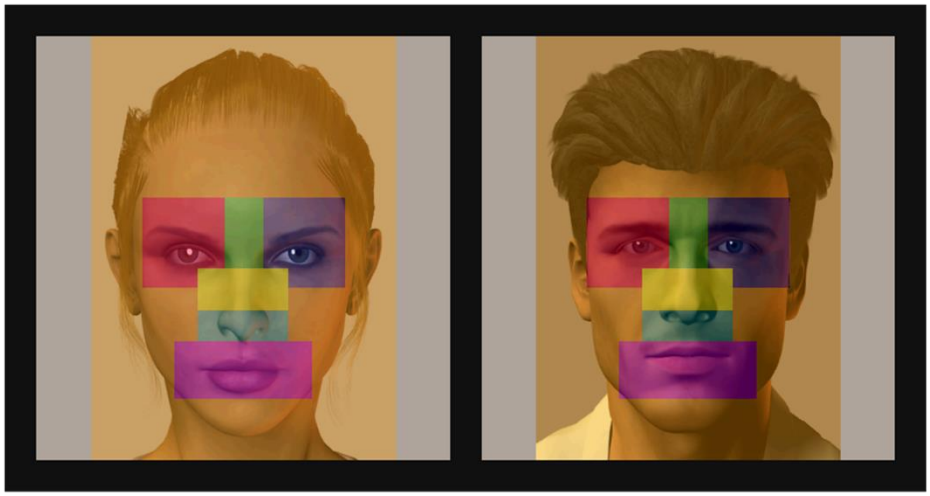


Figure 12 : Illustration des différentes Aires d'Intérêts (AOIs) utilisées au cours de l'expérience : l'Œil Droit (en rouge), l'Œil Gauche (en bleu foncé), la Bouche (en rose), le Haut du Nez (en jaune), le Bas du Nez (en bleu clair), l'Entre-Sourcils (en vert) et les Trait Externes (en orange).

Les données en Baby FACS. Les enregistrements vidéo des réponses faciales des enfants ont été codés au moyen du Baby Facs (Oster, 2007) par un codeur certifié (Robert Soussignan) qui était aveugle quant à l'ordre de présentation des différents stimuli. Le Baby FACS est un système de codage basé sur l'anatomie du visage dans lequel chaque AU correspond à des mouvements de muscles faciaux minimalement distinguables. Dans ce système de codage, chaque AU est cotée avec un code numérique et est comptabilisée sur la base de critères précis de changements transitoires et subtils de la forme et de la localisation des éléments faciaux.

Dans le but de coder l'imitation faciale des enfants en réponse aux différentes expressions de l'avatar, nous avons étudié si les enfants reproduisaient au moins une des actions faciales engagées dans l'expression qu'ils observaient. Les actions faciales choisies ont précédemment été utilisées comme indicateur d'expression émotionnelle dans des études en psychophysique ou en FACS (Ekman & Friesen, 1978 ; Oberman et al., 2009 ; Soussignan et al., 2013, 2015). L'étirement du coin des lèvres du nourrisson (AU 12) était utilisé comme indicateur d'une reproduction de l'expression de joie de l'avatar (AUs 6+12+25) ; l'abaissement des sourcils (AU 4) et le pincement des lèvres (AU 24) étaient utilisés comme

indicateur d'une reproduction de la colère de l'avatar (AUs 4+24) ; pour l'expression de tristesse de l'avatar (AUs 1+4+15), c'était l'élévation et le rapprochement des sourcils (AUs 1 + 4) ou la dépression du coin des lèvres (AUs 15) qui étaient utilisés comme indexant l'imitation ; l'élévation complète (AUs 1, 2, 1+2, 1+2+4) ou partielle des sourcils avec élévation des paupières (AUs 1+2+4+5) accompagnée ou non d'un étirement des lèvres (AU 20) étaient utilisés comme indiquant une imitation de l'expression de peur de l'avatar (AUs 1+2+4+5+20) ; enfin, pour l'expression de dégoût de l'avatar (AU 9) c'était la présence d'un froncement du nez (AU9) qui était indicateur d'une imitation.

Afin de coder les réactions émotionnelles des enfants, nous avons défini un indicateur d'expression de valence négative. Cet indicateur a été défini sur la base de recherches ayant étudié les réactions faciales des nourrissons et des enfants aux stimuli affectifs et aux expressions faciales (Camras et al., 2007 ; Rosenstein & Oster, 1988 ; Soussignan & Schaal, 1996). Cet indicateur comportait les AUs suivantes : 4 (abaissement des sourcils) ; 1+4 (élévation et rapprochement des sourcils) ; 3+4 (élévation de la partie externe et abaissement de la partie interne des sourcils) ; 1+2+4 (élévation complète du sourcil) ; 9 (froncement du nez) ; 10 (élévation de la lèvre supérieure) ; 11 (creusement du sillon naso-labial) ; 14 (plissement du coin des lèvres) ; 15 (abaissement du coin des lèvres) ; et 20 (étirement de la lèvre inférieure). Comme indicateur d'expression de valence positive, nous avons utilisé l'AU 12 (sourire).

Les réactions faciales des nourrissons ont été analysées image par image sur l'ensemble de la séquence de 6 secondes de chaque essai. Ont été calculés : le pourcentage d'enfants montrant une reproduction sur les différentes AUs précédemment définies, le pourcentage d'enfants exprimant des expressions positives et le pourcentage d'enfants exprimant des expressions négatives.

Un second codeur FACS (Nadja Reissland), non-informé des buts et hypothèses de l'étude et de la nature des stimuli, a codé un échantillon de 42 segments vidéo sur lesquels figuraient les réponses faciales de 42 nourrissons (14 nourrissons de chacun des 3 groupes d'âge). L'accord inter-observateur était calculé en divisant le nombre d'AUs sur lesquelles il y a accord entre les observateurs multiplié par 2, et divisé par le nombre total d'AUs comptabilisées par les 2 codeurs. Le pourcentage d'accord sur le nombre total d'AUs était de 88,5%. L'accord inter-observateurs pour les expressions positives (AUs 6+12, Au 12) et négatives était de 82% et de 89,5%, respectivement.

Attention visuelle et détournement du regard. Sur les enregistrements vidéo, nous avons également analysé le pourcentage de temps passé par l'enfant à regarder l'avatar et la fréquence de détournement du regard de l'enfant. Le détournement du regard a été mesuré avec la fréquence à laquelle l'enfant détournait son regard de l'écran par essai.

L'accord inter-observateurs sur ces deux paramètres était là aussi défini par l'accord entre le codeur principal et un second codeur (lui aussi aveugle sur l'ordre de présentation des stimuli) qui a codé 10% des enregistrements vidéo. Ici, l'accord inter-observateur calculé avec le *r* de la corrélation de Pearson était respectivement de 0,75 et de 0,94 pour la fréquence de détournement du regard et le pourcentage de temps de regard.

3.2.4. Analyses statistiques

Les données sur la poursuite des mouvements oculaires. Les comportements visuels exploratoires du nourrisson ont été analysés au moyen d'une ANOVA, avec l'Age (3, 7 et 12 mois) comme variable inter-sujets, et l'AOI (œil droit, œil gauche, bouche, haut du nez, bas du nez, entre-sourcils et traits externes), l'Expression de l'Avatar (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre) et l'Orientation du Regard de l'avatar (direct et évitant) en tant que variables intra-sujets. Etant donné que des analyses préliminaires n'ont pas révélé d'effet du Genre de l'enfant (garçon, fille), ce facteur n'a pas été inclus dans l'ANOVA. Une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée sur les effets simples et interactions. Les tests post-hoc ont été effectués au moyen de tests HSD de Tukey.

Réactions faciales. Des Q de Cochran furent utilisés pour déterminer si, au sein de chaque groupe d'âge, les nourrissons produisaient des AUs spécifiques correspondant aux l'expressions faciales vues et si ces réponses différaient selon l'orientation du regard. En fonction de la significativité des tests de Cochran, nous avons ensuite utilisé des tests de McNemar pour comparer les réponses à chaque paire de stimuli. Suite à cela, des Chi^2 ont été appliqués dans le but de déterminer si l'âge et le genre des nourrissons avait un effet sur la proportion d'enfants produisant des AUs spécifiques pour chaque expression émotionnelle de l'avatar. Enfin, des tests de Cochran et des Chi^2 ont également été utilisés sur les pourcentages d'enfants exprimant des réactions faciales positives et négatives aux différentes expressions de l'avatar.

Attention visuelle et Détournement du Regard. Concernant le pourcentage de temps de regard et le détournement du regard, tous deux furent analysés au moyen d'une analyse de variance à mesure répétée (ANOVA) avec l'Age (3, 7, 12) en tant que variable inter-sujets, et l'Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre) et le Regard (direct, évitant) de l'avatar en tant que variables intra-sujets. Le facteur Genre du nourrisson (garçon, fille) n'a pas été inclus dans l'ANOVA puisque des analyses préliminaires n'ont révélé aucun effet significatif de ce dernier. Pour les tests post-hoc nous avons eu recours à des tests HSD de Tukey afin d'examiner les différents effets révélés significatifs par l'ANOVA.

3.3. RESULTATS

3.3.1. L'exploration visuelle des expressions faciales par les nourrissons

L'ANOVA n'a pas révélé d'effet significatif du Regard sur l'exploration visuelle, aussi bien seul qu'en interaction (tous les Fs<1.22). L'effet de l'Expression était, quant à lui, significatif [$F(5,790)= 6.49$, $\varepsilon= .98$, $p<.0001$, $\eta p^2= .04$], mais n'interagissait pas avec l'Age ($F< 1$). Les tests post-hoc effectués au moyen de tests de Tukey ont révélé que cet effet était lié à une plus longue exploration des expressions dynamiques (de 939,2 à 1022 ms) plutôt que des visages neutres statiques (840,1 ms, tous les p*s*<.05).

L'effet de l'AOI sur la durée d'exploration était lui aussi significatif [$F(6,948)= 23.5$, $\varepsilon= .61$, $p<.0001$, $\eta p^2= .13$]. L'AOI interagissait également significativement avec l'Age [$F(12,948)= 5.60$, $\varepsilon= .61$, $p< .0001$, $\eta p^2= .07$]. Cette interaction est illustrée en **figure 13**. Des analyses complémentaires ont permis de révéler que l'effet de l'Age sur la durée d'exploration des AOIs était lié à une différence dans la durée d'exploration des éléments situés sur le bas du visage et les éléments externes [bouche : $F(2,158)= 7.48$, $p<.001$, $\eta p^2= .09$; haut du nez : $F(2,158)= 4.43$, $p<.05$, $\eta p^2= .05$; bas du nez : $F(2,158)= 6.85$, $p<.01$, $\eta p^2= .08$; traits externes : $F(2,158)= 21.24$, $p<.0001$, $\eta p^2= .21$]. Aucun effet de l'Age n'était observé pour les éléments situés sur le haut du visage [œil droit, œil gauche et entre-sourcils ; tous les Fs<1]. Les tests post-hoc ont révélé que les enfants de 7 et 12 mois regardaient plus longuement la bouche et le bas du nez que ne le faisaient ceux de 3 mois (tous les p*s*<.05). Les enfants de 7 mois, mais pas ceux de 12 mois, exploraient également plus le haut du nez

que ceux de 3 mois (p<.01 et p= .0932, respectivement). Les nourrissons de 3 mois exploraient quant à eux significativement plus longtemps les traits externes que les 2 groupes d'enfants plus âgés (les deux ps<.0001). Aucune différence n'a été observée entre les deux groupes d'enfants les plus âgés.

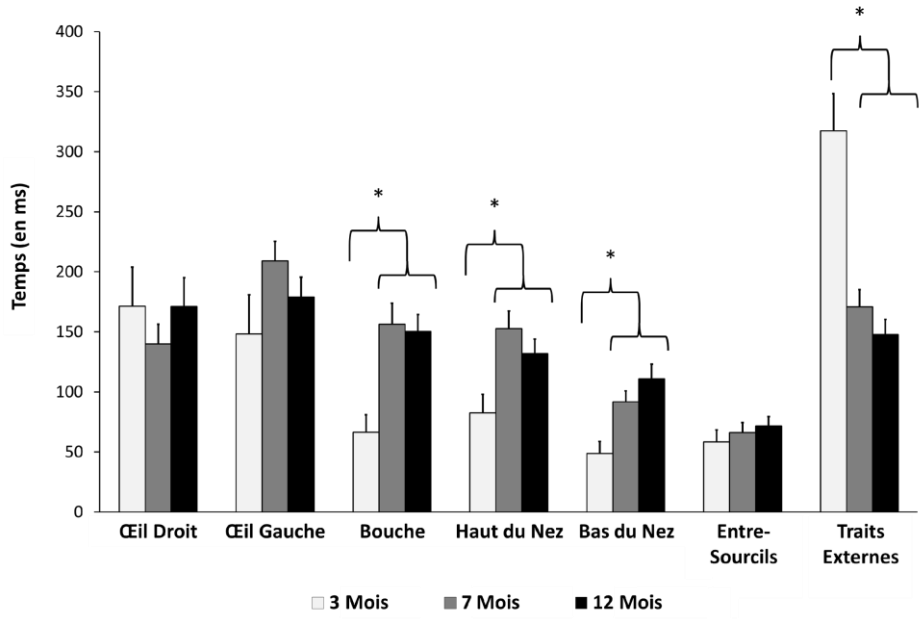


Figure 13 : Temps moyen passé par les enfants à explorer les différentes zones du visage selon leur âge (les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard). Les différences significatives sont indiquées avec des *.

Il apparaît donc qu'avec l'âge les principales AOIs explorées sur les visages expressifs dynamiques changent, avec notamment un passage des traits externes vers les traits internes situés sur le bas du visage entre 3 et 7 mois. De plus, il semble que cette modification des stratégies exploratoires se fasse sans modification de l'intérêt porté sur la région des yeux. Toutefois, ces changements ne sont pas indépendants de l'information véhiculée par le visage, puisque les stratégies exploratoires varient selon l'émotion exprimée par le visage de l'avatar : l'interaction entre Age, AOI et Expression de l'Avatar était elle aussi significative [$F(60,4740)= 2.38$, $\varepsilon= .62$, p<.0001, $\eta p^2= .03$]. Des comparaisons planifiées entre les nourrissons de 3 mois et les deux groupes plus âgés sur chaque AOI pour chaque expression ont permis de spécifier ces différences. Les résultats de cette analyse sont résumés dans la figure ci-dessous (**figure 14**), sur laquelle les expressions pour lesquelles un effet de l'Age était présent sont indiquées au moyen de zones grisées (valeur de F la plus basse : $F(1,158)= 4.12$, p<.05 ; valeur de F la plus haute : $F(1,158)= 17.55$, p<.0001). Comme visible sur la

figure 14, les enfants de 7 et 12 mois n'ont pas augmenté leur temps de regard sur les éléments du bas du visage indépendamment de l'expression. En effet, les nourrissons les plus âgés ont manifesté cette focalisation plus accrue sur les régions basses principalement lorsque cela se révélait pertinent pour l'expression à laquelle ils étaient exposés, c'est-à-dire lorsque l'AOI contenait une AU pertinente : la bouche était explorée plus longtemps sur les visages de joie, tandis que le haut du nez était plus exploré sur les visages de dégoût. Cela s'est également avéré être vrai pour l'œil gauche sur les visages de peur, puisque malgré une absence d'effet de l'âge sur cette région, il s'est avéré que les nourrissons les plus âgés regardaient significativement plus cette région en cas de peur. Il apparaît donc que les enfants de 7 et 12 mois exploraient distinctivement les différents éléments du visage en se focalisant spécifiquement sur les éléments pertinents de l'expression observée. Cette conclusion est renforcée par la présence d'une interaction significative entre l'Age et l'Expression sur la durée d'exploration de l'œil gauche [$F(10,790)= 3.16$, $\varepsilon= .89$, $p<.001$, $\eta p^2= .04$], de la bouche [$F(10,790)= 2.89$, $\varepsilon= .75$, $p<.01$, $\eta p^2= .04$] et du bas du nez [$F(10,790)= 1.96$, $\varepsilon= .83$, $p<.05$, $\eta p^2= .02$], mais pas du haut du nez [$F(10,790)= 1.52$].

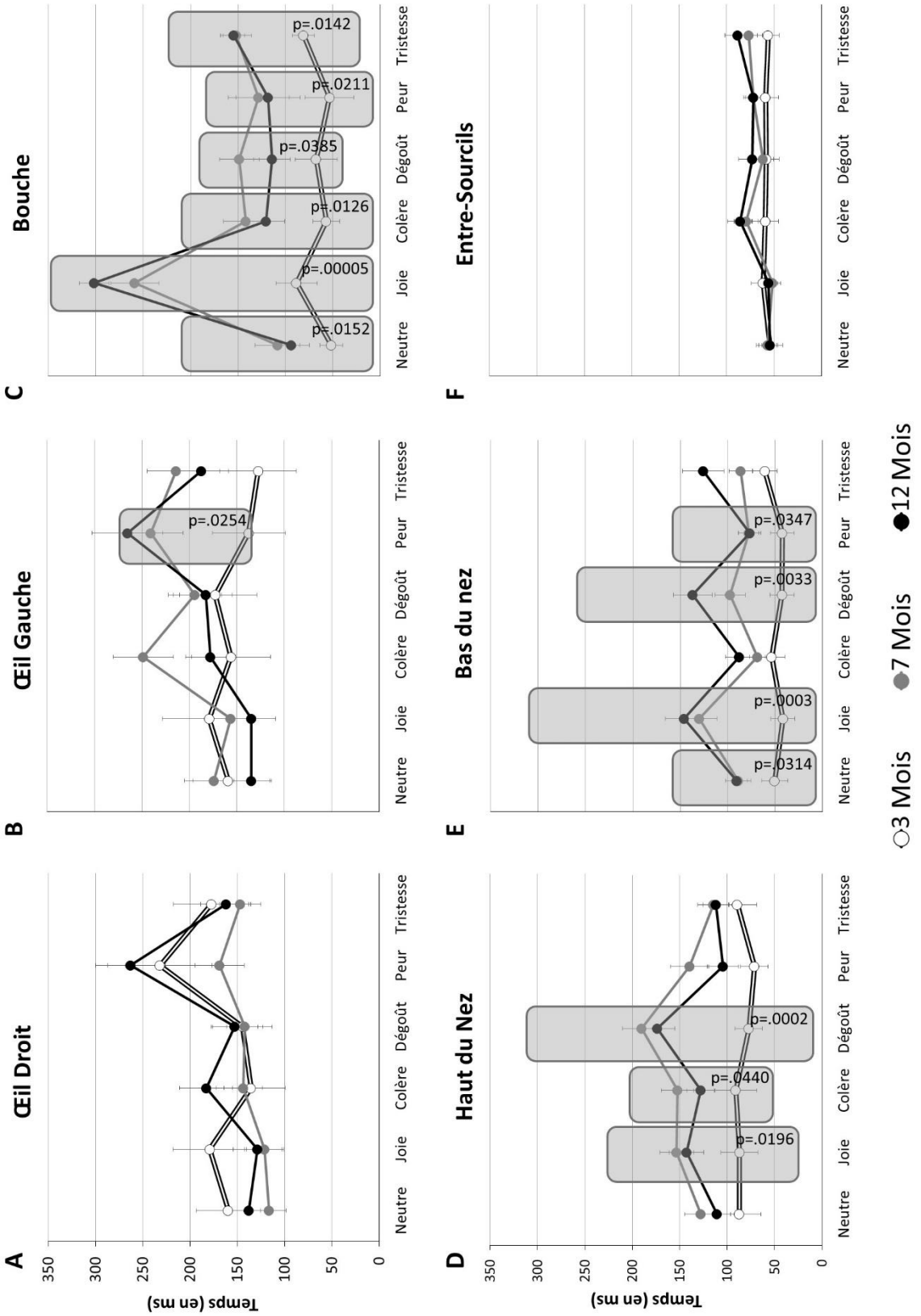


Figure 14 : Temps moyen passé par les enfants à explorer les différentes AOIs du visage (A = Œil Droit, B = Œil Gauche, C = Bouche, D = Haut du Nez, E = Bas du Nez, F = Entre-Sourcils) selon leur âge et l'expression faciale de l'avatar (les barres d'erreurs représentent l'erreur standard). Les zones grisées représentent les effets significatifs de l'Age.

Ainsi, la façon dont les enfants explorent les expressions faciales évolue entre 3 et 7 mois. Avec l'âge, les enfants regardent de plus en plus les AUs pertinentes des expressions faciales qu'ils observent, suggérant donc le développement de leur capacité à se focaliser sur les éléments pertinents du visage. Dans le but d'explorer plus finement cette supposition, nous avons effectué des ANOVAs isolées sur chaque groupe d'âge, avec pour variables intra-sujets l'AOI (œil droit, œil gauche, bouche, haut du nez, bas du nez, entre-sourcils et traits externes) et l'Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre). Etant donné qu'elle n'avait aucun effet dans les analyses précédentes, la direction du regard ne fut pas considérée dans ces nouvelles analyses.

A 3 mois, le pattern d'exploration visuelle du visage de l'avatar s'est avéré ne pas être affecté par l'émotion exprimée, puisque l'interaction entre Expression et AOI n'était pas significative [$F(30,1050)= 1.15$]. Il est à souligner que l'effet de l'expression était lui aussi non-significatif ($F<1$).

A 7 mois, contrairement aux nourrissons de 3 mois, un effet significatif de l'expression a pu être observé [$F(5,325)= 3.94$, $\varepsilon= .94$, $p<.01$, $\eta p^2= .06$]. Les tests post-hoc de Tukey ont permis de révéler que cet effet était lié à une exploration plus longue des visages de joie (1036 ms), de peur (1011 ms) et de dégoût (1007 ms) par rapport aux visages neutres (844 ms, tous les p*s*<.05), avec une tendance similaire pour la colère (980 ms, $p= .0577$) et la tristesse (978 ms, $p= .0626$). De plus, le pattern exploratoire des nourrissons de cet âge variait selon l'expression faciale puisque l'interaction entre Expression et AOI était significative [$F(30,1950)= 4.24$, $\varepsilon= .51$, $p<.0001$, $\eta p^2= .06$]. Les analyses complémentaires ont indiqué que l'effet de l'expression était significatif pour l'œil gauche [$F(5,325)= 4.26$, $\varepsilon= .81$, $p<.01$, $\eta p^2= .06$], la bouche [$F(5,325)= 8.39$, $\varepsilon= .77$, $p<.0001$, $\eta p^2= .11$], le haut du nez [$F(5,325)= 4.47$, $\varepsilon= .86$, $p= .001$, $\eta p^2= .06$] et le bas du nez [$F(5,325)= 3.65$, $\varepsilon= .68$, $p= .01$, $\eta p^2= .05$], mais pas pour l'œil droit [$F(5,325)= 1.58$], l'entre-sourcils [$F(5,325)= 1.75$] et les traits externes [$F(5,325)= 1.15$]. Les tests post-hoc ont montré qu'à 7 mois les enfants regardaient plus longtemps l'œil gauche pour la peur et la colère que pour la joie (les deux *ps*≤.01), et pour la colère par rapport à la neutralité (*p*<.05). Ils regardaient également plus la bouche quand l'avatar exprimait la joie plutôt que toute autre expression (tous les p*s*<.0001), le haut du nez quand l'avatar exprimait du dégoût plutôt que de la peur, de la tristesse ou de la neutralité (tous les *ps*<.05), et le bas du nez quand l'avatar exprimait la joie plutôt que la colère et la peur (les deux *ps*<.05).

A 12 mois, le pattern d'exploration était d'allure similaire à celui des 7 mois avec, toutefois, quelques légères différences. Un effet significatif de l'Expression était présent [$F(5,290)= 4.57$, $\varepsilon= .94$, $p<.001$, $\eta p^2= .07$]. Cet effet résultait d'une plus longue exploration de la joie (1055 ms), de la peur (1019 ms) et de la tristesse (991 ms) par rapport à la neutralité (811 ms, tous les *ps*< .05 après tests de Tukey), sans différence par rapport à la colère (931 ms) et au dégoût (959 ms). Il s'est également avéré que le pattern exploratoire variait selon l'émotion exprimée comme indiqué par la présence d'une interaction significative entre les facteurs Expression et AOI [$F(30,1740)= 9.71$, $\varepsilon= .51$, $p<.0001$, $\eta p^2= .14$]. L'effet de l'expression sur le temps d'exploration des différentes AOIs était significatif pour l'œil droit [$F(5,290)= 9.08$, $\varepsilon= .84$, $p<.0001$, $\eta p^2= .14$], l'œil gauche [$F(5,290)= 6.92$, $\varepsilon= .81$, $p<.0001$, $\eta p^2= .11$], la bouche [$F(5,290)= 19.88$, $\varepsilon= .64$, $p<.0001$, $\eta p^2= .26$], le haut du nez [$F(5,290)= 4.40$, $\varepsilon= .89$, $p= .001$, $\eta p^2= .07$], le bas du nez [$F(5,290)= 4.99$, $\varepsilon= .74$, $p= .001$, $\eta p^2= .08$], l'entre-sourcils [$F(5,290)= 2.51$, $\varepsilon= .84$, $p<.05$, $\eta p^2= .04$] et les traits externes [$F(5,290)= 4.61$, $\varepsilon= .90$, $p<.01$, $\eta p^2= .07$]. Grâce aux tests post-hoc de Tukey, il a pu être observé que les enfants de 12 mois regardaient plus les deux yeux lorsque l'avatar exprimait de la peur plutôt que l'ensemble des expressions (tous les *ps*<.05). Ils regardaient également plus : la bouche sur les visages joyeux plutôt que pour toute autre expression (tous les *ps*<.0001) ; le haut du nez pour le dégoût plutôt que pour la peur, la tristesse et la neutralité (tous les *ps*<.01) ; et le bas du nez sur les visages de joie plutôt que sur les visages de colère, de peur ou neutre (tous les *ps*<.05), et sur les visages de dégoût plutôt que sur ceux de peur (*p*<.05). Enfin, les enfants regardaient plus longtemps les traits externes des visages neutres plutôt que lorsque ces derniers exprimaient le dégoût ou la peur (les deux *ps*<.01). Aucun effet significatif ne fut observé sur l'entre-sourcils au cours des tests post-hoc ; l'effet de l'expression résultant d'une faible tendance des nourrissons à regarder plus longtemps cette région sur les visages de tristesse et de colère plutôt que sur les visages de joie et les visages neutres (tous les *ps* allant de .0836 à .1830).

3.3.2. Les réactions faciales des nourrissons aux expressions

L'expression de joie (AUs 6+12+25) : A 3 mois, un plus fort pourcentage d'enfants a exprimé l'AU 12 (44,67%) en réaction à un avatar exprimant la joie avec regard direct par rapport à un avatar neutre et à un avatar exprimant des émotions négatives [$Q(11)= 33.89$, $p<.001$; en test de McNemar, tous les *ps*<.05]. Plus d'enfants ont également exprimé l'AU

12 lorsqu'ils étaient face à un avatar exprimant de la joie avec un regard évitant (25%) en comparaison avec un avatar exprimant de la colère avec regard direct (5,5%). A 7 mois, le pourcentage d'enfants affichant l'AU 12 était lui aussi influencé par la nature de l'émotion exprimée par l'avatar [Q(11)= 19.5, p= .05]. Toutefois, les tests de McNemar effectués par la suite n'ont permis que de révéler la présence d'une tendance marginale à un pourcentage plus élevé de nourrissons exprimant l'AU 12 lorsqu'ils étaient face à un avatar leur exprimant de la joie avec regard direct (14,3%) ou évitant (14,3%) plutôt que de la peur (0%) ou de la tristesse (0%) avec regard évitant (p= .06). Pour les 12 mois, un pourcentage plus élevé d'enfants exprimant l'AU 12 au visage de joie de l'avatar (regard direct : 27,3% ; regard évitant : 33,33%) par rapport à toute autre expression était observé [Q(11)= 34.46, p<.0001]. Plus spécifiquement, plus d'enfants ont montré l'AU 12 face à un avatar joyeux avec regard direct ou évitant plutôt que lorsque l'avatar était neutre (regard direct 6,06% ; regard évitant : 9,09%, p<.05), exprimait de la colère avec regard direct (p<.05), exprimait du dégoût avec regard évitant (p<.05) et lorsqu'il exprimait de la peur avec regard évitant (p<.005). Le visage de joie des avatars était également positivement discriminé des visages de tristesse (regard direct 6,06% ; regard évitant : 9,09%, p<.05). Enfin, un effet de l'âge sur le pourcentage d'enfants exprimant l'AU 12 aux avatars de joie avec regard direct a été observé [χ^2 (2, N=104)= 6.62, p= .03], indiquant que les nourrissons de 3 mois exprimaient plus l'AU 12 que ceux de 7 mois [χ^2 (2, N=104)= 6.57, p= .03]. Ces résultats sont présentés dans la **figure 15** ci-dessous. Aucun effet du genre ne fut observé.

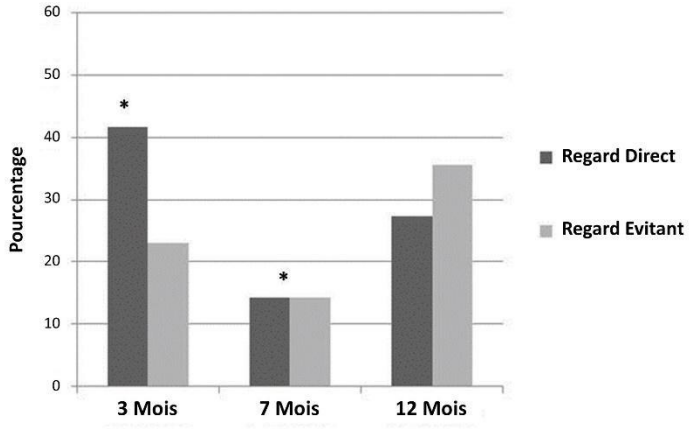


Figure 15 : Pourcentage d'enfants ayant souri (AU 12 : élévation du coin des lèvres) lors de la présentation du visage de joie de l'avatar selon leur âge et l'orientation du regard de l'avatar. Les différences significatives sont indiquées avec des * (* p<.05). A 3 mois un pourcentage plus élevé d'enfants exprimaient l'AU 12 en réaction à l'avatar exprimant la joie avec regard direct en comparaison avec les enfants de 7 mois.

L'expression de colère (AUs 4+24) : Chez les enfants de 3 et 12 mois, le pourcentage d'enfants exprimant les AUs 4 et 24 n'était pas affecté par la nature de l'expression faciale qui leur était présentée (tous les *ps*>.05 en test de Cochran). Néanmoins, un effet significatif de ces dernières était présent chez les enfants de 7 mois [$Q(11)= 25.08$, $p= .009$], mais sans pour autant qu'il n'y ait correspondance entre l'expression vue et celle exprimée par le nourrisson. En effet, plus de nourrissons ont exprimé les AUs 4 et 24 en réponse aux avatars tristes avec regard évitant (22,85%) plutôt qu'aux avatars neutres (regard direct : 5,55%, $p= .03$; regard évitant : 0%, $p= .008$) et joyeux (regard direct : 2,86%, $p= .04$; regard évitant : 0%, $p= .008$). Un pourcentage plus élevé de nourrissons a également exprimé ces mêmes AUs en réactions aux avatars exprimant de la tristesse avec regard évitant par rapport aux avatars exprimant du dégoût (2,86%, $p= .04$) et de la tristesse avec un regard direct (2.86%, $p= .04$). Ni effet de l'âge, ni effet du genre ne furent observés chez les enfants en réponse aux visages de colère des avatars ($p>.05$, en test de Chi^2).

L'expression de dégoût (AU 9) : Le pourcentage de nourrissons exprimant l'AU 9 n'était significativement affecté ni par l'expression de l'avatar, ni par l'orientation de son regard, et ce quel que soit l'âge des nourrissons (tous les *ps*>.05). L'effet de l'âge et du genre sur les réponses à l'avatar exprimant de la colère étaient eux aussi non-significatifs ($p>.05$, en test de Chi^2).

L'expression de peur (AUs 1+2+4+5+20). Chez les enfants de 3 et 12 mois, le pourcentage d'enfants produisant une ou plusieurs des AUs correspondant à l'expression de peur n'était pas affecté par la nature de l'expression produite par l'avatar (tous les *ps*>.05). Un effet significatif était observable chez les nourrissons de 7 mois [$Q(11)= 23.91$, $p= .01$]. Toutefois, là aussi aucune reproduction de l'expression n'était observée puisque les nourrissons exprimaient plus de composantes de l'expression de peur en réaction aux avatars exprimant la colère (22,85%) et la tristesse (22,85%) avec un regard évitant plutôt qu'en réaction aux avatars exprimant la joie (0%) et le dégoût (2,86%) avec un regard direct (tous les *ps*<.05). Aucun effet de l'âge ou du genre des enfants n'a été observé sur les réponses des nourrissons au visage de peur des avatars.

L'expression de tristesse (AUs 1+4+15) : Chez les 3 groupes d'âges, le pourcentage de nourrissons produisant les AUs de tristesse (1 + 4, 15) en réponse aux visages tristes des avatars ne différait pas des autres expressions faciales (tous les *ps*>.05, en test de Cochran). Les effets de l'âge et du genre étaient non significatifs (*p*>.05, en test de Chi²).

Les réactions faciales négatives : Le pourcentage de nourrissons de 3 mois exprimant des AUs négatives ne différait pas significativement selon l'expression faciale de l'avatar [*Q*(11)= 13.15, *p*= .28]. Comme observable sur la **figure 16**, ce résultat reflète un manque de différenciation entre les expressions négatives des avatars vis-à-vis de l'expression neutre et/ou vis-à-vis de l'expression de joie avec regard évitant. Contrairement aux nourrissons de 3 mois, des effets significatifs de l'expression de l'avatar sur le pourcentage d'enfants manifestant des réactions faciales négatives ont pu être observés à la fois chez les enfants de 7 mois [Q(11)= 32.40, *p*= .001], et de 12 mois [Q(11)= 23.61, *p*= .01]. A 7 mois, une plus forte proportion d'enfants exprimait des AUs négatives à l'expression de tristesse des avatars plutôt qu'à leurs expressions de joie, de colère et de dégoût ; et ce quelle que soit l'orientation du regard (tous les *ps*<.05). Ils ont également affiché plus d'expressions négatives au visage triste des avatars avec regard évitant plutôt qu'à leur visage de peur, de tristesse ou neutre (tous les *ps*<.05). De plus, les enfants de 7 mois ont exprimé plus d'AUs négatives lorsqu'ils étaient exposés aux avatars exprimant la peur avec un regard évitant plutôt qu'à ceux exprimant de la joie (*p*<.01), et de même lorsqu'ils exprimaient de la colère plutôt que de la joie avec regard évitant (*p*<.05). Il est à souligner que les enfants de 12 mois ont révélé un pattern de réponses faciales plus différencié que ceux de 7 mois (voir **figure 16**). Ils exprimaient plus d'AUs négatives au visage de colère avec regard direct des avatars plutôt qu'au visage neutre (tous les *ps*<.05) et au visage de joie des avatars (*p*= .02). De plus, les expressions de dégoût et de peur des avatars avec regard direct, ainsi que l'expression de tristesse avec regard évitant, ont déclenché plus d'expressions négatives chez les enfants de 12 mois que les expressions neutre et joyeuse avec regard direct (tous les *ps*<.05).

Les tests de Chi² ont révélés que l'âge des nourrissons avait un effet sur leurs réponses au visage neutre des avatars avec regard direct [χ^2 (2, N=104)= 6.58, *p*= .037]. Une plus forte proportion d'enfants de 3 mois (33,33%) exprimait des expressions faciales négatives par rapport aux enfants de 12 mois (9%), [χ^2 (1, N=69)= 5.95, *p*= .01], lorsqu'ils étaient exposés à l'avatar neutre avec un regard direct. Plus de nourrissons de 3 mois exprimaient également des AUs négatives en réponse au visage de joie avec regard direct des avatars (27,8%) par rapport aux 7 mois (5,7%), [χ^2 (1, N=71)= 6.15, *p*= .013].

En résumé, les différents résultats révèlent la présence de changements développementaux dans les réponses faciales des nourrissons aux expressions de base exprimées par les avatars. Les résultats suggèrent une différenciation progressive de la valence entre les expressions négatives (colère, dégoût, peur et tristesse) et "non-négatives" des avatars (neutre et joie) entre 3 et 12 mois, les enfants les plus âgés étant plus sensibles à la colère, au dégoût et à la peur avec regard direct.

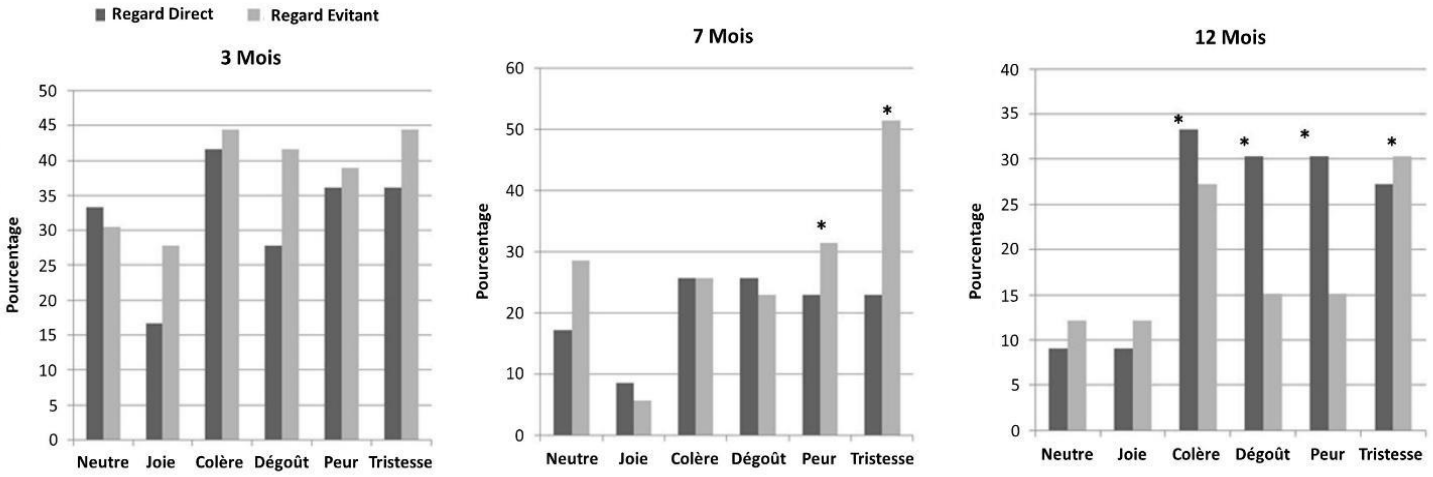


Figure 16 : Pourcentage d'enfants de 3, 7 et 12 mois ayant exprimé des expressions faciales négatives selon l'expression émotionnelle et l'orientation du regard de l'avatar. Les différences significatives sont indiquées avec des * (* p<.05). L'expression et l'orientation du regard de l'avatar n'affectaient pas le pourcentage d'enfants exprimant des AUs négatives chez les nourrissons de 3 mois. A 7 mois, les enfants exprimaient plus fréquemment des AUs négatives lorsque l'avatar exprimait la peur et la colère avec un regard évitant par rapport à la joie avec la même orientation de regard. A 12 mois, les enfants exprimaient plus fréquemment des AUs négatives en réaction à l'avatar exprimant de la colère, du dégoût et de la peur avec regard direct, et à l'avatar exprimant de la tristesse avec regard évitant en comparaison avec la joie et la neutralité.

3.3.3. Attention visuelle des nourrissons aux expressions et détournement du Regard

Attention visuelle : L'ANOVA conduite sur le pourcentage de temps de regard des nourrissons considérait le facteur Age (3, 7 et 12 mois) comme variable inter-sujets et les facteurs Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutralité) et Regard (direct et évitant) comme variables intra-sujets. Elle a révélé la présence d'un effet principal de l'Expression [F(5, 505)= 9.83, p<.0001, ηp^2= 0.089], ainsi qu'une tendance à l'interaction entre l'Age et l'Orientation du Regard [F(2, 101)= 2.93, p= .058, ηp^2= 0.05]. Les nourrissons

ont regardé plus longtemps les avatars exprimant la joie (*M* = 92,47%, *SD* = 11,1) par rapport aux avatars exprimant la neutralité (*M* = 83,50%, *SD* = 14,61), la colère (*M* = 84,75%, *SD* =16,47), le dégoût (*M* = 87,60%, *SD* = 13,52) et la tristesse (*M* = 87,71%, *SD* = 13,33) (tous les *ps*<.05, en test de Tukey). De plus, les enfants ont exploré plus longuement le visage des avatars lorsqu'ils exprimaient la peur (*M* = 90,21%, *SD* = 13,65) plutôt que la neutralité et la colère (tous les *ps*<.01, en test de Tukey).

Des ANOVAs sur les facteurs Expression (6) et Regard (2) ont été menées sur chaque groupe d'âge. Aucun effet de l'émotion ne fut observé chez les nourrissons de 3 mois [$F(5, 175)= 1.43$, $p= .215$, $\eta p^2= 0.039$]. Toutefois, un effet du regard était présent [$F(1, 35) = 7.51$, $p<.01$, $\eta p^2 = 0.177$] et révélait que les nourrissons de 3 mois regardaient plus longtemps les avatars les regardant directement (*M* = 91,12%, *SD* = 20,97) plutôt que les avatars avec regard évitant (*M* = 87,88%, *SD* = 26,11). En opposition, un effet de l'expression était observé à la fois chez les enfants de 7 mois [$F(5, 170)= 4.32$, $p= .001$, $\eta p^2= 0.113$] et les 12 mois [$F(5, 160)= 5.49$, $p<.001$, $\eta p^2= 0.146$]. Comme montré en **figure 17**, ce résultat était lié à une exploration plus longue des expressions de joie et de peur par rapport à l'expression de colère et à la neutralité chez les deux groupes d'enfants les plus âgés (tous les *ps*<.05, en test de Tukey).

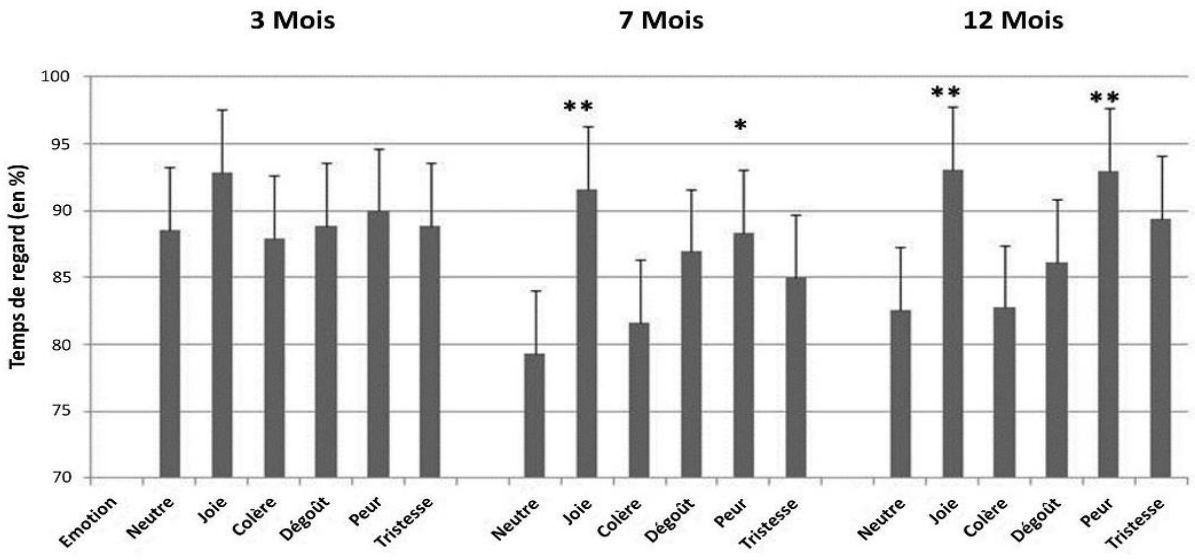


Figure 17 : Pourcentage de temps passé par les enfants à regarder l'avatar selon leur âge et l'expression faciale de l'avatar. Les différences significatives sont indiquées avec des * (* *p*<.05 ; ** *p*<.01). L'expression n'impactait pas sur le temps passé à regarder l'avatar à 3 mois. A 7 et 12 mois, les enfants regardaient plus longtemps l'avatar lorsqu'il exprimait de la joie et de la peur en comparaison avec la neutralité et la colère.

Détournement du regard : L'ANOVA conduite sur le détournement du regard des nourrissons, et comprenant les facteurs Age (3), Expression (6) et Regard (2), a révélé un effet de l'émotion exprimée par l'avatar [$F(5,505) = 9.17$, $p<.0001$, $\eta p^2= 0.083$]. Les tests post-hoc ont démontré que cet effet était lié à une fréquence plus élevée de détournement du regard par les enfants lorsqu'ils étaient exposés au visage neutre (M = 0,164, SD = 0,106), de colère (M = 0,142, SD = 0,121), de dégoût (M = 0,13, SD = 0,129) et de tristesse des avatars (M = 0,135, SD = 0,123), plutôt que lorsqu'ils étaient exposés à leur visage de joie (M = 0.088, SD = 0.098) (tous les $ps<.01$). Une fréquence de détournement du regard plus élevée était également observée pour les visages neutres et les visages de colère par rapport aux visages de peur ($p<.001$ et $p= .05$, respectivement).

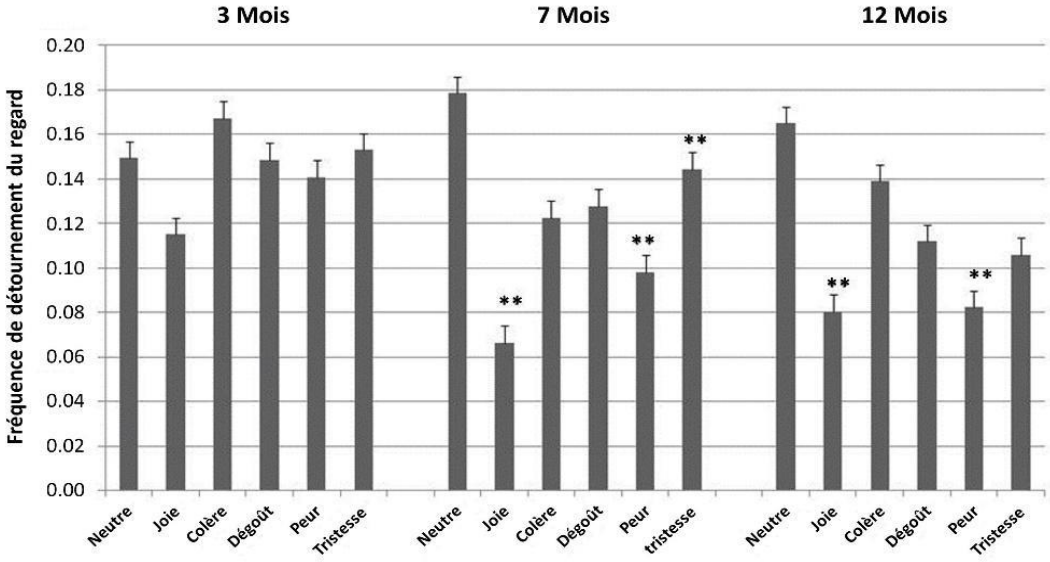


Figure 18 : Fréquence de détournement du regard des enfants selon les différentes expressions émotionnelles de l'avatar. Les différences significatives sont indiquées avec des * (* $p<.05$; ** $p<.01$). L'expression n'affectait pas la fréquence de détournement du regard des nourrissons de 3 mois. Les enfants de 7 mois détournaient moins souvent leur regard de l'avatar lorsque ce dernier exprimait la joie et la peur en comparaison avec la neutralité, ainsi que lorsque l'avatar exprimait la joie en comparaison avec la tristesse. Les enfants de 12 mois détournaient moins souvent leur regard lorsque l'avatar exprimait la joie et la peur en comparaison avec la neutralité.

Des ANOVAs effectuées sur la fréquence de détournement du regard pour chaque groupe d'âge, et prenant en considération les facteurs Expression (6) et Regard (2), ont permis de révéler, dans un premier temps, une absence d'effet de l'Expression des avatars chez les nourrissons de 3 mois [$F(5, 175)= 1.27$, $p=. 275$, $\eta p^2= 0.035$]. Il a pu être observé, dans un second temps, que l'Expression de l'avatar avait un effet significatif aussi bien chez les enfants de 7 mois [$F(5, 170)= 7.37$, $p<.0001$, $\eta p^2= 0.178$], que chez ceux de 12 mois [$F(5,$

160)= 3.73, p<0.01, ηp^2= 146]. Comme observable en **figure 18**, les enfants de 7 et 12 mois ont détourné plus fréquemment leur regard des avatars lorsqu'ils étaient neutres plutôt que lorsqu'ils exprimaient la joie et la peur (tous les *ps*<.01, en test de Tukey). De plus, les enfants de 7 mois ont plus fréquemment détourné leur regard lorsque les avatars exprimaient la tristesse plutôt que la joie (p<.01, en test de Tukey).

3.4. DISCUSSION

Par le recours à la poursuite des mouvements oculaires et au codage des réactions faciales d'enfants de 3, 7 et 12 mois face à des avatars dynamiques exprimant 6 émotions de base, cette étude avait pour objectif d'étudier les stratégies visuelles d'exploration des expressions et les réactions faciales des enfants face aux visages émotionnels, ainsi que leur ontogenèse. Dans cette discussion, nous présenterons et discuterons les résultats relatifs aux stratégies d'explorations des expressions émotionnelles dans un premier temps, pour ensuite passer aux résultats concernant les réactions faciales des jeunes enfants. Enfin, nous finirons cette discussion en mettant en cohérence les résultats issus de ces deux paramètres comportementaux et discuterons des perspectives que cette étude laisse envisager.

3.4.1. Discussion sur l'exploration visuelle des expressions faciales

Au moyen de la poursuite des mouvements oculaires des enfants à 3, 7 et 12 mois, nous avons pu observer qu'en accord avec notre prédiction, les stratégies d'exploration des expressions faciales évoluaient progressivement, au cours de la première année, d'un pattern n'intégrant pas les variations des éléments faciaux vers un pattern guidé par les actions faciales émotionnellement pertinentes. En effet, là où les nourrissons de 3 mois n'ont manifesté aucun effet de l'expression faciale sur leur exploration visuelle, les enfants de 7 et 12 mois ont exploré de façon différenciée les éléments faciaux distinctifs de l'expression en accord avec l'émotion exprimée.

A. Le pattern d'exploration des expressions chez l'enfant de 7 mois et plus

Les résultats obtenus montrent qu'à partir de 7 mois les enfants sont capables d'atteindre spécifiquement des éléments faciaux distinctifs selon l'expression qu'ils doivent traiter. De plus, les éléments faciaux spécifiquement explorés par les enfants de plus de 7 mois, sont similaires à ceux rapportés chez l'adulte (Gosselin & Schyns, 2001 ; Kret et al., 2013 ; Lunqvist, Esteces & Öhman, 1999 ; Schurgin et al., 2014 ; Schyns, Bonnar & Gosselin, 2002 ; Smith et al., 2005) et correspondent aux zones où les variations entre expressions sont les plus fortes (i.e., zones de moindre recouvrement) (Calder et al., 2000 ; Calvo & Nummenmaa, 2008 ; Smith et al., 2005). Les enfants exploraient plus longtemps la région des yeux lorsqu'ils étaient face à un visage de colère ou de peur, étant donné que c'est au niveau de cette région que sont présents des composants visuels typiques et distinctifs de ces expressions (i.e., écarquillement des yeux et froncement des sourcils). La région des yeux était explorée significativement moins longtemps lorsque les visages exprimaient la joie, puisque l'intérêt des enfants se déplaçait sur la région de la bouche (i.e., étirement de la bouche et dents découvertes). Le haut du nez attirait plus l'attention des enfants lorsque le visage exprimait le dégoût, signifiant ainsi que les enfants se focalisaient sur un élément distinctif de cette expression localisé sur cette région : le plissement du nez. Enfin, les enfants ont passé plus de temps sur la région du bas de nez lorsque l'avatar exprimait la joie (et aussi lorsqu'il exprimait le dégoût pour les enfants de 12 mois).

Cette focalisation du regard sur une zone du visage jouant un rôle limité dans l'expression des émotions (excepté pour le dégoût) peut sembler en premier lieu contre-intuitive, mais elle pourrait indiquer que l'enfant vient se focaliser sur une région se situant à l'intermédiaire de différents éléments d'intérêt pour le traitement de la joie (i.e., le sourire, l'élévation des joues, retroussement et plissement de la peau sous les yeux) (Baudouin, Monnot, Durand & Schaal, 2012). De la même façon, les nourrissons n'ont pas spécifiquement plus exploré une région lorsque l'avatar exprimait la tristesse. Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'expression de tristesse implique plus un traitement de type holistique intégrant à la fois les éléments du haut et du bas du visage (i.e., sourcils et bouche) (Durand et al., 2007). Dans l'ensemble, les résultats montrent donc qu'à partir de 7 mois, les stratégies d'exploration visuelle des expressions impliquent un engagement attentionnel vers les zones du visage sur lesquelles les AUs spécifiques/représentatives de l'expression qu'ils observent sont présentes (Ekman & Friesen, 1978).

B. Le pattern d'exploration des expressions faciales chez les nourrissons de 3 mois

Pour les nourrissons de 3 mois, l'absence d'effet de l'expression sur les stratégies d'exploration était inattendue. En effet, étant donné que différentes études rapportent que les enfants de cet âge discriminent et préfèrent les visages de joie vis-à-vis des visages renfrognés (Barrera & Maurer, 1981 ; Young-Browne, Rosenfeld & Horowitz, 1977), nous nous attendions à ce qu'un pattern d'exploration distinctif soit observé pour l'expression de joie.

Un premier élément pouvant rendre compte de ces différences entre ce qui est rapporté au niveau comportemental et ce que nous observons au niveau des stratégies d'exploration visuelle, est la présence de différences méthodologiques entre notre étude et celles de la littérature sur les enfants de cet âge (e.g., recours à des avatar *vs* utilisation de photographies, utilisation d'expressions dynamiques *vs* statiques, nombres d'expressions présentées, différences dans la procédure expérimentale). Toutefois, une seconde hypothèse pouvant être formulée pour expliquer ces résultats, est que le traitement des expressions à 3 mois reposerait plus sur les voies sous-corticales (i.e., voies magnocellulaires) que sur les voies thalamo-corticales. En effet, il a clairement été établi que chez les nourrissons de 3 mois, l'exploration visuelle des visages impliquait une focalisation majoritaire sur la région des yeux (Hainline, 1978 ; Haith, Bargman, & Moore, 1977 ; Hunnius & Geuze, 2004 ; Maurer & Salapatek, 1976), tandis que les régions du bas du visage n'attiraient l'attention des enfants qu'à des âges plus avancés (Wilcox, Stubbs, Wheeler & Alexander, 2013). Il est donc hautement probable qu'à 3 mois, le traitement des AUs localisées sur le bas du visage repose sur un traitement visuel périphérique sous-tendu par les voies magnocellulaires. Ainsi, les enfants de 3 mois pourraient détecter, traiter, préférer et répondre aux visages de joie sans pour autant avoir besoin d'explorer directement la bouche. Cette même interprétation peut également s'appliquer pour d'autres AUs localisées ailleurs que sur la bouche.

C. L'importance relative des différents éléments faciaux dans le traitement des expressions faciales

Concernant le poids relatif des différents éléments internes du visage dans l'exploration visuelle des enfants, nos résultats indiquent que quel que soit leur âge ces

derniers ont passé la plupart de leur temps à explorer la région des yeux, suivie par la région de la bouche, puis le haut du nez, et enfin les régions de l'entre-sourcils et du bas du nez. La région oculaire et péri-oculaire représentait entre 42,7% et 44,1% du temps d'exploration des visages, confirmant ainsi l'attention prépondérante pour les yeux rapportée dans la littérature (Hainline, 1978 ; Haith, Begman & Moore, 1977 ; Hunnius & Geuze, 2004 ; Maurer & Salapatek, 1977 ; Oakes & Ellis, 2013 ; Wilcox et al., 2013). Parallèlement à cela, les nourrissons de 3 mois ont passé 2 fois plus de temps que les enfants plus âgés à explorer les éléments externes du visage (35,2% de temps d'exploration *vs* 17,5 et 15,4%, respectivement), tandis qu'ils ont passé deux fois moins de temps à explorer les éléments du centre et du bas du visage que les enfants plus âgés (i.e., bouche et nez ; 22,1% du temps d'exploration *vs* 40,4 et 40,6%).

Ces observations sont cohérentes avec les études précédentes rapportant une plus forte exploration des éléments internes (tout spécialement des yeux) chez les enfants de 2-3 mois, et une augmentation de la focalisation sur ces éléments internes chez les enfants plus âgés (Hainline, 1978 ; Haith, Begman & Moore, 1977 ; Hunnius & Geuze, 2004 ; Maurer & Salapatek, 1977 ; Oakes & Ellis, 2013 ; Wilcox et al., 2013). De plus, le fait que les enfants de différents âges n'engagent pas leur attention de la même façon vers les différents éléments internes a également été précédemment observé (Haith, Begman & Moore, 1977 ; Hunnius & Geuze, 2004 ; Oakes & Ellis, 2013 ; Wilcox et al., 2013). Nos résultats mettent notamment en avant qu'entre 3 et 7 mois, les enfants réallouent progressivement le temps passé à explorer les éléments externes du visage vers les éléments internes situés sur la partie basse du visage (i.e., les régions de la bouche et du nez). Une réallocation similaire de l'attention des éléments externes vers les éléments internes a déjà été rapportée par Hunnius et Geuze (2004) dans leur étude longitudinale chez les nourrissons de 6 à 26 semaines (voir aussi Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012). Cette redistribution de l'attention vers la bouche et le nez pourrait être de prime importance dans le développement des capacités de traitement des expressions faciales.

D. Stratégies d'exploration basées sur l'élément versus stratégies configurales

Certains aspects de nos résultats suggèrent que le développement des capacités de traitement des expressions faciales ne consiste pas uniquement en une modification des traitements basés sur les éléments (i.e., orientation spécifique de l'attention vers les éléments

pertinents), mais qu'il reposerait aussi sur le développement de stratégies exploratoires dédiées au traitement configural. Différentes études ont formulé l'hypothèse selon laquelle l'alternance/déplacement du focus attentionnel entre les principaux éléments faciaux pourrait refléter l'extraction des relations spatiales entre les éléments internes du visage (i.e., relations de second ordre) et donc le recours au traitement configural (Gallay, Baudouin, Durand, Lemoine & Lécuyer, 2006 ; Maurer, LeGrand & Mondloch, 2002 ; Mondloch, LeGrand & Maurer, 2002 ; Xiao et al., 2012). De plus, d'autres études ont mis en avant l'importance du traitement configural dans l'intégration des expressions (Calder, Young, Keane & Dean, 2000 ; Chambon, Baudouin & Franck, 2006 ; Durand, Gallay, Seigneuric, Robichon & Baudouin, 2007). Dans leur étude sur les visages inexpressifs, Neth et Martinez, mettent en avant ce rôle clé du traitement configural en démontrant que les modifications des relations spatiales des éléments internes suffisent à produire une perception d'expressions faciales différentes, variant selon que les éléments internes soient rapprochés ou éloignés les uns des autres (Neth & Martinez, 2009, 2010 ; voir aussi Martinez & Du, 2012). Ainsi, l'engagement visuel vers la bouche et le nez observé chez les enfants de 7 et 12 mois dans notre étude, pourrait indiquer qu'à ces âges les enfants ont un recours au traitement configural différent des nourrissons de 3 mois. L'attention accrue vers la partie centrale du visage (i.e., la région du nez) pourrait indiquer l'extraction d'informations holistiques permettant la capture rapide des différentes caractéristiques faciales.

A l'âge de 3 mois, si l'enfant effectue un traitement holistique, celui-ci reposerait sur des fixations au niveau de la région des yeux. A mesure qu'ils grandissent et qu'ils se reposent de plus en plus sur les éléments du bas du visage, le regard des enfants se déplacerait vers le bas du visage, permettant ainsi d'inclure les informations de la bouche et d'intégrer à la fois les éléments présents sur le haut et le bas du visage. Cette dernière hypothèse permet de rendre compte de l'augmentation du temps de regard vers le nez entre l'âge de 3 et 7 mois, même si cette région n'apparaît pas comme étant fortement informative concernant l'expression (ce qui est le cas pour la plupart des expressions à l'exception du dégoût). Cet accès précoce aux informations configurales pourrait être un contributeur important de la mise en place de l'expertise dans le traitement du visage et des expressions faciales émergeant au cours de la seconde moitié de la première année, puisqu'elle fournirait le code holistique guidant l'exploration subséquente des éléments faciaux pertinents.

E. L'impact de l'orientation du regard sur les stratégies d'exploration visuelle

De nombreuses recherches sur la référenciation sociale chez le jeune enfant ont montré que dès la fin de la première année l'enfant est capable d'intégrer et d'utiliser à la fois l'expression faciale et l'orientation du regard de l'émetteur en vue d'adapter ses comportements lorsqu'il est confronté à une situation ou à un objet ambigu (Hertenstein & Campos, 2004 ; Klinnert, 1984 ; Moses et al., 2001). De plus, des études en EEG rapportent que l'amplitude de la Nc des enfants de moins d'un an est modulée selon l'émotion et l'orientation du regard de l'émetteur (e.g., Hoehl et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2008), et ce même chez les nourrissons de 3 mois (Hoehl, Wiese & Striano, 2008).

Contrairement aux prédictions que ces éléments de la littérature laissent entendre, nous n'avons observé aucun effet de l'orientation du regard de l'avatar sur l'exploration visuelle des enfants. A notre connaissance, la plupart des études, en EEG et en référenciation sociale rapportant des effets combinés du regard et de l'expression sur les réponses des jeunes enfants, ont utilisé pour stimuli des visages (i.e., photographie ou personnage réel) exprimant différentes émotions tout en *regardant ou non* un objet. L'absence d'objet concurrent au visage expressif dans notre étude pourrait avoir créé une situation particulière n'encourageant pas le couplage entre orientation du regard et l'émotion exprimée. Enfin, la procédure expérimentale à laquelle nous avons eu recours dans cette étude (i.e., plusieurs expressions se suivant les unes les autres de façon relativement rapide et avec de multiples changements de l'orientation du regard) peut avoir minimisé les effets du regard[6].

[6] Certains aspects des données suggèrent tout de même que le regard pourrait avoir une influence sur l'exploration visuelle de certaines expressions, malgré l'absence d'interaction significative impliquant ce facteur. En vue d'explorer cette possibilité, nous avons effectué des ANOVAs similaires à celles précédemment effectuées, mais en réduisant le facteur Expression à 3 émotions (i.e., colère, joie et peur). Cette analyse était également effectuée uniquement sur la région des yeux puisqu'elle contient des AUs pertinentes pour le traitement de ces 3 expressions. Un second argument justifiant la restriction à ces trois expressions est que le recours au même matériel chez l'adulte a montré que celles-ci déclenchaient des réactions faciales distinctes sur le visage des participants en fonction de l'orientation du regard de l'émetteur (Soussignan et al., 2013). Ces analyses ont révélé la présence d'une interaction significative entre l'Expression, l'Age et l'Orientation du Regard [$F(4,316)=3.54$, $\varepsilon=.98$, $p<.01$, $\eta p2=.04$]. Les tests post-hoc ont indiqué que l'orientation du regard n'avait un effet que chez les enfants de 12 mois pour l'expression de colère ($p<.05$) : les enfants exploraient moins longtemps la région des yeux sur les avatars exprimant la colère avec un regard direct plutôt qu'évitant (149 ms *vs* 212 ms).

3.4.2. Discussion sur les réactions faciales aux expressions émotionnelles

Bien que les résultats ne mettent pas en évidence une correspondance motrice entre les expressions des avatars et les réactions faciales des nourrissons, nous avons pu observer qu'en accord avec notre prédiction les réactions des nourrissons en lien avec les visages expressifs positifs et négatifs de l'avatar changeaient/évoluaient au cours de la première année. Aux trois âges, les enfants exprimaient plus d'AUs positives lorsqu'ils étaient face à l'avatar exprimant la joie plutôt qu'une émotion négative. Concernant leurs réactions faciales négatives, les enfants de 7 et 12 mois ont exprimé plus d'AUs négatives lorsqu'ils étaient face à des expressions négatives plutôt que positives, tandis qu'aucune modulation dans l'émission d'AUs négatives selon l'expression observée n'était présente chez les enfants de 3 mois. De plus, les patterns de réactions faciales à 12 mois différent de ceux à 7 mois, en cela que les plus âgés ont exprimé des réponses plus différenciées (i.e., plus forte sensibilité à l'orientation du regard des visages exprimant des émotions négatives et meilleure imitation de la valence des expressions positives et négatives de l'avatar). Les résultats suggèrent qu'à mesure du développement de l'enfant s'affirme une différenciation progressive dans la discrimination et dans les réponses basées sur la valence.

A. Y a-t-il reproduction des expressions faciales observées ?

L'inspection des réactions faciales des enfants n'a pas fourni d'élément validant la présence d'une reproduction sélective des AUs correspondant aux marqueurs faciaux typiques des différentes expressions présentées, et ce quel que soit leur âge. Seule la présentation de l'expression de joie a entraîné une augmentation de la production de sourires (mesurée avec l'AU 12) chez les enfants. Les différentes expressions faciales négatives (colère, dégoût, peur et tristesse) n'ont pas déclenché de réponses spécifiques. Enfin, de façon générale, nous n'avons observé ni effet de l'âge de l'enfant, ni effet du regard de l'avatar sur la correspondance entre les actions faciales vues et celles produites par les enfants. Ainsi, nos résultats ne soutiennent pas la vision classique qui considère la présence d'un mimétisme facial basé sur l'hypothèse d'une mise en correspondance motrice avec l'acte facial observé. En effet, contrairement aux prédictions faites par cette hypothèse, les résultats ne confirment

pas la présence d'une imitation automatique des mouvements faciaux impliqués dans les expressions émotionnelles observées. Les données sont en accord avec les études sur les interactions en face à face chez les enfants de 4 et 5 mois, démontrant que les réponses des nourrissons ne consistent pas en une reproduction de l'expression faciale et vocale de la mère ou de l'expérimentateur (D'Entremont & Muir, 1999 ; Montague & Walker-Andrews, 2001).

Ce manque de spécificité dans la reproduction des expressions faciales d'autrui pourrait refléter un manque de différenciation et d'organisation des éléments faciaux en des expressions émotionnelles discrètes et stables au cours de la première année (Camras et al., 2007 ; Hoehl & Striano, 2010a ; Oster, Hegley & Nadel, 1992). Elle pourrait également refléter une immaturité des mécanismes cérébraux impliqués dans une reproduction automatique des actions faciales se basant sur la perception des différents éléments faciaux (Hees & Fischer, 2013). De plus, dans la littérature adulte, les données issues des études en électromyographie fournissent des éléments contredisant l'hypothèse d'une reproduction automatique de l'acte moteur lors de la perception des expressions faciales, étant donné la présence d'influences du contexte et de l'orientation du regard sur les réactions faciales (Hess & Fischer, 2013 ; Soussignan et al., 2013, 2015).

B. Réaction émotionnelle au signal communiqué par l'expression versus imitation du signal émotionnel perçu?

Les résultats obtenus ne montrent pas la présence de réactions émotionnelles aux intentions signalées par l'expression. En effet, quel que soit l'âge des enfants, nous n'avons pas observé de réactions faciales pouvant indiquer la présence de réactions émotionnelles spécifiques à la signification des expressions. Par exemple, l'expression de colère de l'avatar n'a pas déclenché d'expression de colère (AU 4) ou de peur (AUs 1, 2, 1+2+4) chez les enfants, tandis que l'expression de peur avec regard évitant n'a pas produit de réaction faciale de peur chez les enfants, comme cela a pu être précédemment démontré chez l'adulte (Soussignan et al., 2013).

Nous avons pu observer qu'à 3 mois les enfants souriaient plus en réaction à l'avatar exprimant la joie avec un regard direct plutôt qu'en réaction à l'avatar neutre ou exprimant des émotions négatives. Cela suggère une forte sensibilité des nourrissons de 3 mois à

l'orientation du regard, notamment dans le cadre des échanges émotionnels positifs, comme évoqué dans la littérature antérieure (Bertin & Striano, 2006 ; Hains & Muir, 1996). Toutefois, les résultats ont également montré qu'à cet âge les enfants produisaient autant d'AUs négatives, quelle que soit l'expression faciale à laquelle ils étaient exposés.

A 7 mois, les enfants ont exprimé plus d'AUs négatives aux expressions de peur et de tristesse de l'avatar avec regard évitant plutôt que par rapport aux autres expressions. Deux interprétations peuvent rendre compte de ces résultats. Les données semblent indiquer qu'à cet âge les enfants ont évalué la signification de l'expression de peur et de tristesse, et ont ainsi reproduit la valence perçue de l'expression faciale de l'avatar. Une seconde possibilité serait qu'à 7 mois les enfants réagissent simplement négativement au fait que l'avatar les évite du regard, puisque cela signale l'interruption de l'échange social. Les études au niveau comportemental et en EEG n'ont pas montré, jusqu'à maintenant, d'effet robuste de l'orientation du regard sur le traitement de l'expression de peur chez les enfants de 7 et 12 mois, hormis lorsque l'expression était clairement présentée dans un contexte de référenciation sociale (i.e., situation ambiguë, présence d'un objet nouveau/ambigu) (Hoehl et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2010c ; Matsunaka & Hiraki, 2014). De plus amples études sont donc nécessaires pour pouvoir distinguer laquelle de ces deux hypothèses rend compte des résultats observés chez les enfants de 7 mois.

A 12 mois, les enfants ont exprimé plus d'AUs négatives lorsque l'avatar exprimait la colère, la peur et le dégoût avec un regard direct (mais pas lorsqu'il avait un regard évitant) plutôt que lorsqu'il était neutre ou exprimait la joie. Ces derniers résultats suggèrent qu'à un an, les enfants traitent la valeur émotionnelle des expressions négatives différemment des 7 mois. En effet, les enfants de 12 mois exprimaient plus de réactions négatives aux expressions négatives de l'émetteur en cas de regard direct, tandis qu'à 7 mois les enfants faisaient de même en cas de regard évitant. Les études en EEG sur les nourrissons de 4 à 7 mois s'intéressant aux modulations de la Nc ont montré que l'allocation attentionnelle était plus forte pour les visages de colère avec regard direct plutôt qu'évitant (Hoel & Striano, 2008 ; Striano et al., 2006 ; Vanderwert et al., 2014). Toutefois, ce n'est qu'aux alentours du 12ème mois que les études en référenciation sociale ont pu solidement démontrer la présence d'une adaptation des réponses comportementales selon l'orientation du regard et l'émotion exprimée par l'émetteur (Feinman & Lewis, 1983 ; Hernstein & Campos, 2004 ; Klinnert, 1984 ; Moses et al., 2001 ; Sorce et al., 1985 ; Stenberg, 2003 ; Striano & Rochat, 2000). De plus, c'est au même âge qu'il a pu être prouvé que les enfants étaient capables d'utiliser l'expression et la

direction du regard d'autrui pour déterminer les intentions d'action de l'adulte (e.g., Phillips, Wellman & Spelke, 2002). Les résultats pourraient donc refléter une étape clé du développement socio-émotionnel puisque, bien qu'ils ne montrent pas une plus forte réactivité en cas de congruence entre expression et orientation du regard comme décrit dans la littérature adulte (Moody et al., 2007 ; Schrammel et al., 2009 ; Soussignan et al., 2013), les enfants de un an ont tout de même montré une considération de l'orientation du regard lors du traitement de l'expression (i.e., expression orientée ou non vers soi).

Au vu des résultats, il apparaît donc que les réactions faciales des enfants aux différentes expressions ne reflètent ni une reproduction de l'acte moteur, ni une réaction émotionnelle au signal véhiculé par l'expression à laquelle ils sont exposés, mais plutôt une reprise de la valence émotionnelle perçue, comme proposé par Hess & Fisher (2013, 2014). Dans cette hypothèse, les auteurs proposent que l'imitation des expressions émotionnelles ne consisterait pas en une reproduction objective et exacte des actions faciales observées, mais en une imitation de la valence de l'émotion se basant sur l'interprétation/perception des états et intentions d'autrui signalés par leur expression. Les résultats indiquent également que cette imitation de la valence perçue des expressions faciales évolue progressivement au cours de la première année. Contrairement aux enfants les plus âgés, les nourrissons de 3 mois ne semblent pas reproduire la valence des expressions vues, bien qu'ils montrent une sensibilité aux visages de joie avec regard direct. Tandis que par rapport aux enfants de 7 mois, les 12 mois ont montré des réponses plus différenciées aux expressions puisqu'ils reproduisaient fidèlement la valence des différentes expressions aussi bien positives que négatives, et qu'ils étaient plus sensibles à la présence d'un contact œil à œil lorsque le visage exprimait une émotion négative.

C. Les effets de l'expression faciale sur le temps de regard et le détournement du regard

Les nourrissons de 3 mois regardaient plus longtemps le visage de l'avatar lorsque ce dernier avait un regard direct plutôt qu'évitant, sans effet de l'émotion exprimée. Contrairement aux plus jeunes, les enfants de 7 et 12 mois ont passé plus de temps à regarder les expressions positives et négatives (plus de 80% du temps de présentation), plutôt que l'expression neutre, et ont détourné plus fréquemment leur regard de l'avatar neutre plutôt que de l'avatar exprimant la joie ou la peur. Ainsi, les résultats observés sur le temps de regard

des nourrissons de 3 mois viennent reconfirmer la sensibilité précoce des nourrissons à l'orientation du regard et la préférence pour les visages établissant un contact visuel réciproque (Farroni et al., 2002 ; Symons et al., 1998). Concernant les nourrissons plus âgés, malgré quelques contradictions (Hunnius et al., 2011), nos données s'alignent avec celles issues des études comportementales et en EEG chez l'enfant de 7 mois décrivant : une exploration préférentielle des visages de peur par rapport aux visages de joie (Kotsoni, de Haan & Johnson, 2001 ; Nelson & Dolgin, 1985), ainsi qu'une Nc plus ample pour la peur (Leppänen et al., 2007 ; Nelson & Haan, 1996) et une difficulté au désengagement attentionnel lorsque cette émotion est exprimée (Peltola, Leppänen, Palokangas & Hietanen, 2008).

Les analyses sur le temps d'exploration et la fréquence de détournement du regard fournissent également de nouveaux arguments en faveur de l'hypothèse selon laquelle les réactions faciales de l'enfant reflètent une imitation basée sur l'évaluation de la valence plutôt qu'une réaction émotionnelle à l'expression. En effet, les données nous montrent ici que les enfants de 7 et 12 mois ne manifestent pas de réaction d'évitement vis-à-vis des expressions négatives ; au contraire, leur attention est préférentiellement attirée par celle-ci. Ainsi, il apparaît que l'augmentation des réactions faciales négatives des enfants face aux expressions négatives ne reflète pas une réaction de détresse au signal menaçant, mais bien une imitation de la valence perçue.

3.4.3. Mise en cohérence et discussion de l'ensemble des données récoltées

Dans un premier temps, les données sur les nourrissons de 3 mois montrent qu'à cet âge les enfants n'explorent pas spécifiquement les éléments faciaux distinctifs de l'expression observée, et que cette indifférenciation des stratégies d'exploration est accompagnée d'une absence de production mimétique des AUs négatives : à 3 mois les enfants expriment des réactions faciales négatives aussi bien lorsque que l'avatar exprime des expressions négatives que positives. Ces résultats s'alignent avec les données de la littérature montrant une attraction préférentielle pour les visages de joie (Kuchuk et al., 1986), une discrimination de la joie vis-à-vis des visages renfrognés chez les nourrissons de cet âge, ainsi que des difficultés à la discrimination d'autres paires d'expressions (e.g., tristesse et surprise) (Barrera & Maurer, 1985 ; Young-Browne, Rosenfeld & Horowitz, 1977). Les résultats obtenus

suggèrent que les stratégies d'exploration visuelle assurant l'extraction de l'information sont encore en cours de mise en place à cet âge, ce qui pourrait contribuer au manque de discrimination/distinction entre les expressions (notamment les négatives) observées chez ces nourrissons.

Dans un second temps, à 7 et 12 mois, les enfants ont eu recours à des patterns d'exploration visuelle différenciés impliquant une focalisation sur les éléments distinctifs de l'expression émotionnelle. Ces modifications développementales dans les stratégies d'exploration ne peuvent s'expliquer par une simple attraction vers les régions faciales de forte variation selon l'expression basée sur le mouvement. En effet, si tel était le cas, nous aurions observé un pattern similaire chez les nourrissons de 3 mois étant donné la présence d'une sensibilité aux caractéristiques de bas niveau, telles que le mouvement, au cours des premiers mois de vie (Vinter, 1986). De plus, nous avons pu observer que cette évolution des stratégies d'exploration coïncidait avec l'émission de réactions faciales distinctes aux expressions : les enfants de 7 et 12 mois perçoivent la signification des expressions, et plus particulièrement la différence de valence entre les expressions positives et négatives, et les imitent de façon distincte. Ainsi, entre 3 et 7 mois, se différencient à la fois les stratégies d'exploration des expressions, ainsi que les réactions faciales imitatives. D'autre part, nos résultats sont en accord avec la littérature rapportant une émergence du biais de négativité aux alentours du sixième mois (e.g., Peltola et al., 2009 ; Vaish et al., 2008), puisque les améliorations dans le décodage et les réponses faciales aux expressions négatives que nous avons observées étaient accompagnées d'une augmentation de l'intérêt porté sur les émotions signalant un stimulus nocif ou une menace.

Enfin, entre 7 et 12 mois, a pu être montré un affinement des stratégies d'exploration et une complexification des réponses faciales aux expressions. A 12 mois, les enfants ont plus exploré la bouche de l'avatar qui présentait une dépression des lèvres (AU 15) pour la tristesse, tandis que pour cette expression les enfants de 7 mois exploraient plus la région des yeux (AUs 1+4). En parallèle, les analyses en BabyFACS ont révélé que les enfants de un an avaient des réactions faciales négatives distinctes pour de plus nombreuses émotions exprimées par l'avatar (i.e., distinction colère, dégoût et tristesse *versus* joie et neutre). Il a également pu être observé que l'orientation du regard agissait sur les réactions faciales aux expressions, puisqu'à cet âge les enfants ont exprimé plus de réactions faciales congruentes aux expressions négatives avec un regard direct.

Dans leur ensemble, les résultats issus des données en poursuite de mouvements oculaires et en BabyFACS suggèrent que des changements s'opèrent à la fois entre 3 et 7 mois, et entre 7 et 12 mois. Ces changements semblent refléter une amélioration dans l'habileté à identifier les expressions négatives ainsi qu'une augmentation de la sensibilité/réactivité à la valeur émotionnelle de l'expression de l'autre, auxquels l'établissement de stratégies d'exploration visuelle spécifiques et distinctes semble contribuer. De plus, les différents changements observés, ici sur les stratégies d'exploration et les réactions faciales aux expressions, sont en accord avec l'expansion du développement socio-émotionnel au cours de la seconde moitié de la première année de vie rapportée dans la littérature (pour une revue voir Vaish et al., 2008). En effet, dans les études antérieures, il a été répétitivement démontré que, par rapport aux enfants de 3 mois, c'est au cours de la seconde moitié de la première année que s'observe une amélioration des capacités de discrimination et de catégorisation des expressions (Kestenbaum & Nelson ; Kotsoni et al., 2001 ; Ludemann, 1991 ; Ludemann & Nelson, 1988 ; Nelson & Dolgin, 1985), ainsi qu'une plus grande capacité à adapter le comportement en fonction de l'expression (Hernstein & Campos, 2004 ; Matsunaka & Hiraki, 2014 ; Peltola et al., 2009 ; Sorce, Emde & Campos, 1985 ; Stenberg, 2003 ; Striano, Vaish & Benigno, 2006).

Ces différences observées entre les trois âges considérés peuvent avoir pour origine de multiples facteurs. L'un d'entre eux est la maturation cérébrale. En effet, entre 3 et 6 mois avec le développement de différentes régions cérébrales et de leur connectique, l'enfant accède progressivement au contrôle volontaire de son attention et peut à partir du 6éme mois engager, désengager et déplacer son attention à sa guise et ainsi contrôler l'information sur laquelle se focalise son attention (Colombo, 2001 ; Richards, Reynolds & Courage, 2010). Concernant toujours la maturation des structures cérébrales, de fortes modifications structurelles et fonctionnelles du cortex frontal et du cortex associatif s'effectuent à la fin de la première année (Chugani & Phelps, 1986 ; Matsuzawa et al., 2001 ; Richards, 2007).

Un second facteur pouvant jouer un rôle majeur dans cette amélioration des capacités de traitement et de réponse aux expressions faciales au cours de la première année, est l'expérience. Au travers de ses expériences avec les différentes expressions, l'enfant pourrait non seulement affiner ses représentations sur les expressions, mais aurait également lieu une spécialisation des circuits cérébraux en charge du traitement des expressions faciales (Leppänen & Nelson, 2009 ; Nelson, 2001 ; Pascalis & Kelly, 2009). Ce rôle de l'expérience dans le développement d'une expertise de traitement des expressions a

notamment pu être démontré au moyen des études sur les enfants de mères dépressives (Bornstein et al., 2011 ; Hermandez, Field, Diego, Vera & Pickens, 2006). De plus, des modifications des stratégies d'exploration des visages ont pu être rapportées à la fois en lien avec le développement d'une expertise dans le traitement des visages de l'ethnie d'appartenance (Liu et al., 2010, 2015 ; Xiao, et al., 2012) et pour le traitement audio-visuel du langage (Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012). La variation et la variété des émotions exprimées par les parents envers leur enfant au cours de la première année peuvent également contribuer aux modifications observées. Durant les premiers mois de vie, les nourrissons sont fréquemment exposés aux visages souriants de leurs parents et vont répondre à ce signal, tandis qu'ils seront moins exposés aux expressions négatives. Cela pourrait expliquer pourquoi les nourrissons de 3 mois n'ont pas semblé traiter de façon spécifique/différenciée les expressions négatives et n'ont pas reproduit la valence de ces expressions. A l'inverse, il est supposé qu'avec l'acquisition progressive de la locomotion autonome, les enfants vont expérimenter plus d'affects négatifs (e.g., frustration, peur) et être exposés plus fréquemment à des expressions faciales négatives de la part des parents (Biringen et al., 1995 ; Campos et al., 1992 ; Vaish et al., 2008). Il est par ailleurs considéré que ce dernier point contribuerait à l'émergence du biais de négativité à l'approche du sixième mois. Ainsi, l'amélioration des capacités socio-émotionnelles au cours de la seconde moitié de la première année observée dans notre étude (i.e., dans les stratégies d'exploration et les réponses mimétiques aux expressions) pourrait s'expliquer soit par une augmentation de la fréquence d'exposition aux émotions négatives, soit par un effet cumulatif de l'exposition aux différentes expressions et à leurs conséquences.

Afin de pouvoir préciser le rôle des expériences de l'enfant avec les différentes expressions sur le développement des stratégies d'exploration visuelle et de la réponse à la signification des expressions, il serait nécessaire que de futures études viennent investiguer plus rigoureusement leur variation au cours de la première année, ainsi que leurs effets sur le développement socio-émotionnel de l'enfant. A l'heure actuelle, les études se sont cantonnées aux réponses des parents à un questionnaire et non à l'observation comportementale directe, ou encore à l'étude des jeunes enfants de mère dépressive dont la pathologie n'intègre pas uniquement des variations dans la fréquence d'émission des différentes expressions. Toutefois, les travaux de Sugden et collaborateurs (2015) devraient pouvoir apporter de nouveau éléments puisqu'ils sont actuellement en train de mesurer la fréquence d'exposition aux différentes expressions en analysant des vidéos prises en situation quotidienne par une

caméra posée sur la tête du nourrisson. Une autre façon permettant de s'intéresser aux impacts de l'expérience quotidienne avec les différentes expressions serait d'étudier les capacités de traitement et de réponse aux expressions d'enfants de mère souffrant de paralysie faciale partielle ou encore de mère ayant subi des opérations de chirurgie esthétique ayant figé l'activité de muscles faciaux impliqués dans l'émission d'expressions.

En vue là aussi de préciser l'ontogenèse des capacités socio-émotionnelles, il semble également être d'intérêt de poursuivre l'étude des effets de l'orientation du regard sur le traitement des expressions faciales sur des enfants plus âgés. Le but ici étant de préciser à quel moment au cours du développement les enfants évaluent les émotions comme plus pertinentes lorsqu'il y a congruence avec l'orientation du regard (i.e., émotion orientée vers l'approche et regard direct, émotion orientée vers l'évitement et regard détourné).

Enfin, la focalisation sur les éléments les plus distinctifs et représentatifs de l'expression observée chez les enfants de 7 et 12 mois pourrait être un contributeur important du développement socio-émotionnel puisqu'il permettrait une amélioration des capacités de discrimination et de catégorisation des expressions (Vanderwert et al., 2014), mais aussi un affinement des représentations sur les expressions puisqu'elles intégreraient une emphase sur leurs éléments distinctifs. Toutefois, un autre bénéfice de cette focalisation sur les éléments spécifiques des expressions faciales est qu'elle pourrait permettre à l'enfant d'extraire et de lier les informations du contexte multi-sensoriel coïncidant avec l'émission des expressions (comme suggéré par Lewkowicz, 2010 ; Lewokowicz & Hansen-Tift, 2012). Dans leur étude sur le traitement audiovisuel de visages parlant chez les enfants de moins de un an, les auteurs ont formulé l'hypothèse que la focalisation sur la bouche contribuerait fortement à l'acquisition des capacités de traitement du langage, puisqu'elle permettrait la perception et la liaison des informations audio-visuelles redondantes. Ainsi, en accord avec cette hypothèse, il semble envisageable que la focalisation sur les éléments spécifiques des expressions contribue au développement de l'expertise dans le traitement des visages émotionnels grâce à l'accès à la redondance inter-sensorielle qu'elle permet. De plus, la mise en lien entre l'expression et le contexte multi-sensoriel pourrait favoriser l'attribution de signification aux expressions et donc l'accès à leur contenu émotionnel. Il serait donc intéressant que de futures recherches viennent étudier quand et comment, au cours du développement, l'exploration des visages expressifs et les réponses aux expressions sont modifiées par les informations contextuelles relayées par les différents sens. En lien avec cette suggestion, nous sommes venus étudier, au cours de l'une des prochaines expériences présentées au sein de ce manuscrit (Expérience 5),

si, chez les enfants de 7 mois, le contexte olfactif modulait le pattern d'exploration visuelle des visages et, plus spécifiquement, si ces modulations du pattern révélaient la présence d'une attente de la part de l'enfant quant à l'émotion que le visage devrait exprimer en réaction à l'odeur.

Chapitre 4 :
Nature et décours temporel du traitement cérébral des expressions faciales chez le nourrisson de 3 mois (Expérience 2)

4.1. INTRODUCTION

Le 3éme mois constitue un premier jalon du développement socio-émotionnel de l'enfant. En effet, il a pu être solidement démontré qu'à cet âge les nourrissons commencent à discriminer les expressions. Ils différencient et sont préférentiellement attirés par les visages de joie vis-à-vis des visages neutres et renfrognés (i.e., colère, surprise, tristesse) (Barrera & Maurer, 1981 ; Kuchuk et al., 1986 ; Young-Browne et al., 1977). Toutefois, à 3 mois cette capacité de discrimination se limite à la joie, puisqu'ils ne discriminent pas encore les expressions négatives les unes par rapport aux autres. En effet, ce n'est qu'aux alentours du 7ème mois que la capacité de l'enfant à discriminer les expressions s'étend aux émotions négatives (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.**). En outre, les résultats de notre première étude corroborent ces observations de la littérature classique, puisqu'à 3 mois – malgré l'absence de différence dans le pattern d'exploration des différentes expressions et dans les réactions faciales négatives - les nourrissons émettaient significativement plus de sourires lorsque l'avatar exprimait de la joie avec un regard direct plutôt que lorsqu'il était neutre ou exprimait une émotion négative.

Au cours de leur étude en TEP (i.e., Tomographie par Emission de Positrons), Tzourio-Mazoyer et collaborateurs (2002) ont constaté que dès 2 mois, le traitement des visages recrute les différentes régions cérébrales définies comme centrales au traitement des visages chez l'adulte. Toutefois, en EEG, c'est à 3 mois qu'ont pu être observées les premières preuves d'une sensibilité des réactions cérébrales à la structure du visage. Il est notamment rapporté que l'activité relevée sur des composantes reflétant spécifiquement l'encodage de la structure faciale (i.e., la N290 et la P400) diffère selon que le stimulus soit un visage ou un autre type de stimulus (i.e., voiture, maison, visage dont les éléments internes ont été déplacés, etc.) (Gliga & Dehaene-Lambertz, 2005, 2007 ; Macchi-Cassia et al., 2006).

A notre connaissance aucune étude n'a encore spécifiquement étudié les réactions cérébrales des nourrissons de 3 mois aux différentes expressions faciales en EEG ; laissant ainsi un point d'ombre sur les questions relatives à la nature et au décours temporel de la distinction des expressions au niveau cérébral chez les enfants de cet âge. Il a toutefois pu être observé dans une étude en potentiels évoqués que chez les 3 mois la Nc (i.e., composante indiquant l'engagement de l'attention) est plus ample en réaction à des objets précédemment vus avec un visage de joie les fixant ou avec un visage de peur (peu importe l'orientation de

son regard), indiquant ainsi une plus forte allocation attentionnelle vers ces objets (Hoehl, et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2010b, 2010c). Néanmoins, cette étude ne rapporte que des effets sur les réactions aux objets et non une réaction « directe » aux expressions faciales. Dans leur étude sur les nourrissons un peu plus âgés de 4 mois, Rigato et collaborateurs (2010) ont démontré que les visages de joie accéléraient la P400, tandis qu'une plus forte amplitude de la N290 et de la Nc était observée en réaction aux visages de joie avec regard direct ; indiquant ainsi une intégration différenciée des visages selon leur expression. Enfin, chez les 7 mois, la complexification des capacités de discrimination (i.e., discrimination ne se limitant plus seulement à la joie) rapportée au niveau comportemental a pu être corroborée au travers des études en EEG (Hoehl & Striano, 2008 ; Kobiella et al., 2008 ; Vanderwert et al., 2014 ; Yrttiaho et al., 2011). En effet, chez les enfants de cet âge une N290 et une P400 plus négatives ont par exemple pu être observées en réaction aux visages de peur par rapport aux visages de colère (Hoehl & Striano, 2008).

Ainsi, nous nous sommes donnés pour objectif dans cette étude de clarifier la nature et le décours temporel de la discrimination des expressions faciales chez les nourrissons de 3 mois, et ce, par l'étude de leurs réactions cérébrales à différentes émotions. Au cours de cette expérience les nourrissons étaient exposés à des visages exprimant 6 émotions différentes (i.e., colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutralité), tandis que leurs réponses cérébrales étaient enregistrées. Sur la base des études rapportant que les nourrissons de 3 mois discriminent et préfèrent les visages de joie vis-à-vis des visages renfrognés (voir au-dessus), nous avons formulé l'hypothèse qu'une distinction dans les réponses cérébrales aux expressions devrait s'observer entre la joie et les expressions négatives. Concernant les différentes composantes, la présence ou l'absence de différences entre les expressions au niveau de chacune des composantes considérées devrait nous permettre d'estimer la contribution des informations de bas niveau (P100) dans la discrimination des expressions chez les 3 mois, et de déterminer si cette discrimination repose sur un encodage différencié du visage selon son expression (N290 et P400). Enfin du fait que la Nc soit considérée comme une composante reflétant l'engagement attentionnel vers les stimuli visuels, nous avions formulé l'hypothèse que celle-ci devrait différer selon l'expression faciale et tout particulièrement pour la joie (pour plus de détails concernant les différentes composantes voir **Chapitre 1 section 1.2.1.**).

4.2. MATERIEL ET METHODE

4.2.1. Participants

L'échantillon final était composé de 16 nourrissons de 3 mois (9 garçons et 6 filles) avec un âge moyen de 96,61 ± 3,2 jours. Tous étaient nés à terme, avec un poids de naissance (> 2800 g) et un APGAR (score à 5 min ≥ 8) normal, après une grossesse et un accouchement sans complications. Dix autres nourrissons ont été étudiés mais exclus de l'échantillon final, car le nombre d'essais observés par ces enfants et enregistrés sans artefacts était inférieur au minimum requis pour le moyennage (i.e., au moins 10 essais regardés sans artefacts). Ce taux trop élevé de rejet des signaux récoltés chez ces nourrissons était majoritairement lié à une trop forte inattention des enfants par rapport aux stimuli présentés et/ou à une trop forte agitation du nourrisson (i.e., mouvement corporels et oculaires). Les parents et leur enfant étaient recrutés à l'issue d'un premier rendez-vous pour une autre expérience. Le but de l'étude leur était expliqué, et une description complète du matériel et de la procédure leur était fournie à cette occasion. Tous les parents ont fournis leur accord écrit et tous les tests ont été effectués en accord avec la Déclaration de Helsinki pour l'expérimentation sur participants humains (*Bristich Medical Journal*, 1991 ; 302 : 1194).

4.2.2. Stimuli

Le matériel utilisé était constitué de 36 photographies extraites de la base de visages NimStim (Tottenham et al., 2009). Ces photographies représentaient les visages de face de six femmes différentes (modèles F01, F02, F05, F07, F09 et F10), et pour chaque identité, six photographies différentes ont été sélectionnées : une photographie avec une expression neutre et cinq photographies avec une expression émotionnelle distincte (colère, dégoût, joie, peur et tristesse). Sur toutes ces photographies la personne représentée avait un regard direct. Les visages ont dans un premier temps été détourés au moyen d'un filtre circulaire, puis ils ont été montés sur un fond gris de luminance moyenne (i.e., niveau de gris = 128) et de forme rectangulaire. Enfin, les images obtenues étaient redimensionnées à une taille de 358 × 513 pixels.

En plus de ces photographies, étaient également utilisées des vidéos du(des) parent(s) s'adressant à leur enfant. Pour chaque enfant, 6 vidéos de leur(s) parent(s) étaient enregistrées au cours de la prise de rendez-vous. Au cours de ces vidéos, le parent était invité à effectuer différents types d'actions faites habituellement lors des interactions et jeux avec leur enfant (e.g., chanter une chanson, interaction/action enjoué et badine faite pendant le changement de couche, coucou-caché, sons de bouche et de lèvres, présentation d'un jouet, faire des compliments à leur enfant, etc.) ou à dire quelques paroles rassurantes à leur enfant. Chacune de ces vidéos durait entre 6 et 10 secondes, les parents ayant la même posture (i.e., assis sur un tabouret et enregistré du haut de la tête jusqu'aux épaule avec le visage centré) avec leur regard directement orienté vers l'objectif de la caméra et avec un fond blanc en arrière-plan.

4.2.3. Procédure

Une fois le casque d'électroencéphalographie posé, l'ambiance lumineuse de la pièce était réduite et l'enfant était confortablement installé sur les genoux de sa mère face à un écran de stimulation (i.e., écran de 19 pouces avec une résolution de 1280 × 1024 et une fréquence de rafraichissement à 75 Hz), à une distance de 60 ± 10 cm. La session expérimentale était subdivisée en 7 blocs, chacun contenant 36 essais correspondant à la présentation d'un visage expressif (i.e., les 6 identités exprimant les 6 expressions). Chaque essai consistait en la séquence d'événements suivante : présentation d'une croix de fixation pendant 400 ms, suivie de 700 ms de présentation d'un visage expressif ou neutre, suivie d'un intervalle inter-stimulus aléatoire de 300 à 500 ms pendant lequel aucune image n'était présente à l'écran (pour illustration voir **figure 19**). Au cours de la présentation de la croix de fixation et de l'intervalle inter-stimulus, le même fond gris que celui employé comme fond pour les visages était utilisé. Les différents visages étaient présentés aléatoirement au sein de chaque bloc.

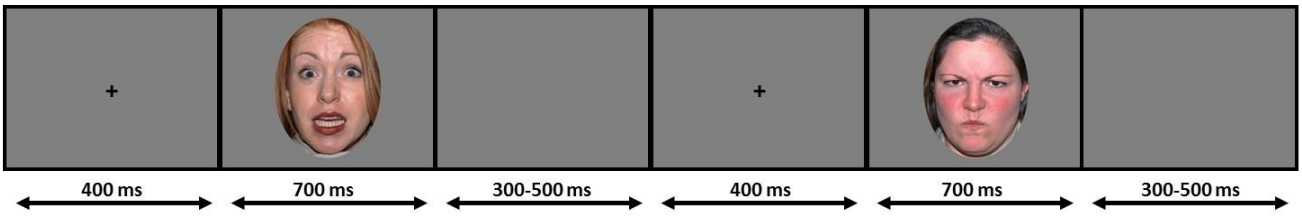


Figure 19 : Schéma représentant l'enchaînement de deux essais. Au cours de chaque essai, une croix de fixation était présentée pendant 400 ms, suivie de la présentation aléatoire d'un visage expressif (colère, dégoût, joie, peur, tristesse) ou neutre, puis d'un intervalle inter-stimulus d'une durée variable allant de 300 à 500 ms.

Au cours de ces blocs pouvait également apparaître l'une des vidéos du(des) parent(s). L'apparition aléatoire de ces vidéos était contrôlée par pression d'une touche sur le clavier, tandis que les comportements du nourrisson étaient surveillés depuis l'écran de contrôle au moyen d'une webcam (QuickCam Pro 9000, Logitech) dissimulée sous l'écran de stimulation. De cette façon, dès que le nourrisson devenait inattentif à la présentation des stimuli à l'écran et/ou commençait à s'agiter, l'expérimentateur pouvait déclencher l'apparition d'une vidéo à l'écran au cours de la séquence d'apparition des stimuli ; ce qui permettait de réengager l'attention du nourrisson vers l'écran et/ou de l'apaiser. La même vidéo était présentée en boucle jusqu'à ce que le nourrisson retourne à un état calme et attentif (durée maximum de répétition de 2 min). Si cela s'avérait ineffectif, une pause était alors aménagée jusqu'à ce que le nourrisson soit prêt à reprendre l'expérience. Pendant ces pauses, la mère de l'enfant pouvait librement s'éloigner de l'écran de présentation si elle le souhaitait, et effectuer les différentes actions qu'elle jugeait nécessaires pour apaiser/distraire son enfant. Les mères avaient pour instruction, qu'en dehors de ces pauses, elles devaient tâcher de rester aussi immobiles et silencieuses que possible pendant les périodes de présentation de stimuli, et de ne pas regarder l'écran de stimulation (i.e., regarder dans la direction de l'expérimentateur). Enfin, si cela s'avérait là aussi nécessaire, une pause pouvait également être aménagée entre les blocs.

Les stimuli étaient présentés avec le logiciel E-prime (version 2.0, Psychology Software Tools, Pittsburgh, USA), tandis que l'analyse et l'enregistrement des données étaient effectués avec le logiciel ASA (version 4.6, ANT, Enschede, Pays-Bas). Un enregistrement vidéo des comportements de l'enfant, et notamment de son visage, tout au long de l'expérience était également assuré par un caméscope (Handycam, Sony) dissimulé lui aussi sous l'écran de présentation. De plus, un miroir fixé sur un support positionné entre l'écran et le nourrisson, et reflétant l'image à l'écran, permettait l'enregistrement simultané des comportements de l'enfant et des images présentées à l'écran (pour illustration voir **figure 20**). Cet enregistrement vidéo était effectué en vue de pouvoir être par la suite analysé et de ne conserver dans l'analyse des données électroencéphalographiques que les essais où le visage a bien été regardé par l'enfant. Au final, la totalité de la procédure comprenait 252 essais, avec 42 essais pour chacune des 6 expressions. Seuls les essais correspondant à la présentation d'une photographie de visage regardé par le nourrisson pendant sa présentation ont été

analysés ; les présentations de vidéos du(des) parent(s) et les essais non regardés ont été exclus des analyses.



Figure 20 : Illustration des enregistrements vidéo du nourrisson et des stimuli présentés simultanément à l'écran. Le miroir disposé entre l'écran et l'enfant (ici à gauche), reflète directement les stimuli présentés à l'enfant, et permet ainsi de déterminer les stimuli non-regardés par le nourrisson.

4.2.4. Enregistrement et analyses des données EEG

Les données EEG étaient enregistrées en continu avec 32 électrodes Ag–AgCl montées sur un casque d'électroencéphalographie adapté pour le nourrisson (Wavegard, ANT, Enschede, Pays-Bas) et respectant le système de classification 10-10. Les signaux étaient enregistrés avec un référençage sur l'électrode fronto-centrale (AFz). Les données étaient amplifiées par un amplificateur REFA (ANT, Enschede, Pays-Bas). La fréquence d'échantillonnage était réglée à 1024 Hz et l'impédance des électrodes était maintenue autour ou en dessous de 10kΩ. Après expérimentation et enregistrement des données, un filtre passe-bande réglé pour ne conserver que les fréquences comprises entre 0.1 et 30 Hz était appliqué. Les essais avérés comme non regardés par le nourrisson au cours du codage des vidéos étaient exclus de l'analyse. De plus, afin d'éliminer les essais contaminés par des artefacts liés aux mouvements oculaires et corporels des nourrissons, nous avons appliqué la routine de détection d'artefact du logiciel ASA en la réglant à ± 100µV. Les signaux étaient ensuite de nouveau référencés sur une référence moyenne commune, puis ils étaient moyennés sur 1200 ms, comprenant une référence de 200 ms avant apparition du stimulus, et un intervalle de

1000 ms[7] après apparition du stimulus. Après rejet des artefacts, chacune des conditions d'expression contenait au moins 10 essais valides (intervalle allant de 10 à 33 essais) pour les nourrissons conservés.

Les analyses statistiques ont été effectuées sur 4 composantes différentes qui ont précédemment été associées au traitement des visages chez le nourrisson (i.e., la P100, la N290, la P400 et la Nc), et sur 3 types de mesures : l'amplitude moyenne (i.e., voltage moyen au cours de la fenêtre temporelle), l'amplitude de pic (i.e., valeur de voltage la plus positive (pour la P100 et la P400) ou la plus négative (pour la N290 et la Nc) dans la fenêtre temporelle), et la latence de pic (i.e., latence à laquelle le pic d'amplitude est atteint). Les différentes électrodes et fenêtres temporelles utilisées pour l'extraction des 4 composantes se basent sur la littérature existante en potentiels évoqués sur le traitement des visages et expressions faciales chez le nourrisson (e.g., Gliga & Dehaene-Lambertz, 2007 ; Kobiella et al., 2008 ; Leppänen et al., 2007 ; Macchi-Cassia et al., 2006 ; Rigato et al., 2010 ; Vanderwert et al., 2014). La P100, la N290 et la P400 étaient analysées au niveau des électrodes occippito-pariétales (O1/2 et P3/4), tandis que la Nc était analysée au niveau des électrodes fronto-centrales (F3/4, C3/4 et FC1/2). Différentes fenêtres temporelles ont été utilisées pour extraire les différentes composantes d'intérêt : La P100 était testée en moyennant le signal sur la fenêtre allant de 120 à 220 ms après le début de la présentation du stimulus, la N290 sur la fenêtre allant de 220 à 400 ms, la P400 sur la fenêtre allant de 400 à 650 ms, et la Nc sur la fenêtre allant de 350 à 700 ms. Nous avons ici pris le parti d'employer ces trois types de mesures, plutôt que de nous restreindre à l'étude de l'amplitude moyenne des différentes composantes, comme effectué chez l'adulte. Ce choix s'est fait, à la fois, car dans la littérature en EEG sur les enfants de moins d'un an, les études ont tantôt utilisé l'amplitude moyenne, tantôt l'amplitude et la latence de pic ; mais aussi, car peu d'études en EEG se sont intéressées au traitement du visage sur les nourrissons de cet âge (et aucune sur le traitement des expressions). Nous avons donc ici préféré employer ces trois types de mesure de façon conjointe.

L'amplitude moyenne, le pic d'amplitude et la latence de pic de la P100, de la N290 et de la P400 ont tous trois été analysés par des analyses de variances à mesures répétées (ANOVAs) comprenant le Site sur le scalp (O1/2 et P3/4), l'Hémisphère (gauche et droit) et

[7] La fenêtre était ici étendue à 1000 ms afin de pouvoir considérer une composante tardive - la PSW - qui a été considérée dans certaines études antérieures sur le traitement du visage et des expressions chez le nourrisson (e.g., de Haan et al., , 2003 ; Striano et al., 2006). Toutefois, les analyses préliminaires effectuées n'ont indiqué aucun effet de l'expression sur cette composante, qui ne sera donc pas considérée ici.

l'Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre) comme facteurs intra-sujets. Concernant la Nc, les différentes mesures ont été analysées au moyen d'ANOVAs comprenant les facteurs Site sur le scalp (F3/4, FC1/2 et C3/4), l'Hémisphère (gauche et droit) et l'Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre) comme facteurs intra-sujets. Des corrections de Greenhouse-Geisser ont été appliquées sur les effets simples et interactions révélés significatifs. Toutes les analyses post-hoc ont été effectuées avec des tests HSD de Tukey. Etant donné que notre intérêt dans cette étude se porte sur le traitement cérébral des expressions faciales, seuls les effets simples et interactions impliquant l'Expression seront décrits.

4.3. RESULTATS

Les modulations des réponses cérébrales selon l'expression sur la P100, la N290 et la P400 (composantes mesurées sur les électrodes O1/2 et P3/4) sont représentées en **figure 21**, tandis que les modulations de la Nc (mesurée sur les électrodes FC1/2, C3/4 et F3/4) sont représentées en **figure 22**.

Pour la ***P100***, les analyses sur la latence de pic n'ont pas révélé d'effet significatif de l'Expression [$F(5,75)=1.222$, $p= .312$, respectivement] ou d'interaction significative de l'Expression avec les autres facteurs (tous les $Fs < 1.5$). Toutefois, les analyses sur l'amplitude moyenne ont permis de mettre en avant un effet significatif de l'Expression [$F(5,75)=2.793$, $\varepsilon = 0.636$, $p= .047$, $\eta p^2=.157$] et une tendance à l'interaction entre l'Expression et l'Hémisphère [$F(5,75)=2.458$, $\varepsilon = 0.702$, $p= .064$, $\eta p^2=.141$]. L'effet de l'Expression était significatif sur l'hémisphère gauche [$F(5,11)= 3.153$, $\varepsilon= .61$, $p= .052$, $\eta p^2=.020$], mais pas sur l'hémisphère droit [$F(5,11)=2.02$]. Les tests post-hoc sur l'effet de l'expression ont indiqué une amplitude moyenne de la P100 plus élevée pour la joie (14,9 µV) par rapport à l'expression de dégoût (10,7 µV) et à la neutralité (10,9 µV ; les deux $p < .05$). Concernant l'interaction entre Hémisphère et Expression, les comparaisons en post-hoc sur l'hémisphère gauche ont indiqué que la P100 était d'amplitude moyenne plus élevée pour la joie (15,7 µV) par rapport au dégoût (10,6 µV, $p < .001$) à la neutralité (10,3 µV, $p < .001$) et à la tristesse (10,4 µV, $p < .001$). De même les analyses sur l'amplitude de pic ont révélé un effet significatif de l'Expression [$F(5,75)=3.079$, $\varepsilon = .653$, $p= .032$, $\eta p^2=.170$] et une interaction de l'Expression avec l'Hémisphère [$F(5,75)=2.643$, $\varepsilon = 0.747$, $p= .047$, $\eta p^2=.150$].

L'effet de l'Expression n'était pas significatif sur l'hémisphère droit [F(5,11)= 2.117, *p*= .140], tandis qu'une tendance était présente sur l'hémisphère gauche [F(5,11)= 2.612, ε= .597, *p*= .0857, ηp^2=.021]. Les tests post-hoc sur l'effet simple de l'expression ont montré que le pic d'amplitude de la P100 était plus élevé pour la joie (20.2 µV) en comparaison avec le dégoût (15.4 µV ; *p*= .011), tandis qu'une tendance était présente vis-à-vis de la neutralité (16.3 µV ; *p*= .067). Les tests post-hoc sur l'effet de l'expression au niveau de l'hémisphère gauche ont montré que le pic d'amplitude de la P100 était plus élevé pour la joie (21 µV) en comparaison avec le dégoût (15.5 µV), la tristesse (15.3 µV) et la neutralité (15.6 µV ; tous les *ps*< .01).

Pour la ***N290***, les analyses n'ont pas révélé là aussi d'effet significatif de l'expression sur le pic d'amplitude et la latence de pic [*F*(5,75)=1.925, p= .129 ; et *F*(5,75)=0.753, p= .548, respectivement], tandis qu'un effet de l'expression sur l'amplitude moyenne était présent [*F*(5,75)=2.643, ε = 0.666, *p*= .05, ηp^2=.150]. Aucune interaction significative entre l'Expression et les autres facteurs n'a pu être observée sur les 3 types de mesures (tous les *F*s ≤ 1.4). Les tests post-hoc sur les effets de l'expression sur l'amplitude moyenne ont révélé que la N290 était en moyenne plus positive pour la joie (9,27 µV, *p*= 0.16) que pour le dégoût (4,87 µV) ; avec également une légère tendance à être moins positive pour la neutralité (5,74 µV) que pour la joie (*p*= .09).

Les analyses effectuées sur la ***P400*** n'ont quant à elles pas indiqué d'effet significatif de l'Expression sur l'amplitude moyenne de la composante [*F*(5,75)=1.838, *p*= .153] et sa latence de pic [*F*(5,75)=0.660, *p*= .588]. Toutefois, une tendance à un effet de l'Expression sur l'amplitude de pic a pu être observé [*F*(5,75)=2.562, ε = 0.568, *p*= .070, ηp^2=.146]. Les comparaisons en post-hoc ont révélé que cet effet de l'Expression était lié à une tendance de la *P400* à avoir un pic d'amplitude plus positif pour la joie (19,3 µV) que pour le dégoût (15,4 µV, p= .064) [avec une très légère tendance pour la neutralité (15,6 µV, *p*= .096)]. Enfin, là aussi aucune interaction significative entre l'Expression et les autres facteurs ne fut observée sur les 3 types de mesures (tous les *Fs* < 1.5).

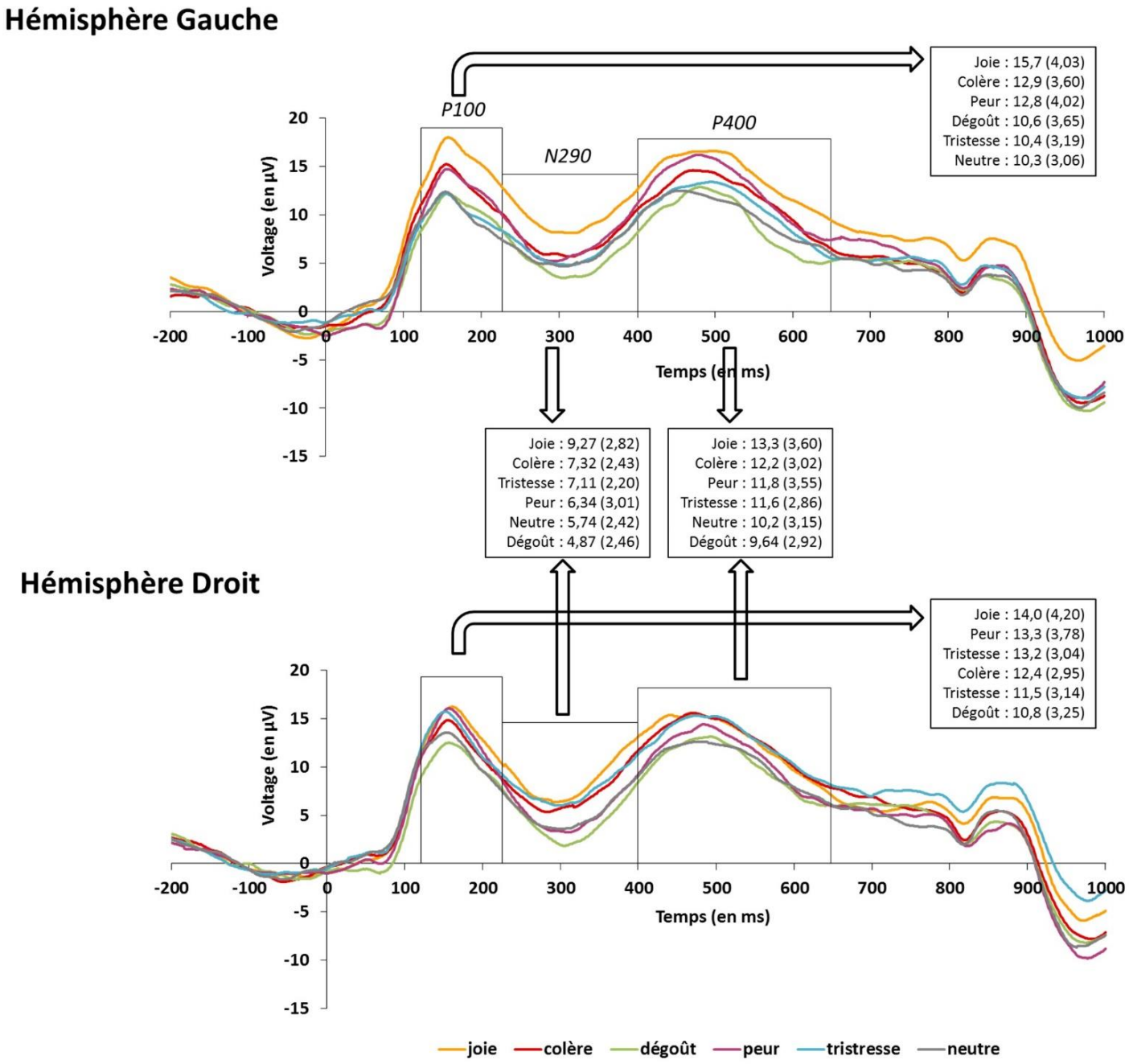


Figure 21 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche (O1 et P3) et de l'hémisphère droit (O2 et P4) pour les différentes expressions faciales (joie, colère, dégoût, peur, tristesse et neutre). Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes (P100, N290 et P400). Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans les encadrés.

Concernant la ***Nc***, aucun effet de l'Expression n'était observé ni sur l'amplitude moyenne [$F(5,75)=0.540$, $p= .699$], ni sur l'amplitude de pic [$F(5,75)=0.727$, $p= .606$] et la latence de pic [$F(5,75)=0.629$, $p= .643$]. Les analyses n'ont là aussi pas révélé d'interaction

entre l'Expression et les autres facteurs atteignant la significativité (tous les *Fs* allant de 0.377 à 1.870).

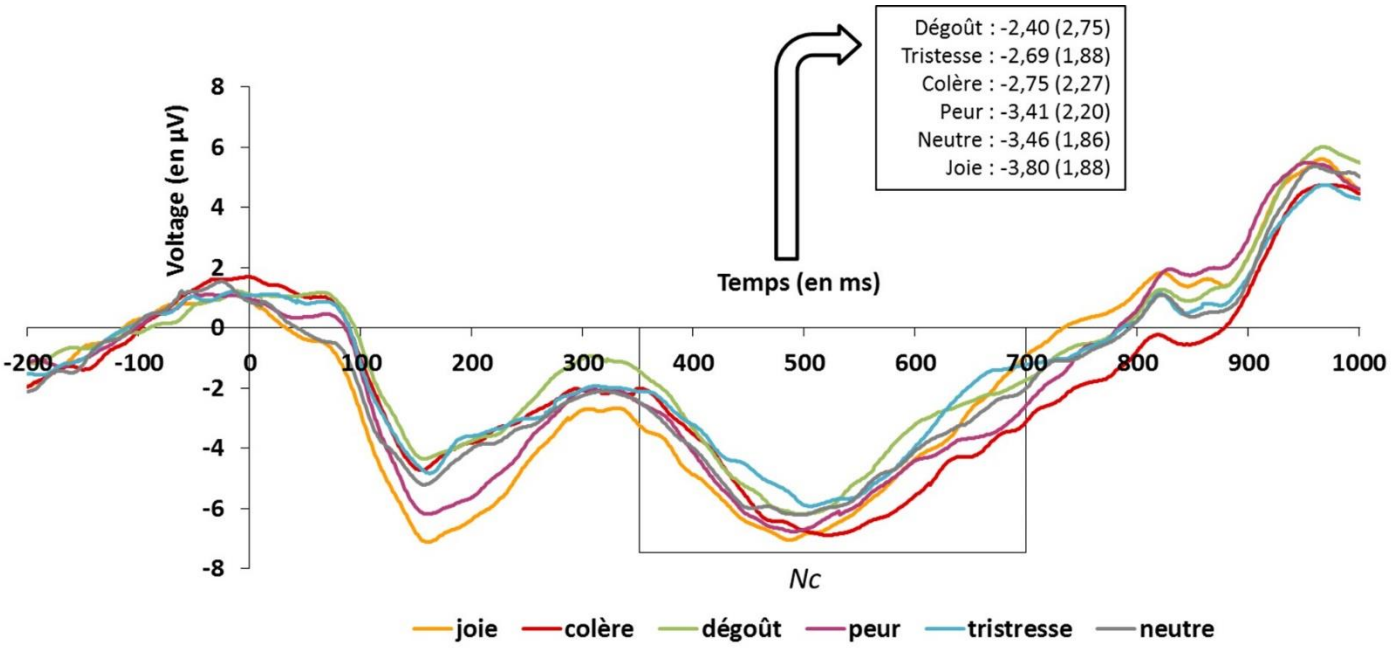


Figure 22 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes fronto-centrales (FC1/2, F3/4 et P3/4) pour les différentes expressions faciales (joie, colère, dégoût, peur, tristesse et neutre). Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse de la Nc. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans l'encadré.

En résumé, les résultats ont montré une sensibilité précoce à l'expression au travers des effets observés au niveau de la P100 : plus forte amplitude pour la joie par rapport au dégoût, à la neutralité et à la tristesse au sein de l'hémisphère gauche. De plus, il a pu être observé que la distinction des réponses cérébrales aux expressions de joie et de dégoût allait s'étendre à la N290 et la P400 : ces deux composantes sont plus négatives lorsque les visages expriment du dégoût plutôt que de la joie. Concernant la Nc, aucune différence dans les réponses cérébrales aux différentes expressions n'a été observée.

Etant donné que l'inspection des données a révélé qu'un pattern similaire était observable entre la P100, la N290 et la P400, il est possible que les différences au niveau de la N290 soient induites par celles observées au niveau de la P100 ; et que similairement, les différences au niveau de la P400 soient induites par celles observées au niveau de la N290. Dans le but de contrôler cet effet, des analyses complémentaires en pic-à-pic ont été effectuées sur l'amplitude de pic (i.e., soustraction de la valeur du pic d'amplitude de la P100/N290 à celle du pic d'amplitude de la N290/P400) et la latence de pic (i.e., soustraction

de la latence de pic de la P100/N290 à celle de la N290/P400). Une approche similaire était utilisée pour les analyses sur l'amplitude moyenne des deux composantes : l'amplitude moyenne de la N290/P400 était recalculée en venant soustraire l'amplitude moyenne de la P100/N290 aux données moyennes relevées dans la fenêtre temporelle d'intérêt (i.e., de 220 à 400 ms / de 400 à 650 ms). Les analyses de variance sur ces données ajustées ont été effectuées de la même façon que pour les données non-ajustées. Pour la N290, aucun effet significatif de l'Expression n'était observé, aussi bien seul qu'en interaction (les *Fs* allant de 0.28 à 2.08, et tous les *ps* ≥ .1). Seule une légère tendance à l'interaction entre l'Hémisphère et l'Expression sur l'amplitude moyenne a pu être observée [$F(5,75)=2.155$, $\varepsilon = 0.707$, $p= .094$, $\eta p^2= .126$]. L'exploration de cette tendance au moyen des tests post-hoc n'a cependant révélé aucune différence significative (tous les $p > .1$). Concernant la P400, là aussi, aucun effet significatif de l'expression, seule ou en interaction, n'était présent (les *Fs* allant de 0.26 à 1.35, et tous les *ps* > .1).

4.4. DISCUSSION

Le but principal de cette expérience était de préciser la nature de la discrimination des expressions faciales rapportée au niveau comportemental chez le nourrisson de 3 mois. Dans cet objectif, nous nous sommes intéressés aux réactions cérébrales des enfants de cet âge tandis qu'ils étaient exposés à 6 expressions différentes (i.e., la colère, le dégoût, la joie, la peur, la tristesse et la neutralité).

Les résultats obtenus indiquent qu'une différence dans les réponses cérébrales aux expressions est présente dès la P100. Son amplitude est augmentée au niveau de l'hémisphère gauche pour les visages de joie par rapport aux visages exprimant le dégoût, la neutralité et à ceux exprimant la tristesse. A notre connaissance, les études antérieures sur les réponses cérébrales aux expressions faciales chez le nourrisson de moins d'un an n'ont pas rapporté d'effet au niveau de P100. Cela étant généralement lié au fait que cette composante n'était pas considérée dans les analyses sur le signal. Dans leur étude au cours de laquelle ils ont considéré la P100, Rigato et collaborateurs (2010) n'ont pas rapporté d'effet de l'expression sur cette composante chez les enfants de 4 mois. Bien que cette composante soit relativement peu étudiée chez les nourrissons, il a été observé qu'à 3 mois celle-ci répondait aux corps et aux visages (Gliga & Dehaene-Lambertz, 2005). De plus, dans la littérature adulte, différentes

études ont elles aussi rapporté une modulation de la P100 selon l'expression observée (e.g., Kolassa & Miltner, 2006 ; Pourtois, Dan, Grandjean, Sander & Vuilleumier, 2005 ; Utama, Takemoto, Koike & Nakamura, 2009). Les données obtenues suggèrent donc que, comme chez l'adulte, l'expression émotionnelle évoque des réponses cérébrales différentes dès les étapes précoces de traitement (≈ 170 ms) chez les 3 mois.

Concernant les étapes plus tardives, l'expression faciale affecte des composantes connues pour refléter spécifiquement le traitement du visage et l'encodage de sa structure chez le nourrisson : la N290 et la P400 (e.g., Bayet et al., 2014 ; de Haan et al., 2003 ; de Schonen, 2009 ; Hoehl & Wahl, 2012). L'amplitude moyenne de la N290 est plus négative en réponse au dégoût en comparaison avec la joie, tandis que le pic d'amplitude de la P400 est plus élevé pour la joie que pour le dégoût. Ces résultats sont là aussi en accord avec la littérature aussi bien chez l'adulte, que chez l'enfant de moins de un an. La N290 et la P400 sont considérées comme des précurseurs de la N170 adulte (e.g., de Haan et al., 2002 ; Halit et al., 2003, 2004), qui est connue pour être impliquée non-seulement dans le codage des informations faciales, mais aussi pour être sensible aux variations d'expression (e.g., Ashley, Vuilleumier & Swick, 2004 ; Luo et al., 2010 ; Utama et al., 2009 ; Williams et al. 2006). Similairement, différentes études sur les nourrissons de 7 mois rapportent des effets de l'expression sur la N290 et la P400 (Hoehl & Striano, 2008 ; Kobiella et al., 2008 ; Leppänen et al., 2007 ; Vanderwet et al., 2014). Concernant toujours les études en EEG, Rigato et collaborateurs (2010) rapportent eux aussi des effets de l'expression sur ces mêmes composantes, dans leur étude sur les nourrissons de 4 mois. Dans leur expérience, ils observent que la latence de la N290 et de la P400 est plus courte pour les visages de joie que pour les visages de peur.

Le 3éme mois constitue une étape cruciale dans le développement socio-émotionnel. En effet, c'est à cet âge qu'a pu être clairement établi, au niveau comportemental, que les nourrissons discriminaient les expressions, avec notamment une discrimination de la joie vis-à-vis des visages renfrognés (i.e., tristesse, colère, surprise), ainsi qu'une orientation préférentielle vers les visages de joie (Barrera & Maurer, 1981 ; Haviland & Lelwica, 1987 ; Young-Browne et al., 1977). Les résultats de notre étude corroborent ainsi les données issues des études comportementales sur le nourrisson de 3 mois, puisque nous observons au niveau cérébral une distinction dans le traitement des visages lorsqu'ils expriment la joie, notamment vis-à-vis du dégoût, à différentes étapes d'intégration de l'information : aussi bien au niveau des étapes précoces de traitement, qu'au niveau des étapes plus spécifiques au traitement du

visage. Cette sensibilité à l'expression de joie ainsi que sa distinction vis-à-vis des expressions renfrognées chez les nourrissons de cet âge aussi bien au niveau cérébral que comportemental, pourraient être liées aux expériences quotidiennes des nourrissons au cours de cette période. Durant les premiers mois de vie, les nourrissons sont plus souvent exposés aux visages souriants de leurs parents ; tandis que ce n'est qu'aux alentours du sixième mois que les parents vont commencer à produire plus d'expressions négatives envers leur enfant et que ces derniers vont expérimenter plus d'affects négatifs (Biringen et al., 1995 ; Campos et al., 1992 ; Vaish et al., 2008).

Toutefois le fait que nous n'ayons pas observé d'effet de l'expression sur la Nc est à soulever. En effet, il est généralement rapporté qu'au cours des six premiers mois, les nourrissons sont sensibles aux visages de joie et s'orientent préférentiellement vers ces derniers (Barrera & Maurer, 1981 ; Kuchuk et al., 1986 ; Young-Brown et al., 1977), avant de manifester un biais de négativité et une plus forte attraction pour les expressions négatives (Peltola et al., 2009, 2013 ; pour une revue voir Vaish et al., 2008). La Nc est classiquement considérée comme reflétant l'allocation de l'attention vers le stimulus (Reynolds & Richards, 2005). Ainsi, nous avions formulé l'hypothèse qu'à 3 mois les nourrissons devraient manifester une Nc plus ample en réaction aux visages de joie. Différentes études en électroencéphalographie sur les enfants de 4 à 12 mois ont rapporté des modulations de la Nc en réponses aux expressions, et ont ainsi interprété cette modulation comme étant liée à des différences d'allocation attentionnelle vers les visages en fonction de l'émotion exprimée (Hoehl et al., 2008 ; Hoehl & Striano, 2010a ; Kobiella et al., 2008 ; Rigato, et al., 2010). Différents facteurs peuvent rendre compte de l'absence d'effet de l'expression sur la Nc dans notre étude. Dans un premier temps, les différences dans la méthodologie employée pourraient expliquer ces divergences dans les résultats : la plupart des études ont eu recours à un jeu de stimuli comprenant 1 à 2 identités et 2 à 3 expressions faciales différentes, tandis que notre jeu de stimuli comprenait 6 identités et 6 expressions différentes. Un second facteur est la différence d'âge entre les nourrissons de notre étude (i.e., 3 mois) et ceux des études sur lesquelles ces modulations de la Nc par l'expression sont rapportées (i.e., 4 à 12 mois). Il est également à mentionner que des études ayant tenté de corréler l'exploration préférentielle d'une expression par rapport à une autre, avec les différences entre ces expressions mesurées au niveau de la Nc, ne sont pas parvenues à obtenir une corrélation significative (Grossmann, Striano & Friederici, 2006 ; Leppänen et al., 2007). Il est donc envisageable que les modulations de la Nc selon l'expression ne reflètent pas uniquement les variations

d'allocation attentionnelle, mais qu'elles reflètent également l'engagement d'autres processus participant à ce phénomène dans le traitement expressif, qui seraient encore non-mesurables au niveau de la Nc (ou non-engagés) chez les nourrissons de 3 mois.

Enfin, les analyses complémentaires effectuées sur la N290 et la P400 ont révélé que les différences d'activité présentes au niveau des étapes précoces (P100) de traitement contribuaient aux différences relevées sur ces étapes d'intégration plus tardives. En effet, lorsque cette contribution était contrôlée dans les analyses sur la N290 et la P400, aucun effet significatif de l'expression n'était observé sur les différentes mesures relevées sur ces composantes. Ces derniers résultats laissent donc entendre que chez les nourrissons de 3 mois, les étapes d'intégration précoces de l'information contribueraient fortement aux traitements effectués au niveau des étapes plus spécifiques du traitement des visages, et donc qu'elles participeraient activement à la discrimination des expressions ; et notamment à la discrimination des visages de joie vis-à-vis des visages renfrognés (ici le dégoût).

Il est communément admis que la P100 reflète l'engagement/capture de l'attention et le traitement des informations visuelles de bas niveau, telles que la fréquence spatiale, la couleur et la forme du stimulus, etc. (de Haan et al., 2003). Certains auteurs avancent aussi, qu'elle pourrait refléter certains traitements visuels précoces propres aux visages (e.g., Itier & Taylor, 2002). Toutefois, différents arguments avancés par Rossion et Jacques (2011) démontrent qu'il en serait autrement. En effet, au travers d'une revue sur la question, les auteurs affirment que les différences entre les visages et les autres classes de stimuli, observées au niveau de la P100, seraient liées à une sensibilité du système visuel à des informations de bas niveau fréquemment présentes sur les visages. Les effets observés sur la P100 ne seraient donc pas liés à une sensibilité de celle-ci au visage et à sa structure, mais au traitement et à l'accumulation d'informations de bas niveau pouvant contribuer à la discrimination rapide des visages vis-à-vis des autres types de stimuli (Peykarjou, Pauen & Hoehl, 2014 ; Rossion & Jacques, 2011). Un autre argument venant supporter cette interprétation est la présence de variations significatives de la saillance visuelle (i.e., variation de contraste, couleur et orientation) des différentes régions faciales (i.e., bouche, nez, yeux) en lien avec les variations d'expressions (Clavo & Nummenmaa, 2008, 2011). Au vu de ces éléments, il apparaît donc que les variations de la P100 observées chez les 3 mois, puissent être liées aux changements des propriétés de bas niveau des différents éléments faciaux, consécutives aux variations d'expression, et auxquelles le système visuel du nourrisson de cet âge serait sensible. Cela soulève donc la possibilité qu'à 3 mois la discrimination des visages

de joie vis-à-vis des visages renfrognés (ici le dégoût) reposerait sur des différences au niveau des étapes précoces d'intégration de l'information, venant ensuite contribuer aux traitements effectués au niveau des étapes plus tardives et spécifiques au traitement des visages. De futures études devraient venir investiguer l'évolution de cette contribution des informations visuelles de bas niveau. Il serait notamment intéressant que celles-ci étudient, à différents âges entre 3 et 7 mois, la contribution des différences relevées au niveau de la P100 sur les composantes spécifiques au traitement des visages (notamment la N290), et à quel point du développement de nouvelles différences entre expressions (non-observées au niveau de la P100) sont spécifiquement intégrées aux niveaux de la N290 et de la P400.

Chapitre 5 :
Impact du contexte olfactif sur les réponses cérébrales aux expressions faciales chez l'adulte (Expérience 3)

L'étude présentée dans ce chapitre a donné lieu à la rédaction d'un article accepté :

- Leleu*, A., Godard*, O., Dollion*, N., Durand, K., Schaal, B., Baudouin, J.-Y. (2015). *Contextual odors modulate the visual processing of emotional facial expressions: An ERP study.* Neuropsychologia (77) 366-379
  (* les trois auteurs ont contribué de façon équivalente)

Ainsi, ce chapitre reprend en partie cet article, certaines parties consistant en une traduction de celui-ci. Cet article est disponible en annexe 3.

5.1. INTRODUCTION

A l'âge adulte, il a été démontré que la perception et le traitement des expressions faciales étaient perméables aux influences du contexte multi-sensoriel dans lequel elles apparaissent. En effet, les informations émotionnelles du contexte intégrées au moyen des différents sens facilitent/perturbent le traitement des différentes expressions faciales. Olfaction et expression faciale sont toutes deux étroitement liées tant au niveau comportemental que cérébral. Différentes études ont ainsi pu observer la présence d'effets du contexte olfactif sur le traitement et la perception des visages ainsi que des expressions faciales. De nombreuses études ayant eu recours à l'odeur de transpiration anxieuse (i.e., collectée en état d'anxiété) rapportent la présence d'effets de facilitation/interférence sur la catégorisation émotionnelle de visages lorsqu'il y a congruence/incongruence de valence entre odeur et expression (Mujica-Parodi et al., 2009 ; Rubin et al., 2012 ; Zernecke et al., 2011). Différentes études en EEG ont révélé que l'odeur de transpiration collectée en situation anxieuse augmentait l'amplitude des réactions cérébrales aux visages de peur au niveau des composantes précoces (P100/N100 et N170), et diminuait l'amplitude d'une composante plus tardive reflétant l'allocation attentionnelle : la LPP (Late Positive Potential ; Adolph, Meister & Pause, 2013). Il a également était rapporté que l'odeur de transpiration anxieuse augmente l'amplitude de la partie tardive de LPP (≈ 400-600 ms après l'apparition du stimulus) en réaction aux visages neutres et ambigus, mais pas pour les visages de colères (Rubin et al., 2012). Ces mêmes auteurs ont également rapporté que la section précoce de la LPP (250-400 ms) était modulée de façon aspécifique (i.e., que le visage exprime la neutralité, la colère ou

une expression ambiguë) par l'odeur de transpiration anxieuse. Ainsi, ces résultats suggèrent que les interactions entre olfaction et traitement des expressions faciales s'effectueraient en deux étapes : un effet global de l'odeur indépendant de l'expression, suivi par un effet interactif où l'influence de l'effet de l'odeur dépend de l'expression arborée par le visage.

A l'heure actuelle, peu d'études se sont intéressées aux effets d'odeurs non-corporelles sur le traitement des expressions. Bien que les auteurs s'accordent sur la présence d'interactions olfacto-visuelles dans le traitement des émotions faciales, des contradictions dans les résultats rapportés par ces études sont présentes : certaines rapportent un effet de facilitation/interférence dépendant de la congruence/incongruence affective entre odeur et expression (Leleu et al., 2015 ; Leppänen & Hietanen, 2003), d'autres rapportent une amélioration du traitement du dégoût quelle que soit la valence de l'odeur (Seubert et al., 2010). De plus, concernant le décours temporel des effets des odeurs environnementales (i.e., odeurs non-corporelles telles que les odeurs alimentaires) sur le traitement des visages expressifs, très peu d'éléments sont disponibles à l'heure actuelle. A notre connaissance seule une étude s'est intéressée aux effets d'odeurs non-corporelles sur le traitement des expressions faciales en EEG. Dans cette étude Forscher et Li (2012) ont comparé les réponses cérébrales à la peur et à la neutralité en fonction du contexte olfactif dans lequel elles apparaissaient (i.e., odeur positive versus odeur négative). Ils ont rapporté que les réponses cérébrales précoces étaient modulées par l'expression et le contexte olfactif : la P100 était plus ample pour les visages de peur présentés en contexte olfactif déplaisant, tandis que la N70 était plus ample en réaction aux visages de peur quel que soit le contexte olfactif. Ainsi, les résultats de cette étude suggèrent que les odeurs non-corporelles influencent les premières étapes de traitement visuel des visages émotionnel selon la congruence de valence émotionnelle entre les deux informations. Toutefois, dans cette étude les auteurs ne se sont intéressés qu'à l'influence d'odeurs négatives ou neutres sur le traitement de visages neutres ou exprimant la peur. Ainsi, les résultats observés pourraient également être liés à un effet indifférencié du contexte émotionnel olfactif sur le traitement de visage expressif, peu importe la congruence de valence entre expression et odeur.

Dans cette étude, nous nous sommes donnés pour objectif de clarifier la nature et le décours temporel des influences du contexte olfactif sur le traitement des émotions exprimées facialement, et ce, lorsque les odeurs utilisées sont des odeurs non-corporelles. Au cours de l'expérience les participants étaient engagés dans une tâche orthogonale aux traitements des expressions faciales (i.e., détection de visages colorés en rouge) tandis que des visages

exprimant différentes émotions leur étaient présentés et qu'ils étaient exposés à des odeurs hédoniquement contrastées (i.e., acide butyrique comme odeur déplaisante, fraise comme odeur plaisante, et absence d'odeur comme condition contrôle). Les visages expressifs exprimaient des émotions de valence congruente/incongruente avec le contexte olfactif (i.e., joie et dégoût) ou des émotions non liées aux odeurs (i.e., colère, peur et tristesse). Sur la base des études antérieures en potentiels évoqués (Forscher & Li, 2012 ; Rubin et al., 2012), nous avons formulé l'hypothèse que le contexte devrait moduler les réponses cérébrales aux expressions en deux étapes : (1) Un effet global/aspécifique du contexte olfactif sur le traitement cérébral des expressions devrait apparaître en premier lieu ; (2) suivit par un effet d'interaction olfacto-visuelle où la valence du contexte olfactif influence de façon différenciée les réponses cérébrales aux expressions selon la relation de congruence/incongruence entre odeur et expression.

5.2. MATERIEL ET METHODE

5.2.1. Participants

Un échantillon final de 24 participants (12 hommes et 12 femmes) fut considéré pour cette étude. Tous étaient droitiers (quotient moyen de latéralité = 0.78 ± 0.14, avec un quotient allant de +0.52 à +1 ; Dorthe et al., 1995) et étaient âgés en moyenne de 22 ans (SD= 2.9, et âge allant de 18 à 30 ans). Cinq autres participants furent étudiés mais exclus de l'échantillon final, car leur enregistrement EEG était trop bruité (i.e., moins de 60% des signaux conservés après rejet des artefacts). Les participants ont été recrutés au moyen d'une annonce affichée au sein de l'Université de Bourgogne et ont été indemnisés pour leur participation à l'étude. Tous les participants ont fourni leur accord écrit et tous les tests ont été effectués en accord avec la Déclaration de Helsinki pour l'expérimentation sur participants humains (*British Medical Journal*, 1991 ; 302 : 1194).

A la fin de l'expérience, les participants ont été interviewés suivant une série standardisée de questions concernant leur degré de conscience de la présence d'odeur dans l'environnement. Douze participants ont spontanément rapporté avoir senti une odeur lorsqu'il leur était demandé s'ils avaient noté quelque chose d'inhabituel durant l'expérience, et 10 autres participants ont dit avoir senti une odeur lorsque la question leur était posée.

Aucun des participants n'avait précisément identifié quel était la source des odeurs (i.e., la mentonnière), ni noté une quelconque stimulation somesthésique lié au flux d'air et aux odeurs, mais ont rapporté l'impression que les odeurs présentes dans la pièce (parfum/ odeur corporel) étaient liées à la pièce elle-même ou à l'expérimentateur.

5.2.2. Stimuli

A. Les stimuli visuels

Au cours de l'expérience, les participants avaient pour instruction de détecter des visages neutres colorés en rouge présentés parmi des distracteurs qui consistaient en des visages émotionnels et neutres. Concernant les visages expressifs et neutres, nous avons ici réutilisé les mêmes stimuli que ceux employés au cours de notre étude en EEG sur le traitement des expressions faciales chez les nourrissons de 3 mois (Expérience 2). Ainsi, les photographies détourées et montées sur fond gris des visages de face de 6 identités féminines distinctes et posant chacune 6 expressions différentes (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutralité) étaient utilisées. Pour cette expérience, six visages additionnels de nouvelles identités avec une expression neutre ont été sélectionnés au sein de la base de visages NimStim (Tottemham et al., 2009), afin de créer les « visages rouges ». La coloration rouge des visages était obtenue en venant augmenter l'intensité du rouge sur l'image à 175-189 sur les propriétés RGB. Ensuite, suivant la même procédure que celle appliquée pour la création des stimuli au cours de l'Expérience 2, ces visages ont été en premier lieu détourés au moyen d'un filtre circulaire, pour être ensuite montés sur un fond gris de luminance moyenne (niveau de gris = 128), et enfin redimensionnés à une taille de 385 × 513 pixels. Ainsi, nous disposions au total de 42 stimuli différents, comprenant 36 visages non-colorisés (6 pour chacune des 6 expressions) et 6 « visages rouges».

B. Les stimuli olfactifs

Deux odeurs ont été sélectionnées pour leur contraste de valeur hédonique : une odeur plaisante de fraise (« Meilleur du chef », Maignon, France) et l'acide butyrique (Sigma, Saint-Quentin-Fallaviers, France) qui a une odeur de fromage fortement aversive (Schaal, 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996). L'odeur de fraise était utilisée sous forme non-diluée, tandis que

l'acide butyrique était dilué dans de l'huile minérale à une concentration de 5.10^{-4} v/v. Pour l'expérience, 20 µL de fraise et 40 µL d'acide butyrique étaient déposés sur un carré de matériel absorbant inodore (P100, Powersorb, 3M). Ces concentrations ont été sélectionnées sur la base d'une étude pilote effectuée sur 4 juges, afin de pouvoir déterminer l'intensité et la détectabilité des odeurs et de les équilibrer l'une par rapport à l'autre. Au cours de cette étude pilote, les juges étaient placés dans les mêmes conditions que celles de l'expérience principale (voir ci-dessous), tandis que les deux odeurs leur étaient présentées à différentes concentrations. Ils avaient pour tâche de déterminer si oui ou non ils détectaient une odeur, et, si oui, de dire de quelle odeur il s'agissait. Ont été sélectionnées pour l'expérience les concentrations les plus faibles à partir desquelles une détection correcte était préservée.

Une fois l'odeur déposée, chacun des deux morceaux de matériel absorbant était introduit dans deux bouteilles différentes de 20 ml en polypropylène. Pour la condition contrôle, une bouteille contenant un morceau de matériel absorbant non-odorisé était utilisée. Les 3 bouteilles étaient connectées à une arrivée d'air sous pression, délivrant un flux d'air continu et inodore (0.5 bars). Ce flux provenait d'un compresseur externe au sein duquel l'air était à la fois purifiée par des filtres à charbon et mise à température ambiante. Le flux d'air était manuellement dirigé vers l'une des 3 bouteilles au moyen d'une valve. En aval de chaque bouteille, un tube indépendant était connecté à la mentonnière sur laquelle les participants reposaient leur tête au cours de l'expérience. Ainsi, lorsque le flux d'air était orienté avec la valve vers l'une des bouteilles, celui-ci permettait le transport de l'air saturée en odorant du matériel absorbant jusqu'au participant. Bien que le flux d'air était faible, les tubes acheminant le flux jusqu'à la mentonnière étaient fixés de façon à ne pas être orientés directement vers le visage du participant, afin de ne pas produire de stimulation somesthésique. Grâce à ce dispositif, le flux d'air contrôle ou chargé en odeur était ainsi acheminé jusqu'en dessous du nez des participants sans le moindre signal visuel, auditif ou tactile. Enfin, l'ensemble du dispositif de présentation des odeurs était dissimulé aux yeux du participant (i.e., dispositif dissimulé sous les tables et la mentonnière).

5.2.3. Procédure

Après mise en place du casque d'EEG, les participants étaient installés dans une salle dont la luminosité était atténuée, face à un écran de stimulation (i.e., écran de 18 pouces avec une résolution de 1280 × 1024 et une fréquence de rafraichissement à 75 Hz) à une distance

fixe de 57 cm. Pour chaque essai, la séquence débutait avec la présentation d'une croix de fixation pendant 400 ms, suivie par la présentation d'un visage pendant 700 ms, et se terminait par la présentation d'un écran vide (i.e., intervalle inter-stimulus) pendant une durée variable allant de 300 à 500 ms (voir **figure 23**). Chaque bloc était composé de 42 essais : 36 essais avec des visages non-colorisés exprimant la neutralité ou l'une des 5 expressions, et 6 « visages rouges ». Les participants avaient pour consigne de détecter les visages rouges dans la séquence de présentation aléatoire des visages en appuyant aussi rapidement que possible sur la barre d'espace du clavier avec leurs deux indexes.

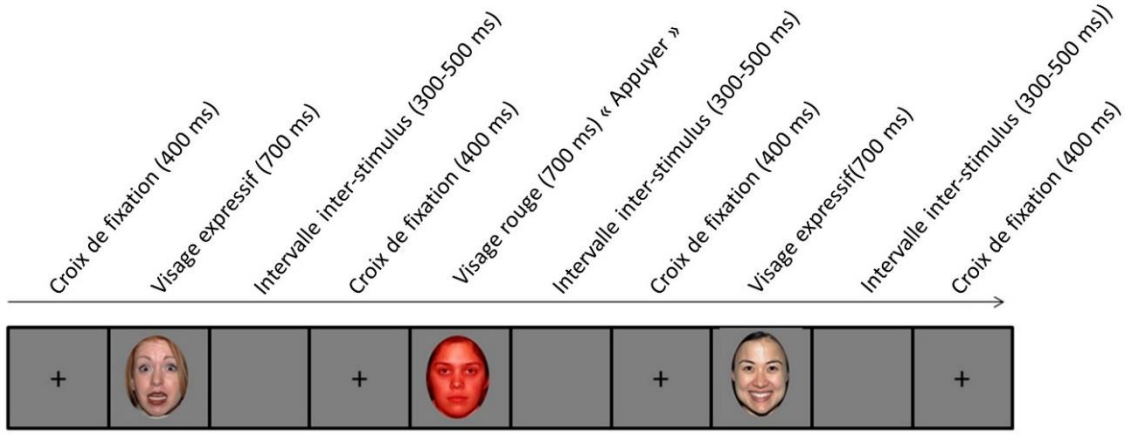


Figure 23 : Schéma représentant la séquence d'événements au cours de 3 essais. Les stimuli étaient présentés pour une durée de 700 ms après présentation d'une croix de fixation pendant 400 ms. Un écran vierge apparaissait ensuite pendant une durée aléatoire variant entre 300 et 500 ms. Au sein de chaque bloc, 36 visages expressifs et 6 visages rouges étaient aléatoirement présentés. La tâche des participants était d'appuyer sur la barre d'espace du clavier chaque fois qu'un visage rouge apparaissait à l'écran.

L'expérience débutait avec une phase d'entraînement de 7 blocs de 42 essais, sans flux d'air. Le test était ensuite effectué et consistait en 21 blocs dont chacun était associé à une condition olfactive (i.e., 7 blocs dans chaque condition). L'ordre de présentation des conditions olfactives était contrebalancé entre les sujets sur les 3 premiers blocs, et la même séquence de présentation était répétée tout au long de l'expérience. Un intervalle inter-blocs d'au moins 1 minute était mis en place, et cette période pouvait être prolongée si le participant souhaitait faire une pause. Enfin, pour chacune des conditions olfactives, la procédure comprenait un total de 252 essais avec des visages non-colorisés (42 essais pour chacune des 6 expressions) et 42 essais avec des « visages rouges ». Seuls les essais avec les visages non-colorisés ont été analysés puisque notre but était d'étudier les interactions olfacto-visuelles pendant l'observation passive d'expressions faciales. La tâche de détection des « visages

rouges » était ici effectuée afin de maintenir l'attention des participants sur les stimuli présentés tout au long de l'expérience.

5.2.4. Enregistrement et analyses EEG

L'enregistrement des données EEG était effectuée en continue grâce à 32 électrodes Ag –AgCl montées sur un casque d'électroencéphalographie (Wavegard, ANT, Enschede, Pays-Bas) respectant le système de classification 10-10 et dont l'électrode de référence était placée en position fronto-centrale (AFz). Les données étaient amplifiées avec un amplificateur REFA (ANT, Enschede, Pays-Bas). La fréquence d'échantillonnage était réglée à 1024 Hz, avec un filtre passe-bande à 0.1 – 100Hz et un maintien de l'impédance des électrodes en dessous de 10kΩ. L'analyse des données était effectuée avec le logiciel ASA (version 46, ANT, Enschede, Pays-Bas). Un filtrage des basses fréquences à 30Hz était appliqué après l'expérience et toutes les électrodes étaient de nouveau référencées sur une référence moyenne commune. Les signaux récoltés ont ensuite été moyennés sur les 600 ms, incluant 100 ms de base de comparaison avant apparition du stimulus, et 500 ms de mesure après le début de l'apparition du stimulus à l'écran. Tout essai contaminé par des mouvements oculaires ou d'autres types d'artefacts était détecté et rejeté au moyen de la routine de détection d'artefact du logiciel ASA réglé à ± 75 µV. Après rejet des artefacts, chaque condition d'expression contenait au moins 27 essais valides pour les participants retenus (étendue allant de 27 à 42 essais).

Les analyses inférentielles ont été faites sur les amplitudes moyennes sur les différentes composantes précédemment désignées comme étant impliquées dans le traitement des visages et des expressions faciales (e.g., Williams et al., 2006). Six composantes sont classiquement étudiées dans la littérature adulte sur le traitement des visages et des expressions faciales (Luo et al., 2010 ; Smith, Weinberg, Moran & Hajcak, 2013) : (1) La P100 (≈100 ms) : est la déflection positive la plus précoce et reflète les premiers processus d'intégration (i.e., traitement des informations visuelles de bas niveau telles que la forme, la couleur, les contraste, etc.), ainsi que l'orientation/capture attentionnelle. Elle est mesurée au niveau des sites occipitaux. (2) La N170 (≈170 ms) : est l'onde négative qui suit la P100. Cette composante est sensible au visage et à l'encodage de sa structure. Elle est mesurée au niveau des sites occipito-pariétaux. (3 et 4) La P200 et la N250 sont deux composantes généralement étudiées au travers d'une composante plus large les englobant toutes les deux :

l'EPN (Early Posterior Negativity) (≈175-275 ms). La P200 correspond au premier pic positif de cette onde, tandis que la N250 est la déflection négative qui la suit. Toutes deux se mesurent au niveau des sites occipito-temporaux et occipito-pariétaux. Dans la littérature, l'EPN est considérée comme étant sensible au contenu émotionnel des stimuli et comme reflétant le traitement visuel accru des stimuli émotionnels. (5) La VPP (≈ 170 ms) : Elle se mesure au niveau des sites centraux médians. Elle correspond à la contrepartie positive de la N170 et il est considéré qu'elle reflète les mêmes processus que cette dernière, avec toutefois une plus forte sensibilité à l'expression étant donné qu'elle est enregistrée sur des sites plus proches des régions frontales. (6) La LPP (≈ 300-500 ms) : est une composante associée à l'attention soutenue allouée aux stimuli ou scènes saillants d'un point de vue motivationnel. Elle est mesurée sur les sites centro-pariétaux.

Dans notre étude, La P100, la N170, la P200 et la N250 étaient analysées sur les électrodes occipitales et pariétales (O1/2, P3/4 et P7/8). La P100 était testée sur le signal moyen collecté sur la fenêtre temporelle allant de 80 à 110ms, la N170 sur la fenêtre allant de 130 à 180 ms, la P200 sur la fenêtre allant de 180 à 240 ms et la N250 sur la fenêtre allant de 240 à 320 ms. Le choix des différentes fenêtres temporelles s'est fait sur la base de l'inspection visuelle du décours temporel de chaque composante. Sur la fenêtre temporelle allant de 130 à 180 ms a également été analysée la « vertex positive potential » (VPP) sur les sites centraux (électrodes C3/4 et Cz ; George et al., 1996). Enfin, la « late positive potential » (LPP) était analysée sur les sites centro-pariétaux (électrodes C3/4, CP5/6 ; Schupp et al., 2004) sur la fenêtre allant de 320 à 480 ms.

Les données furent analysées avec des ANOVAs sur chacune des composantes. Les analyses sur la P100, la N170, la P200 et la N250 incluaient 4 facteurs intra-sujets : l'Expression (colère, dégoût, joie, peur, tristesse et neutre), le Contexte Olfactif (plaisant, déplaisant et contrôle), l'Hémisphère (gauche et droit) et le Site (O1/2, P3/4 et P7/8). Pour les analyses sur la VPP un autre facteur Site était utilisé (C3, Cz et C4) et le facteur Hémisphère n'était pas inclus puisque l'électrode centrale (Cz) était ici utilisée pour l'extraction de la VPP. La LPP était quant à elle analysée avec les facteurs Expression, Contexte Olfactif et Hémisphère inchangés, ainsi qu'avec un autre facteur Site (C3/4 et CP5/6). Des corrections de Greenhouse-Geisser étaient appliquées sur les effets principaux et les interactions. Les tests post-hoc étaient effectués avec des tests HSD de Tukey. Dans un souci de clarté, les effets principaux et interactions impliquant un effet des facteurs Site et Hémisphère ne seront décrits que s'il y a interaction avec les facteurs Expression et/ou Contexte Olfactif.

5.3. RESULTATS

Nous présenterons dans un premier temps les résultats concernant l'effet seul de l'expression faciale (quel que soit le contexte olfactif), afin de considérer les étapes de traitement de l'expression. Suite à cela, les résultats relatifs aux modulations du traitement induites par le contexte olfactif seront présentés en détails.

5.3.1. Les différentes étapes du traitement des expressions faciales

Les modulations des réponses cérébrales aux électrodes O1/2, P3/4 et P7/8 sont illustrées sur la **figure 24**. Les modulations sur les électrodes CP5/6, C3/4 et CZ sont quant à elles illustrées en **figure 25**. Des patterns de réponses distincts émergent pour les différentes composantes (P100, N170, VPP, P200 et N250), ce qui indique la présence de différentes étapes dans le traitement visuel des visages émotionnels.

Pour la ***P100***, l'effet simple de l'Expression n'était pas significatif [$F(4,89)= 1.06$], mais il interagissait toutefois significativement avec le Site [$F(6,135)= 6.79$, $\varepsilon= .59$, $p<.0001$, $\eta p^2= .23$] avec un effet significatif de l'Expression à la fois sur P3/4 et P7/8 [$F(4,96)= 5.67$, $\varepsilon= .84$, $p<.001$, $\eta p^2= .20$ et $F(5,104)= 4.73$, $\varepsilon= .90$, $p<.001$, $\eta p^2= 0.17$] mais pas sur O1/2 ($F<1$). Les comparaisons post-hoc sur P3/4 ont indiqué que la P100 est significativement plus ample, par rapport à la neutralité, pour la colère ($p<.01$), la tristesse ($p<.001$) et la joie ($p<.0001$), tandis que celles effectuées sur P7/8 ont révélé que la P100 était significativement plus positive pour la colère et le dégoût ($p<.01$ et $p<.001$, respectivement).

Un effet simple de l'expression émergeait au niveau de la ***VPP*** [$F(4,95)= 8.38$, $\varepsilon= .83$, $p<.0001$, $\eta p^2= .27$] avec un pattern de résultats similaire à celui observé sur la P100 (voir **figure 25**). La VPP était moins ample pour la neutralité en comparaison avec le dégoût, la colère et la peur (tous les $ps<.01$), mais aucune différence significative n'émergeait pour la joie et la tristesse. La VPP était d'amplitude plus positive pour le dégoût que pour la joie et la tristesse (tous les $ps<.01$), et pour la colère par rapport à la joie ($p<.05$).

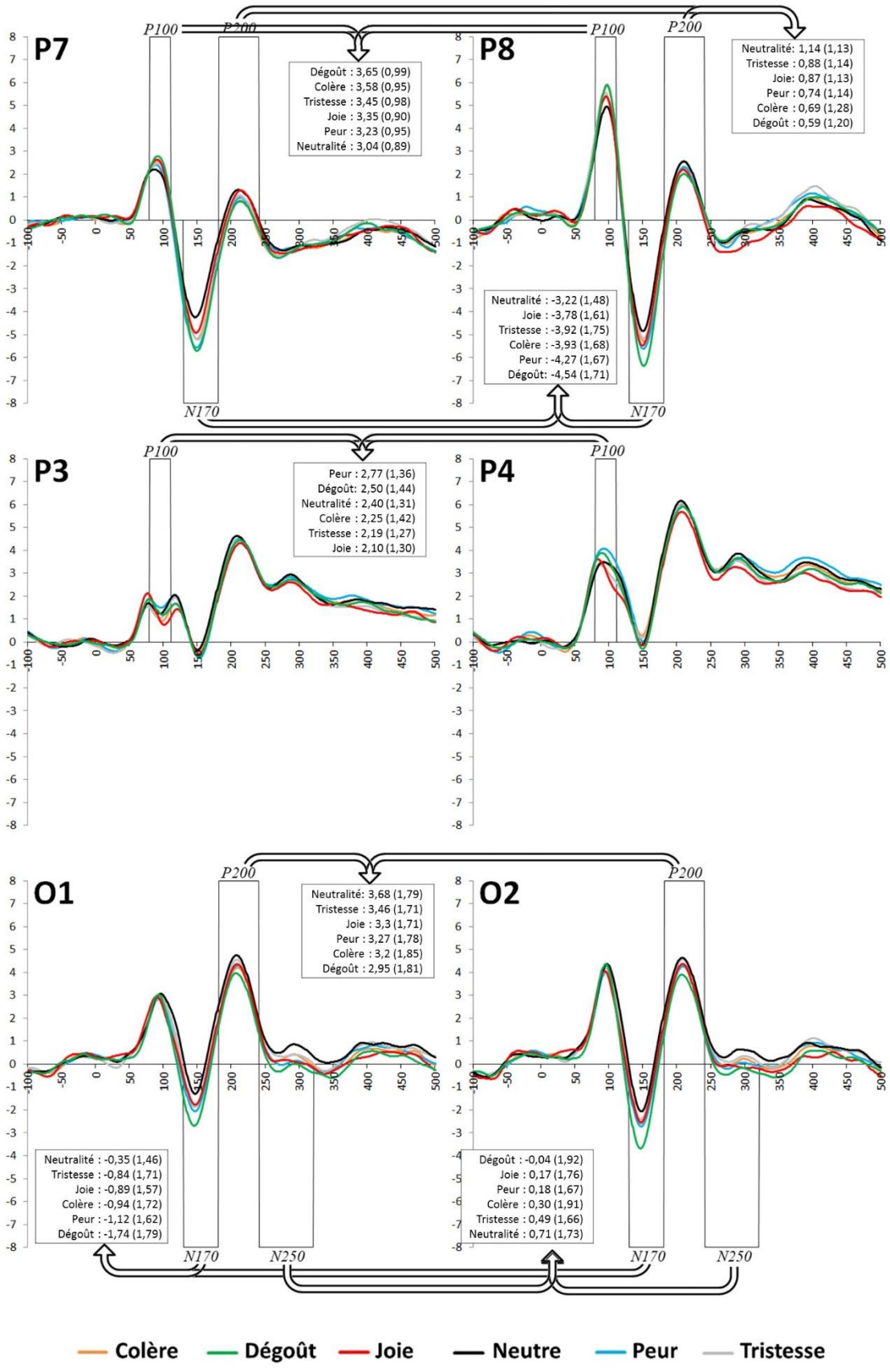


Figure 24 : Effet simple de l'expression sur les électrodes occipito-pariétales pour la P100, la N170, la P200 et la N250. Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans les encadrés.

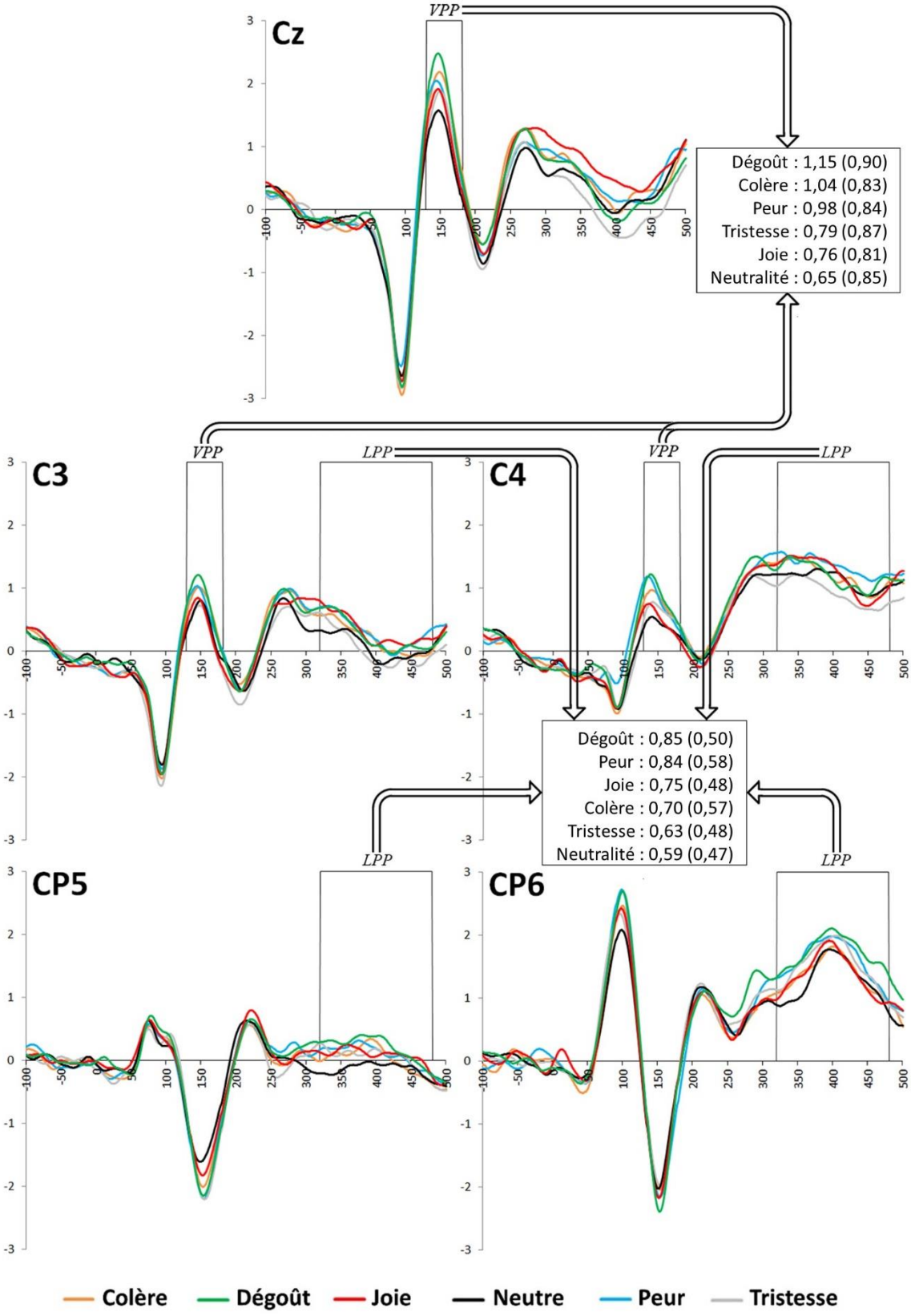


Figure 25 : Effet simple de l'expression sur les électrodes centrales et pariétales pour la VPP et la LPP. Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans les encadrés.

La ***N170***, bien que mesurée sur la même fenêtre temporelle au niveau des sites occipitaux et pariétaux latéraux, a révélé un pattern de résultats d'allure différente. En effet, comme observé en **figure 24**, il semble qu'une différence entre expression neutre et émotionnelle émerge au niveau de cette composante, ainsi qu'entre le dégoût et les autres expressions. Les analyses ont révélé que l'effet simple de l'Expression était significatif [$F(3,77)= 10.85$, $\varepsilon= .67$, $p<.0001$, $\eta p^2= .32$] et que son interaction avec le Site l'était elle aussi [$F(5,124)=11.66$, $\varepsilon=.54$, $p<.0001$, $\eta p^2=.34$]. L'effet de l'Expression était significatif à la fois sur O1/2 et sur P7/8 [$F(3,64)= 12.02$, $\varepsilon= .56$, $p<.0001$, $\eta p^2= .34$ et $F(4,88)= 17.06$, $\varepsilon= .76$, $p<.0001$, $\eta p^2= .43$], mais pas sur P3/4 [$F(4,81)= 2.02$]. Les comparaisons post-hoc ont indiqué un pattern relativement similaire entre O1/2 et P7/8. Au niveau des deux sites, la N170 était de plus forte amplitude pour le dégoût par rapport à l'ensemble des autres expressions (tous les *ps*<.0001, sauf par rapport à la peur sur P7/8) et d'amplitude réduite pour la neutralité par rapport à toutes les autres expressions (tous les *ps*<.0001). Sur P7/8, la N170 était également significativement plus ample pour la peur que pour les autres expressions (tous les *ps*<.05) à l'exception du dégoût (comme mentionné au-dessus).

La ***P200*** reproduisait partiellement le pattern observé sur la N170, puisqu'une distinction entre les visages neutres et les visages de dégoût vis-à-vis des autres expressions y était présente. L'effet de l'Expressions était significatif [$F(4,92)= 2.84$, $\varepsilon= .80$, $p<.05$, $\eta p^2= .11$] et interagissait avec le Site [$F(6,138)= 3.40$, $\varepsilon= .60$, $p<.01$, $\eta p^2= .13$]. L'effet de l'expression était significatif à la fois sur O1/2 et P7/8 [$F(4,85)= 3.59$, $\varepsilon= .74$, $p<.05$, $\eta p^2= .14$ et $F(4,92)= 3.03$, $\varepsilon= .80$, $p<.05$, $\eta p^2= .12$] mais pas sur P3/4 [$F(4,86)= 1.76$]. Les comparaisons post-hoc ont révélé que sur O1/2, la P200 était plus positive pour la neutralité que pour les autres expressions (tous les *ps*<.05), à l'exception de la tristesse. Sur P7/8, l'amplitude était plus haute pour la neutralité que pour la colère, le dégoût et la peur (tous les *ps*<.01), mais pas pour la joie et la tristesse.

L'effet simple de l'Expression n'atteignait pas la significativité sur la ***N250*** [$F(3,78)= 1.46$]. Toutefois, l'Expression interagissait significativement avec le Site [$F(6,132)= 3.75$, $\varepsilon= .57$, $p<.01$, $\eta p^2= .14$]. Les analyses ont démontré que l'effet de l'expression était significatif seulement sur O1/2 [$F(3,70)= 3.01$, $\varepsilon= .61$, $p<.05$, $\eta p^2= 0.12$; sur P3/4 : ($F(3,79)= 1.54$; sur P7/8 : $F<1$].Les tests post-hoc ont indiqué que par rapport à la neutralité, la plupart des expressions émotionnelles ont déclenché une N250 plus négative sur O1/2. Cet effet était significatif pour la colère ($p<.05$), le dégoût ($p<.0001$), la joie ($p<.0001$), et la peur ($p<.001$),

mais pas pour la tristesse. Enfin, le dégoût engendrait lui aussi une N250 plus négative par rapport à la tristesse (p<.001).

Pour la ***LPP***, l'effet simple de l'Expression était significatif [F(4,83)= 4.87, ε= .72, p<.01, ηp^2= .17]. Celui-ci était lié à une plus forte amplitude de la composante pour le dégoût et la peur en comparaison avec la tristesse (les deux *ps*<.05) et la neutralité (les deux *ps*<.05). L'interaction entre le Site et l'Expression atteignait elle aussi la significativité [F(4,88)= 2.76, ε= .77, p<.05, ηp^2= .11], et les analyses ont indiqué la présence d'un effet significatif de l'expression sur les sites CP5/6 [F(4,87)= 4.22, ε= .76, p<.01, ηp^2= .16] et C3/4 [F(4,86)= 3.59, ε= .75, p<.05, ηp^2= .17]. Les tests post-hoc ont montré que la LPP était plus ample pour le dégoût par rapport à la neutralité (p<.01) sur CP5/6. Tandis que sur C3/4, l'amplitude était plus élevée pour la peur que pour la tristesse (p<.01).

5.3.2. Les différentes étapes de l'effet du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales

Le contexte olfactif a modulé les réponses cérébrales aux expressions faciales en deux étapes séquentielles : 1) en venant renforcer les réponses quelle que soit l'émotion communiquée par les visages lorsqu'une odeur était présente, ce qui était tout spécialement observé au niveau des sites centraux dans la fenêtre temporelle allant de 130 à 180 ms (i.e., la VPP), mais aussi au niveau des sites centro-pariétaux et temporaux dans la même fenêtre temporelle ; et 2) puis en venant interagir avec l'expression faciale au niveau de la P200 enregistrée sur les sites occipitaux.

Pour la première étape, les modulations des réponses par le contexte olfactif sont illustrées en **figure 26**. L'effet simple du Contexte Olfactif au niveau de la VPP n'était que tendanciel [F(2,41)= 2.85, ε= .89, p= .075], mais il interagissait significativement avec le Site [F(4,82)= 3.27, ε= .89, p<.05, ηp^2= .12]. L'effet du Contexte Olfactif était significatif sur Cz [F(2,45)= 4.16, ε= .97, p<.05, ηp^2= .15] et C4 [F(2,46)= 3.98, ε= 1, p< .05, ηp^2= .15], mais pas sur C3 (F<1). Pour Cz, les comparaisons post-hoc ont indiqué que la VPP était plus ample en contexte plaisant plutôt qu'en contexte olfactif déplaisant et contrôle (les deux *ps*<.01). Toutefois, sur C4, aucun effet ne fut observé après correction des post-hoc, et ce, bien qu'un effet soit visible sur la **figure 26**. Aucun autre effet ou interaction impliquant le Contexte Olfactif n'était observé sur la VPP. Etant donné que l'effet du contexte olfactif, présent quel

que soit l'émotion exprimée, était observé seulement au niveau des sites centraux, et qu'aucune comparaison post-hoc n'a indiqué un effet de l'expression sur C4 bien qu'un effet simple soit présent, nous avons effectué des analyses complémentaires afin de caractériser plus précisément la temporalité et la topographie de cet effet dans cette fenêtre temporelle (130-180 ms). Les détails et résultats relatifs à ces analyses sont fournis dans la section suivante.

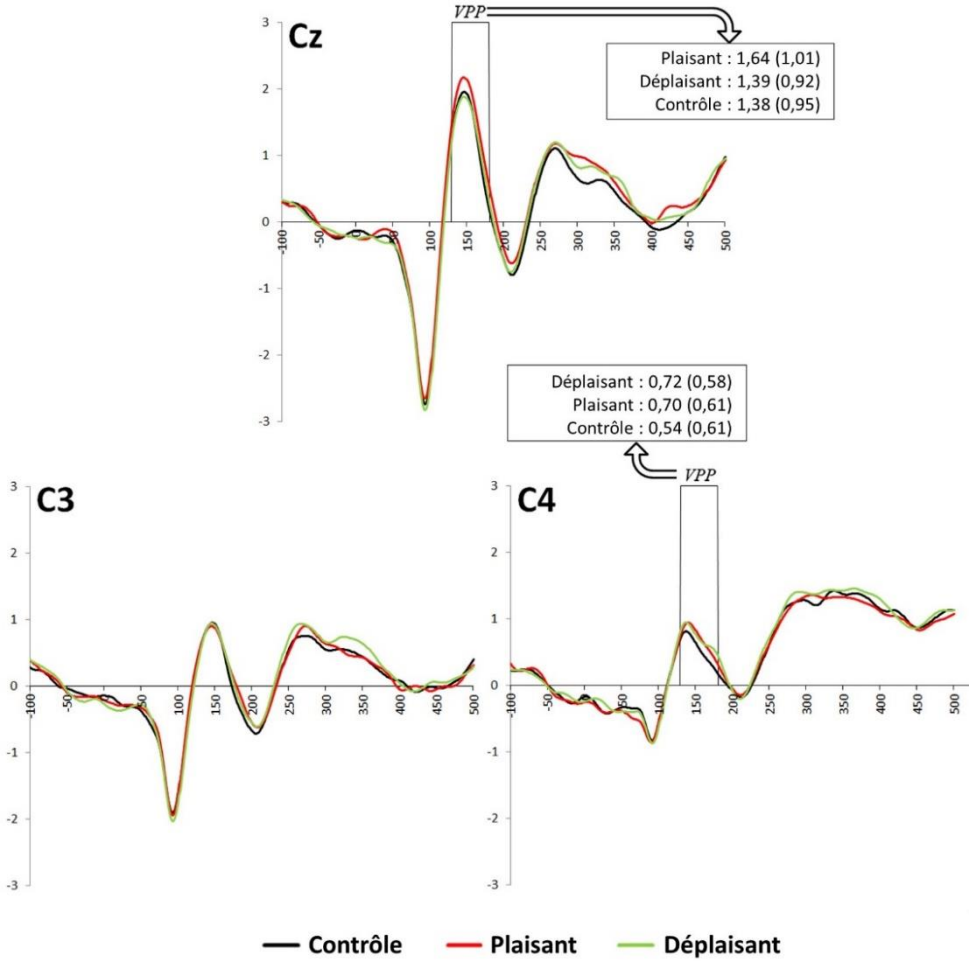


Figure 26 : Effet simple du contexte olfactif sur les électrodes centrales pour la VPP. Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans les encadrés.

Pour la seconde étape, l'interaction entre l'Expression et le Contexte Olfactif est illustrée en **figure 27** sur les électrodes O2 et P8. Comme observable sur la figure, les données suggèrent que les effets de l'expression sur la P200 et la N250, précédemment décris, sont plus forts en contexte déplaisant qu'en contexte olfactif contrôle et plaisant ; avec

notamment une accentuation des différences de réponse pour la neutralité vis-à-vis de la joie et du dégoût en contexte olfactif déplaisant.

Au niveau de la P200, les analyses incluant les 3 sites (O1/2, P3/4, et P7/8) ont suggéré la présence de différences inter-hémisphériques dans l'interaction entre l'Expression et le Contexte Olfactif. Toutefois, après correction de Greenhouse-Geisser, l'interaction entre les 3 facteurs n'atteignait plus la significativité [$F(7,153)= 1.89$, $\varepsilon= .67$, $p= .078$]. Dans le but d'explorer cet effet, nous avons donc effectué les mêmes analyses en restreignant les Sites inclus à ceux où un effet simple de l'expression était présent (i.e., O1/2 et P7/8). Ces nouvelles analyses ont indiqué une interaction significative entre les facteurs Expression, Contexte Olfactif et Hémisphère sur O1/2 [$F(6,137)= 2.26$, $\varepsilon= .60$, $p<.05$, $\eta p^2= .09$], mais pas sur P7/8 [$F(7,155)= 1.54$]. Les analyses complémentaires sur O1/2 ont révélé que l'interaction entre Expression et Contexte Olfactif était significative sur l'hémisphère droit [$F(6,138)= 2.44$, $\varepsilon= .60$, $p<.05$, $\eta p^2= .10$], mais pas sur l'hémisphère gauche [$F(7,152)= 1.11$]. De façon intéressante, sur l'hémisphère droit (i.e., électrode O2), l'effet de l'expression n'était pas significatif en contexte olfactif plaisant et contrôle [$F(4,89)= 1.94$ et $F(4,84)= .50$, respectivement], tandis qu'il l'était en contexte olfactif déplaisant [$F(4,97)= 5.30$, $\varepsilon= .84$, $p<.001$, $\eta p^2= .19$]. En contexte déplaisant la P200 était de plus forte amplitude pour la neutralité par rapport à toutes les autres expressions (tous les *ps*<.05), sauf la peur, et de moindre amplitude pour le dégoût et la joie que pour les autres émotions (tous les *ps*<.001). Concernant l'effet du contexte olfactif, l'amplitude de la P200 en réaction au dégoût et à la joie était plus négative en contexte déplaisant qu'en contexte plaisant et contrôle (tous les *ps*<.01). Au contraire, pour la neutralité la P200 était plus positive en contexte déplaisant qu'en contexte plaisant ($p<.01$) et contrôle ($p<.05$). Pour les autres expressions, l'amplitude était plus élevée pour la colère en contexte plaisant et déplaisant en comparaison avec le contexte contrôle (les deux *ps*<.0001), sans différence entre les deux contextes olfactifs. Pour la peur, seule une différence entre le contexte contrôle et le contexte déplaisant était présente, avec une P200 plus ample en contexte déplaisant ($p<.0001$). Aucune différence selon le contexte olfactif n'était observée pour la tristesse. Enfin, les analyses sur la N250 et la LPP n'ont pas révélé d'effet, indiquant ainsi que l'interaction entre Contexte Olfactif et Expression disparaissait aux alentours de 240 ms après l'apparition du visage.

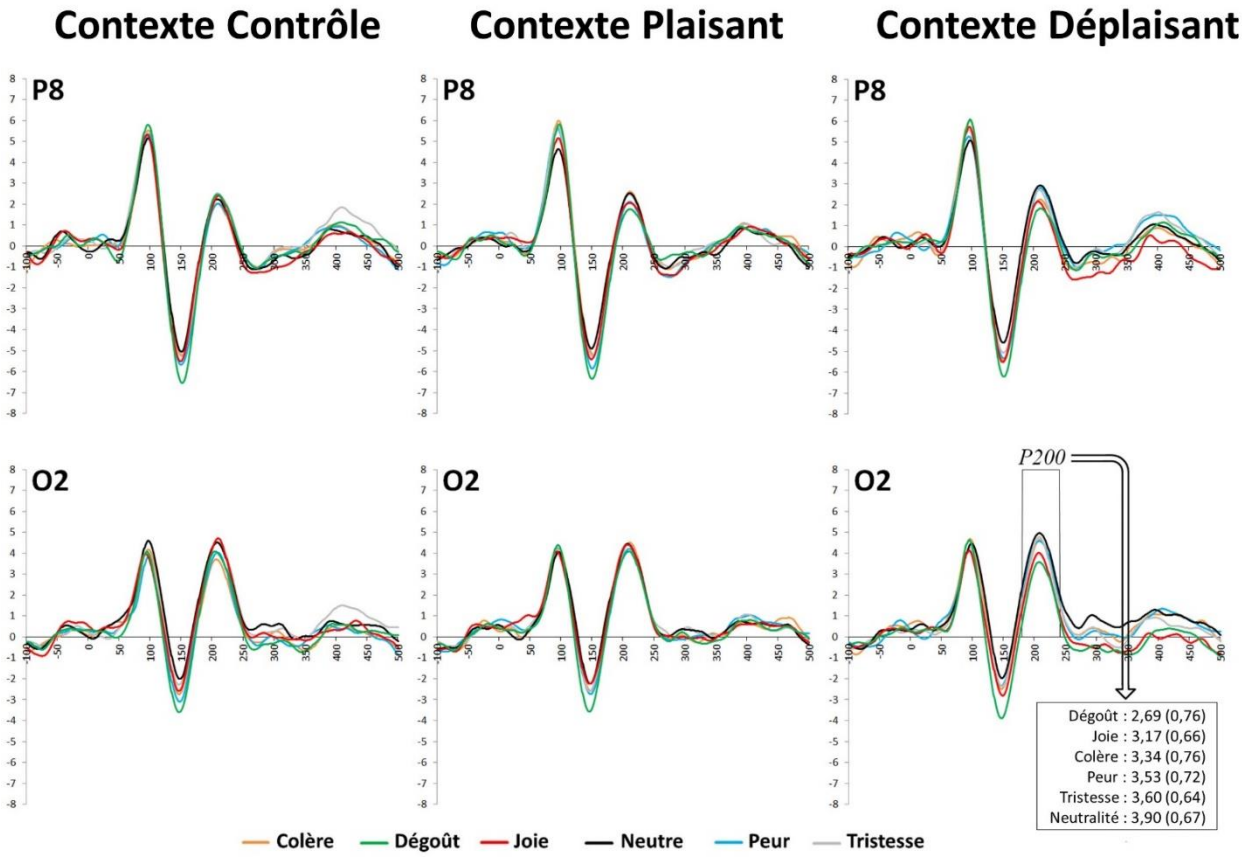


Figure 27 : Interaction entre expression et contexte olfactif sur les électrodes occipito-pariétales de l'hémisphère droit pour la P200 et la N250. Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque expression sont indiquées dans les encadrés.

5.3.3. Analyses complémentaires sur la première étape d'influence indifférenciée du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales

Etant donné que les résultats ont indiqué un effet du contexte olfactif quelle que soit l'émotion communiquée par le visage expressif seulement sur les sites centraux (i.e., amplitude de la VPP), et parce que cet effet n'a pas pu être clairement identifié au cours des comparaisons post-hoc sur l'électrode C4, nous avons effectué des analyses complémentaires en vue de pouvoir caractériser plus précisément le décours temporel et la topographie de cet effet. Dans un premier temps, nous avons calculé les *Fs* pour l'effet simple du Contexte Olfactif sur chacune des 32 électrodes et à chacun des temps d'échantillonnage sur la fenêtre allant de 130 à 180 ms. Afin de contrôler les faux positifs, un critère de significativité consécutive (e.g., Guthrie & Buchwald, 1991) était utilisé pour chaque électrode afin de déterminer le décours temporel de l'effet : au moins 15 relevés consécutifs devaient être significatifs pour indiquer le début de l'effet, tandis que 15 relevés consécutifs non-

significatifs indiquaient la fin de l'effet. Du fait de ce critère, 30 temps d'échantillonnage entourant la fenêtre temporelle d'intérêt (15 avant et 15 après) ont été inclus dans le calcul des *Fs* (fenêtre temporelle complète allant ainsi de 115 à 195 ms). De plus, nous avons appliqué des analyses similaires en t-test sur les différences entre les contextes olfactifs sur la même fenêtre temporelle pour les électrodes montrant un effet significatif du contexte. Pour ces deux analyses, les valeurs de *p* étaient retranscrites en codes couleur afin d'illustrer les résultats. Pour l'effet simple du contexte olfactif, les effets significatifs étaient représentés en vert, avec les teintes les plus sombres indiquant les valeurs de *p* les plus faibles. Pour les comparaisons en t-tests, les effets significatifs étaient représentés en rouge pour les différences positives et en bleu pour les différences négatives ; ici aussi les teintes les plus sombres indiquées les valeurs de *p* les plus faibles. L'ensemble des résultats est illustré en **figure 28**.

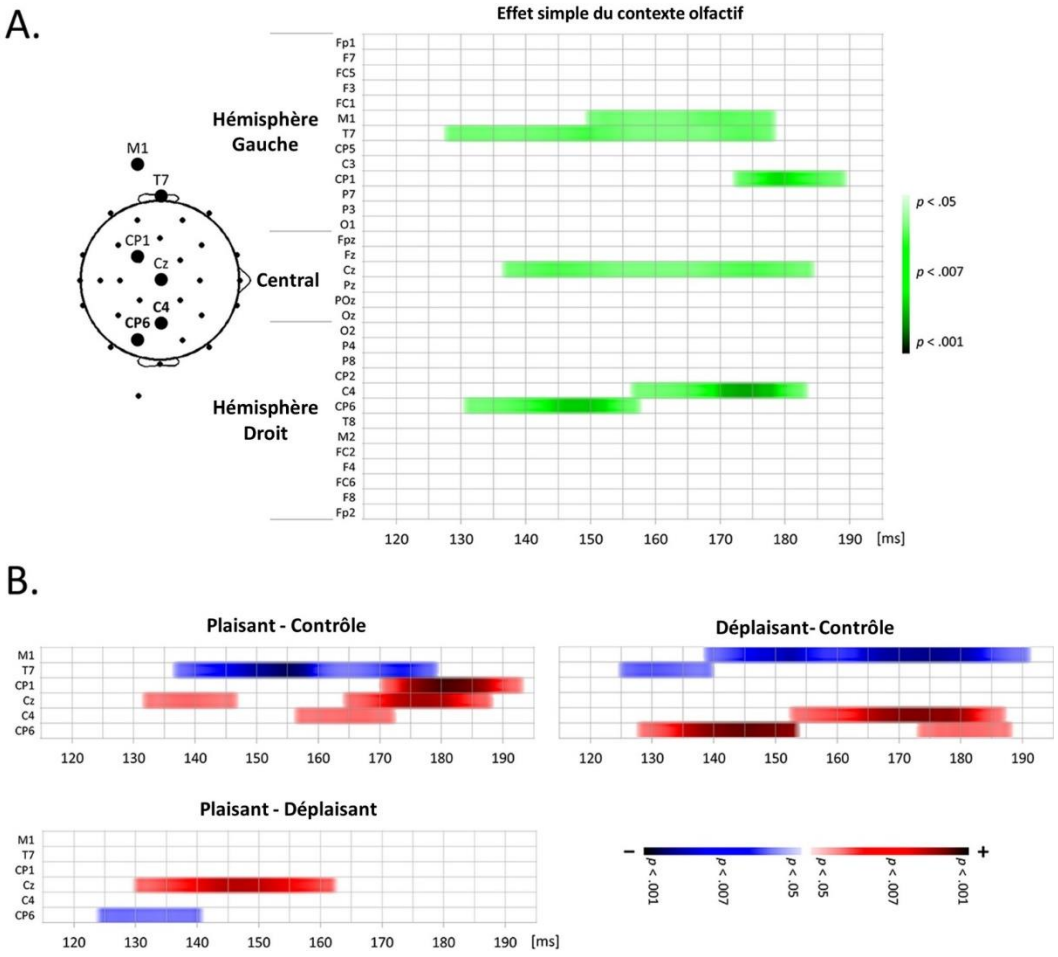


Figure 28 : (A) Décours temporel des effets simples du contexte olfactif sur chacune des électrodes dans la fenêtre temporelle allant de 115 à 195 ms, calculé au moyen d'un critère de significativité consécutive sur 15 point d'échantillonnage. Les valeurs de *p* sont indiquées au moyen d'un code couleur vert, avec les teintes les plus sombres indiquant les valeurs les plus faibles. (B) Décours temporel des différences entre chaque contexte olfactif dans la même fenêtre temporelle pour les électrodes ayant montré un effet significatif du contexte olfactif (le même critère de significativité consécutive était appliqué). Les valeurs de *p* sont indiquées au moyen d'un code couleur rouge pour les différences positives, et bleu pour les différences négatives, avec les teintes les plus sombres indiquant les valeurs de *p* les plus faibles.

Pour l'effet principal de l'expression, les résultats des analyses sur l'amplitude moyenne de la VPP ont indiqué la présence d'un effet significatif entre 135 et 185 ms sur l'électrode Cz et entre 155 et 185 ms sur la C4 ; tandis qu'aucun effet significatif n'était observé sur C3. Sur l'électrode Cz, les analyses ont confirmé la différence entre le contexte plaisant et les contextes contrôle et déplaisant. Il est à souligné que là où les comparaisons post-hoc n'avaient pas indiqué de différences significatives entre les odeurs sur C4, ici les résultats ont indiqué que les contextes plaisant et déplaisant déclenchaient une VPP plus positive que le contexte contrôle. De façon intéressante, un effet simple du Contexte Olfactif était également observé sur les sites centro-pariétaux et temporaux. Cet effet débutait dès 130 ms après le début de la présentation des visages sur les électrodes T7 et CP6, puis 20 ms plus tard sur la M1 et 40 ms plus tard sur la CP1. Les tests T de Student ont indiqué des différences significatives entre le contexte plaisant et le contexte contrôle sur les électrodes T7 et CP1. Les différences entre le contexte déplaisant et le contexte contrôle apparaissant quant à elles principalement sur les électrodes M1 et CP6 ; et un effet plus précoce était également présent sur la T7. Enfin, seule la CP6 a également montré une différence rapide entre le contexte plaisant et déplaisant sur les latences précoces. Il est à relever que la direction de ces différences significatives reflétait majoritairement des amplitudes plus élevées de la VPP en contexte avec odeurs par rapport au contexte contrôle, puisqu'une composante plus positive était relevée sur les sites centraux et centro-pariétaux. En résumé, les contextes olfactifs plaisant et déplaisant ont déclenché une augmentation de l'amplitude par rapport au contexte sans odeur dans la fenêtre de 115 à 195 ms, mais ces effets étaient observés sur des sites différents selon l'odeur (Cz, C4, T7 et CP1 pour l'odeur plaisante ; C4, M1, T7 et CP6 pour l'odeur déplaisante).

Afin d'explorer plus précisément les différences dans la topographie des effets provoquées par les odeurs plaisantes et déplaisantes par rapport à la condition contrôle, nous avons effectué deux analyses en composantes principales (ACPs) incluant les 6 électrodes montrant un effet significatif de l'odeur en tant que variable et chaque temps d'échantillonnage sur la fenêtre temporelle allant de 115 à 195 ms comme observation. La première analyse a été faite sur les différences entre le contexte plaisant et le contexte contrôle ; la seconde a été faite sur les différences entre contexte déplaisant et contrôle. Les analyses furent effectuées sur la taille d'effet (d de Cohen). Une rotation permettant la maximisation de la variance était appliqué afin de minimiser le recouvrement entre

composantes et le nombre de variables était choisi sur la base d'une valeur propre minimum de 1.

La première ACP indiquait deux composantes principales (PC1 et PC2) ayant des valeurs propres de 4.28 et 1.13 respectivement (part de variance expliquée : 71,4 % pour PC1 et 18,9 % pour PC2). Les électrodes M1, T7, CP, Cz et C4 étant incluses dans PC1, tandis que seule CP6 était incluse dans PC2. Ainsi, PC1 incluait toutes les électrodes montrant un effet significatif de l'odeur plaisante, sauf M1. PC2 incluait seulement l'électrode CP6 qui n'a pas montré d'effet de l'odeur plaisante.

La seconde ACP a elle aussi indiqué deux composantes principales ayant pour valeur propre respective 3.05 et 2.69 (part de variance expliquée : 50.8% pour PC1 et 44.8% pour PC2). PC1 incluait T7, C4 et CP, tandis que PC2 incluait M1, CP1 et Cz. Ainsi, les 3 électrodes montrant un effet significatif de l'odeur déplaisante étaient incluses dans la première composante, tandis que les trois odeurs incluses dans la seconde composante ne montraient pas d'effet significatif de l'odeur, sauf M1.

En résumé, les ACPs ont confirmé que les effets des deux odeurs par rapport à la condition contrôle dans la fenêtre allant de 115 à 195 ms se développaient sur des sites d'enregistrement différents, bien que de subtiles différences dans la topographie aient été suggérées par les analyses précédentes.

5.4. DISCUSSION

En utilisant une technique à haute résolution temporelle (i.e., potentiels évoqués), cette étude avait pour but d'étudier le décours temporel des modulations induites par le contexte olfactif sur le traitement des visages expressifs. Les résultats obtenus correspondent avec les prédictions que nous avions formulées et ont apporté de nouveaux éléments relatifs au décours temporel des interactions olfacto-visuels dans le traitement des expressions faciales. Dans ces interactions, trois étapes principales ont pu être mises en évidence : (1) dans un premier temps, un effet simple des expressions faciales débutant à 80 ms et s'étendant jusqu'à 480 ms après le début de la présentation du visage, au niveau des localisations postérieures et centrales ; (2) dans un second temps un effet simple des odeurs venant globalement moduler les étapes précoces de traitement du visage (sans différenciation selon l'expression) entre 130

et 180 ms au niveau des sites centraux, centro-pariétaux et temporaux ; (3) enfin, une interaction entre odeurs et expressions faciales aux alentours de 200 ms après le début de l'apparition du visage, au niveau des régions occipitales.

5.4.1. Les différentes étapes de traitement des expressions faciales

Dans un premier temps, nous avons pu observer la présence d'une sensibilité précoce aux expressions. En effet, pour certaines expressions (e.g., la peur, la colère et le dégoût), les réponses cérébrales étaient augmentées au niveau de la P100, débutant aux alentours de 80 ms après le début de la présentation des visages. Ces observations corroborent celles déjà rapportées dans la littérature faisant état d'une modulation des réponses cérébrales aux expressions de menace dès les étapes précoces d'intégration (e.g., Eimer & Holmes, 2002 ; Kolassa & Miltner, 2006 ; Pourtois et al., 2005 ; Utama et al. 2009). Dans ces études, il est considéré que cette augmentation des réponses cérébrales dérive d'une plus forte mobilisation de l'orientation attentionnelle et/ou des mécanismes d'alerte pour ces expressions, et a été interprétée comme liée à une plus forte pertinence pour soi de ces expressions (puisqu'indiquant un danger immédiat) par rapport à d'autres (e.g., la joie, la tristesse et la neutralité). Il est supposé que cette sensibilité précoce aux expressions refléterait l'activité de voies corticales rapides (Pessoa & Adolphs, 2010) ou les influences de l'amygdale (Vuilleumier, Armony, Driver & Dolan, 2001), qui impliquent un traitement visuel grossier de l'information visuelle par les voies magnocellulaires (Pourtois et al., 2005). Les mêmes expressions émotionnelles ont également augmenté l'amplitude de la VPP (environs 130 ms après l'apparition du visage sur les électrodes centrales), ce qui corrobore là aussi les résultats rapportés par les études antérieures, faisant état de réponses positives sensibles aux expressions au niveau des sites centraux et antérieurs (Eimer & Holmes, 2002 ; Luo et al., 2010 ; Smith et al., 2013 ; Williams et al., 2006). Dans ces études, il a été suggéré que cette activité positive reflèterait une amélioration/renforcement émotionnel du traitement visuel (Eimer & Holmes, 2002 ; Smith et al., 2013), qui pourrait être plus large pour les expressions ayant précédemment déclenché une P100 plus ample. Ainsi, après une première détection de pertinence émotionnelle au niveau de la P100 (sur base d'un traitement grossier de l'information visuelle), l'amplitude de la VPP en réponse aux expressions faciales pourrait refléter une réponse aux émotions véhiculant un signal d'alerte.

Le contenu émotionnel des expressions a également modulé la N170, où les expressions émotionnelles, et tout spécialement le dégoût, ont donné lieu à une réponse différenciée par rapport à la neutralité. La N170 est connue comme une composante reflétant le codage perceptuel des informations spécifiques aux visages (George et al., 1997 ; Rossion & Jacques, 2011) et comme étant sensible aux variations d'expression faciale (Luo et al., 2010 ; Utama et al., 2009 ; Williams et al., 2006). Du fait que la N170 reflète l'encodage de la configuration faciale, il a été suggéré qu'elle pourrait être sensible à la variation d'intensité d'expression plutôt qu'aux catégories émotionnelles (e.g., Utama et al., 2009). Si l'on suit cette interprétation, étant donné que nous avons observé que le dégoût, et à un moindre degré la peur, déclenchaient une N170 de plus forte amplitude, alors ces expressions étaient les plus expressives dans notre échantillon de stimuli (i.e., les plus distinctes en terme de changement de configuration par rapport à la neutralité). Une interprétation alternative serait que les éléments diagnostics/distinctifs pour la perception du dégoût et de la peur sont plus saillants. En effet, il a été suggéré que la N170 pourrait refléter l'intégration d'éléments diagnostics pour la catégorisation des expressions faciales (Schyns, Petro & Smith, 2007, 2009). De futures études devraient être effectuées afin de lever cette ambiguïté relative aux informations émotionnelles auxquelles la N170 serait sensible (i.e., sensibilité à l'intensité d'expression *versus* sensibilité aux éléments diagnostics). En ligne avec les résultats des études précédentes (Smith et al., 2013 ; Williams et al., 2006), nous avons observé des différences dans les patterns de réponses aux expressions au niveau de la VPP et de la N170. Cela suggère donc que bien que la VPP représente la contrepartie positive de la N170, toutes deux ne doivent pas avoir exactement les mêmes générateurs, parmi lesquels certains doivent être impliqués dans le traitement des expressions faciales. Certains auteurs avancent que ces différences seraient liées au fait que la VPP est mesurée à proximité des régions frontales et que les différences reflèteraient l'activité dans ces régions (e.g ., Smith et al., 2013).

Concernant la P200 et la N250 (i.e., l'EPN), les résultats ont montré une plus forte négativité de ces composantes pour toutes les expressions par rapport à la neutralité, sauf pour la tristesse. Les études antérieures ont rapporté que la P200 et la N250 étaient toutes deux modulées par les variations d'expressions faciales (Eimer & Holmes, 2002 ; Sato et al., 2001 ; Schupp et al., 2004 ; Williams, 2006). Il est notamment décrit que ces deux composantes seraient plus négatives en réaction aux visages expressifs par rapport aux visages neutres. Cette plus forte négativité est considérée comme reflétant la présence d'un traitement accru des informations émotionnelles (Schupp et al., 2004 ; Smith et al., 2013) ; ce qui pourrait

indiquer la présence de projections de l'amygdale (Sato et al., 2001) et/ou de l'insula (Ashley et al., 2004) sur le système visuel. Il est également à supposer que de façon plus globale l'EPN pourrait indiquer la première étape d'intégration spécifique de la signification émotionnelle de l'expression et un partage du contenu émotionnel avec les diverses structures en charge du traitement émotionnel (e.g., cortex orbito-frontal, insula, amygdale, cortex somatosensoriel). Le fait que dans nos résultats l'EPN soit plus négative pour tous les visages expressifs (sauf la tristesse) par rapport à la neutralité semble s'aligner avec cette hypothèse. Ainsi, après différentes étapes reflétant la capture attentionnelle par la pertinence émotionnelle de l'expression (P100 et VPP) et le codage perceptuel des visages expressifs (N170), l'EPN semble indiquer la première étape d'intégration des visages expressifs qui soit sensible à la signification des expressions ; cela pourrait être lié aux connexions entre le cerveau émotionnel et le système visuel.

Enfin, nos résultats montrent une augmentation de la LPP, tout particulièrement pour le dégoût et la peur par rapport aux autres expressions. La LPP est interprétée comme reflétant l'attention soutenue portée aux stimuli saillants d'un point de vue motivationnel et/ou le recours à des traitements plus élaborés en lien avec le traitement émotionnel (Schupp et al., 2004 ; Williams et al., 2006). Dans notre étude, il était observé que la peur et le dégout, mais pas la colère, ont déclenché une LPP de plus forte amplitude. Ainsi, les résultats suggèrent que la peur et le dégoût était émotionnellement/motivationnellement plus pertinents par rapport aux autres expressions. Cela pourrait s'expliquer par la plus forte saillance et/ou intensité de ces expressions, comme indiqué par les effets observés au niveau de la N170. Il est à noter que les différences entre nos résultats par rapport aux études antérieures dans les réponses observées sur la LPP, peuvent être attribuées à la tâche donnée aux participants : ici nous avons donné une tâche orthogonale aux participants et non une tâche impliquant un traitement explicite des expressions, ce qui peut avoir réduit certains effets puisqu'il n'y a pas motivation explicite à traiter les expressions.

Dans leur ensemble, les résultats sur l'effet des expressions faciales sur les réponses cérébrales indiquent qu'entre 80 et 480 ms après l'apparition des visages, l'expression émotionnelle déclenche différentes modulations des réponses cérébrales associées à différents mécanismes permettant l'élaboration d'une représentation fine de l'expression et l'extraction/perception de son contenu émotionnel.

5.4.2. Les différentes étapes des effets du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales

Nos résultats indiquent la présence d'une influence en deux étapes du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales. Au cours de la première étape a lieu une augmentation des réponses cérébrales entre 130 et 180 ms après le début de l'apparition du visage lorsqu'une odeur est présente dans le contexte, et ce, quelle que soit l'émotion communiquée par le visage. Cet effet est en accord avec les études antérieures et avec notre hypothèse initiale puisqu'il indique la présence d'une première étape aspécifique dans l'influence du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales (Forscher & Li, 2012 ; Rubin et al., 2012). Nos premières analyses ont montré la présence de cet effet au niveau de la VPP seulement pour le contexte olfactif plaisant. Toutefois, les analyses complémentaires ont permis de révéler que cet effet était également présent pour les deux contextes olfactifs (i.e., plaisant et déplaisant) au niveau des localisations centrales, centro-pariétales et temporales du scalp dans la même fenêtre temporelle que la VPP. De plus, ces analyses complémentaires ont également révélé des topographies différenciées pour le contexte olfactif plaisant (T7, CP1, Cz et C4) et le contexte déplaisant (M1, T7, C4 et CP6) ; plus amplement confirmées au travers des analyses en ACP.

Différentes hypothèses peuvent être avancées pour rendre compte de ces effets du contexte olfactif sur le traitement des expressions. Dans un premier temps, du fait que l'olfaction et le traitement visuel des expressions faciales vont impliquer des structures et réseaux cérébraux communs (e.g., insula, amygdale, cortex orbitofrontal, gyrus cingulaire antérieur) (e.g., Royet et al., 2000 ; Wicker et al., 2003 ; pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.4.** paragraphe 3), il est possible que l'odeur ait pré-activé ces structures communes, ce qui a ensuite influencé leurs réponses aux expressions faciales ; probablement en venant renforcer le traitement des visages. Il est à soulever que c'est au cours de la même période qu'à lieu l'extraction du contenu affectif des stimuli visuels (Barret & Bar, 2009), et que les différences de topographies observées entre les deux odeurs semblent indiquer un recrutement de substrats cérébraux distincts selon la valence de l'odorant. Ainsi, les deux odeurs pourraient pré-activer des réseaux cérébraux différents selon leur valence, venant en retour renforcer/faciliter les traitements/réponses pour les visages expressifs.

Une interprétation alternative est que le contexte olfactif ait provoqué des micro-réactions faciales chez le participant ce qui en retour a modulé leur capacité de traitement des

visages expressifs. En effet, les odeurs sont des déclencheurs de réactions faciales (Aloui-Ismaïli, et al., 1997 ; de Groot et al., 2012) et des réactions faciales aux odorants que nous avons utilisés dans cette étude ont été précédemment rapportées (Soussignan et al., 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996). Ainsi, étant donné que des réactions faciales automatiques ont pu être observées chez les participants lorsqu'ils traitaient des expressions faciales (e.g., Dimberg, 1998 ; Soussignan et al., 2013) et que le blocage de ces réactions perturbait la reconnaissance des expressions (Niedenthal, 2007 ; Oberman et al., 2007 ; Ponari et al., 2012), il est donc possible que les odeurs aient agi par l'intermédiaire d'un déclenchement de réponses faciales similaires à l'imitation spontanée ou par un amorçage de cette réponse, ce qui en retour a facilité le traitement des expressions (voir Hess & Fisher, 2013 ; Lundqvist & Dimberg, 1995 ; Niedenthal, 2007). De la même manière, l'effet de l'odeur a pu passer par une incarnation de l'émotion, par la simulation de la réaction émotionnelle venant en retour faciliter la mise en correspondance entre l'état émotionnel de l'individu et l'état émotionnel perçu sur autrui (Niedenthal et al., 2010 ; Wicker et al, 2003)[8]. Ces deux formulations théoriques ne sont pas incompatibles l'une avec l'autre, puisque les structures cérébrales impliquées dans l'incarnation des expressions faciales se recouvrent en partie avec les structures émotionnelles : l'émotion est un mécanisme incarné par essence. Par exemple, l'insula, qui est une structure sensorimotrice viscérale, est activée à la fois lors du ressenti émotionnel du dégoût mais aussi lors du traitement visuel de visages exprimant le dégoût (Wicker et al., 2003). De même, le cortex oribitofrontal est activé lors du traitement de stimuli émotionnels, dont les odeurs (Royet et al. , 2000) et les visages expressifs (Fairhall & Ishai, 2006 ; McGlone et al., 2013 ; Phillips & Heining, 2002 ; Royet et al., 2000 ; Steinberg et al., 2011). Il est supposé que cette structure serait impliquée dans la réponse à la valeur affective de tout type de stimuli au travers des modulations somatiques ou des simulations codées au niveau du cortex somatosensoriel (Damasio, 1998). En outre, le cortex somatosensoriel joue un rôle important dans la reconnaissance des expressions faciales (voir **Chapitre 1 section 1.3.3.**). Enfin, malgré des différences dans les considérations théoriques qui leurs sont relatives, ces deux interprétations suggèrent que les odeurs mobiliseraient des régions émotionnelles et sensorimotrices ce qui modifierait le traitement subséquent des expressions faciales. De futures recherches devraient étudier ce point, en déterminant les régions

[8] Cette prédiction selon laquelle la simulation de l'expression au niveau faciale et/ou cérébrale participe au traitement des expressions faciales se retrouve notamment dans les théories de *l'embodied cognition* et les théories de la cognition située, mais est aussi abordée dans d'autres courants théorique tels que la *shared signal hypothesis* et les théories de *l'appraisal* (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.**).

cérébrales impliquées dans l'influence du contexte olfactif sur le traitement des expressions au sein de la fenêtre temporelle identifiée dans notre étude.

A la suite de cette première étape, nous avons également pu observer que les odeurs interagissaient avec les expressions cette fois-ci de façon différenciée entre 180 et 240 ms après le début de la présentation des visages (P200) au niveau des sites occipitaux (O2), et que cette interaction disparaissait après 240 ms (N250). Le résultat principal est ici que le contexte olfactif déplaisant amplifie les différences de réponses cérébrales aux expressions, avec une augmentation des différences entre la neutralité et les autres expressions (sauf la peur) et entre le dégoût et la joie vis-à-vis des autres expressions. En comparaison avec les deux autres contextes olfactifs, le contexte déplaisant a principalement induit une plus forte négativité pour les visages de dégoût et de joie, ainsi qu'une plus forte positivité de la neutralité. Dans leur ensemble, bien que les résultats ne soient significatifs que pour le contexte aversif, ces derniers supportent notre hypothèse selon laquelle le contexte olfactif interagit sur le traitement des expressions selon la relation de congruence/incongruence entre odeur et expression (i.e., action du contexte olfactif sur les expressions faciales observées en réaction à la valeur hédonique de l'odeur : joie et dégoût). En tous les cas, les résultats sont en désaccord avec l'interprétation selon laquelle l'odeur provoquerait un effet global sur le traitement des expressions peu importe l'émotion exprimée.

Les études antérieures sur les interactions olfacto-visuelles dans le traitement des expressions faciales ont rapporté des résultats non consistants. Certains auteurs, comme Leppänen et Hietanen (2003), ont observé que le temps de réponse pour la catégorisation de la joie dépendait de la valence du contexte olfactif dans lequel les participants étaient placés ; tandis que d'autres ont montré une accélération du traitement pour les visages de dégoût et un ralentissement pour les visages de joie, lorsque les participants étaient exposés à une odeur quelle que soit sa valence (Seubert et al., 2010). Concernant les études en potentiels évoqués, certaines ont mis en avant des effets précoces (i.e., P100 et N170) du contexte olfactif sur le traitement visuel des expressions faciales (Adolph et al., 2013 ; Forscher & Li, 2012), tandis que d'autres rapportent des effets plus tardifs (entre 250 et 600 ms ; Rubin et al., 2012). De plus un effet global de l'odeur ne se différenciant pas selon l'expression a tantôt été observé avant (Rubin et al., 2012), tantôt après (Forscher & Li, 2012) qu'il y ait eu interaction entre odeur et expression faciale. Ces inconsistances dans les résultats peuvent être liées à des différences dans la méthodologie employée, avec notamment des différences dans la tâche donnée aux participants. Par exemple, contrairement à nous, Forscher & Li (2012) ont utilisé

une « dot-probe task », venant ainsi explicitement solliciter les ressources attentionnelles des participants, et ils ont observé des effets d'interaction olfacto-visuelles plus précoces. Dans leur étude, Steinberg et collaborateurs (2012) ont observé des effets encore plus précoces lorsqu'un apprentissage associatif entre odeur et visage était précédemment effectué. Ainsi, des études plus approfondies sur ces effets de la tâche effectuée sur les interactions odeurs – expressions faciales devraient être faites, en vue de pouvoir répondre à ces questions et ainsi déterminer l'impact de la profondeur de traitement et/ou des mécanismes orientés vers le but. Une autre explication de ces différences de résultats entre notre étude et les études antérieures, est la nature des odorants utilisés. En effet, il est tout à fait concevable que les odeurs corporelles (i.e., transpiration en état d'anxiété) ne déclenchent pas les mêmes réponses cérébrales que des odeurs alimentaires comme celles que nous avons utilisées.

La fenêtre temporelle sur laquelle nous avons observé une modulation du traitement des expressions faciales par le contexte olfactif (i.e., la P200, entre 180 et 240 ms après apparition du stimulus) correspond à la première phase de l'EPN. Nos résultats sur l'effet simple de l'expression à ce niveau d'intégration, suggèrent qu'elle constitue la première étape de traitement de l'information affective véhiculée par l'expression. De plus, dans la même fenêtre temporelle nous avons pu observer que celle-ci constituait également la première étape à laquelle le contexte olfactif allait spécifiquement impacter le traitement de certaines expressions. L'EPN est classiquement interprétée comme reflétant le renforcement du traitement pour les stimuli émotionnels (e.g., Sato et al., 2001 ; Schupp et al., 2004 ; Smith et al., 2013). Ainsi, le fait que nous observions une augmentation de l'EPN pour les expressions de dégoût et de joie (et une réduction pour la neutralité) en contexte olfactif déplaisant, suggère que la valeur émotionnelle de l'odeur négative ait renforcé/amélioré le traitement de l'information affective des visages de joie et de dégoût ; tout en interférant sur le traitement affectif lors de l'intégration de visages neutres. En d'autres termes, il apparaît que le contexte olfactif déplaisant ait modulé le traitement des expressions faciales qui lui sont reliées du point de vue de leur signification ; qu'elles lui soient congruentes ou non. Cela pourrait en contrepartie faciliter leur traitement par augmentation de la différence perçue entre ces expressions et la neutralité, sans affecter le traitement des expressions dont la signification n'est pas liée au « déplaisant ».

Les études antérieures en potentiels évoqués n'ont pas retrouvé une influence des informations contextuelles sur le traitement des expressions sur la même fenêtre temporelle. Certaines d'entre elles ont observé des effets de la scène visuelle (i.e., plus forte amplitude en

réaction aux visages de peur insérés dans une scène visuelle de peur plutôt que dans une scène visuelle neutre ou de joie) sur le traitement des visages de peur à des niveaux d'intégration plus précoce : au niveau de la N170 (Righart & de Gelder, 2008). Dans une autre étude s'intéressant là aussi aux effets du contexte émotionnel sur le traitement des expressions, il a été observé que la congruence entre l'expression à traiter et une phrase présentée avant le visage modulait les réponses cérébrales au niveau de la LPP (Diéguez-Risco et al., 2013). Toutefois une étude de Hagan et collaborateur en MEG, a montré une influence de la congruence émotionnelle entre voix et visage dès 250 ms de traitement (Hagan et al., 2009). Ces différences entre les études peuvent être en premier lieu liées à la nature des informations contextuelles. En effet, lorsque l'information contextuelle est véhiculée par la scène visuelle entourant le visage, dans ce cas les deux informations sont visuelles, et par conséquent l'interaction entre contexte et expression étant uni-sensorielle, celle-ci pourrait être plus rapide. A l'inverse, lorsque le contexte engage un autre sens (e.g., audition ou odorat), l'interaction étant multi-sensorielle, celle-ci pourrait être plus lente. De plus, même lorsque les informations contextuelles sont visuelles par nature, le type de stimuli employés (i.e., objets physiques versus information verbale) peut influencer l'instant auquel s'opèrent les interactions (Diéguez-Risco et al., 2013 ; Righart & de Gelder, 2008). Des différences méthodologiques peuvent également rendre compte de ces différences dans les résultats. En effet, dans leur étude Diéguez-Risco et collaborateurs (2013) ont présenté le contexte avant l'apparition des visages expressifs, ce qui pourrait avoir déclenché certains mécanismes, comme des attentes. Du fait que dans notre étude le contexte olfactif était présenté en continu tout au long de chaque bloc, cela pourrait également avoir déclenché des réactions d'attentes là aussi. Une autre explication à invoquer, est que la LPP pourrait être modulée par la congruence affective seulement lors des tâches impliquant explicitement un traitement émotionnel du stimulus (comme dans Diéguez-Risco et al., 2013 ; Righart & de Gelder, 2008), puisque cette composante est sensible aux motivations liées à la tâche et/ou aux buts. Comme discuté précédemment, le recours à une tâche orthogonale dans notre étude peut donc avoir amoindri la sensibilité de la VPP aux différents effets. Ainsi, il serait intéressant pour de futures études de creuser ces questions et d'étudier l'influence de différents facteurs tels que la tâche, la modalité du contexte ou la temporalité de présentation du contexte sur le décours temporel des influences du contexte sur le traitement de visages émotionnels.

Au niveau cérébral, l'effet contextuel dans le traitement des expressions que nous avons observé pourrait s'effectuer par l'intermédiaire des feedbacks des structures « émotionnelles »

sur les régions multi-sensorielles et motrices d'intégration (Adolphs, 2002 ; Sato et al., 2001), qui pourraient elles-mêmes avoir été pré-activées au cours de la modulation globale/aspécifique précoce induite par l'odeur. En accord avec cette hypothèse, lors du traitement émotionnel des visages, l'insula et le cortex somatosensoriel interviennent dans le traitement dès 200 ms après l'apparition du visage (Chen et al., 2009 ; Pourtois et al., 2004). De même, le cortex orbitofrontal et le système visuel commencent à interagir l'un avec l'autre 215 ms après l'apparition du stimulus. Enfin, Hagan et collaborateurs (2009) ont observé que l'intégration multi-sensocrielle de l'émotion entre voix et visage à lieu au niveau du sillon temporal supérieur au cours de la même période. Ainsi, la valeur affective intégrée par les structures émotionnelles pourrait avoir été modulée par l'odeur, ce qui pourrait en retour moduler le traitement des expressions faciales. Etant donné que la technique du potentiel évoqué ne permet pas de conclusions précises concernant les régions cérébrales impliquées, il serait intéressant que de futures études en IRMf ou en MEG viennent creuser cette question.

Chapitre 6 :
Impact du contexte olfactif sur les réponses cérébrales aux visages chez les nourrissons de 3 mois (Expérience 4)

6.1. INTRODUCTION

Différentes études attestent de l'aptitude précoce du nourrisson à intégrer de façon multi-sensorielle les événements et objets de leur environnement, démontrant par la même occasion la présence d'interactions inter-sensorielles dans la perception des jeunes enfants (pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.1.**). Dans les théories de la « redondance inter-sensorielle » il est avancé que la perception et l'intégration multi-sensorielle seraient prépondérantes chez le nourrisson (Bahrick & Lickliter, 2002). Concernant le traitement des visages et des différents signaux qui lui sont liés, telles que les expressions faciales, il est supposé que celui-ci serait avantagé par une intégration multi-sensorielle (Flom & Bahrick, 2007). De nombreuses expériences ont pu fournir des éléments en faveur de cette vision théorique. En effet, il a par exemple pu être démontré que dès les 6 premiers mois de vie, les enfants sont capables de mettre en correspondance la syllabe entendue avec l'image d'un visage prononçant cette syllabe (Paterson & Werker, 2003 ; Pons et al. 2009) et que dès 5 mois les enfants se montraient sensibles à l'effet McGurk (Rosenblum et al., 1997) ; montrant ainsi que des interactions audio-visuelles sont déjà en œuvre dans la perception des signaux faciaux chez les jeunes enfants. Concernant le traitement des expressions faciales, il a pu être observé que là aussi les jeunes enfants étaient capables de mettre en correspondance l'information auditive (i.e., voix avec intonation émotionnelle) avec l'expression faciale (Vaillant-Molina et al., 2013 ; Walker, 1982 ; Walker Andrews, 1986, 1988, 1997). De plus, il a pu être démontré que la capacité des enfants à percevoir et discriminer les expressions de façon multimodale (i.e., en audiovisuel) était facilitée et apparaissait plus tôt au cours du développement que la capacité à faire de même de façon unimodale (i.e., vision uniquement) (pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.5.1**). Utilisant la technique du potentiel évoqué, différentes études ont tenté de déterminer le décours temporel des interactions entre traitement auditif et traitement du visage au niveau cérébral chez les enfants de 5 mois. Ces études ont permis de mettre en avant que les composantes précoces spécifiques au traitement auditif (P150 et P200), mais aussi la Nc, étaient modulées à la fois selon la congruence entre le son entendu et le visage parlant (Hyde, Jones, Flom & Porter, 2011), mais aussi par la simple addition de la stimulation auditive à la stimulation visuelle (Reynolds, Bahrick, Lickliter & Guy, 2014). De même, concernant le traitement audiovisuel des émotions, il a pu être observé que la présentation d'une expression faciale en amorce venait moduler les réponses cérébrales à la voix, notamment au niveau de la Nc, selon la congruence

émotionnelle entre expression faciale et émotion relayée par l'intonation (Grossman, Striano & Friederici, 2006).

Bien que chez le jeune enfant le traitement multi-sensoriel des visages et des expressions faciales ait été largement étudié au niveau des interactions audio-visuelles, à l'heure actuelle peu d'études se sont intéressées aux autres types d'interactions. Or, dans la vie quotidienne, les visages et les différents signaux qu'ils communiquent sont ancrés et perçus dans des contextes multi-sensoriels n'intégrant pas uniquement des informations auditives. Parmi les différentes modalités sensorielles, l'olfaction constitue un sens bien représenté dans l'univers perceptif du jeune nourrisson. En effet, les odeurs modulent de façon précoce les réponses comportementales de l'enfant (notamment ses réactions faciales et ses comportements d'orientation), et peuvent également faire l'objet d'apprentissages (pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.5.2** paragraphe 2). De plus, la capacité des jeunes enfants à intégrer les odeurs au sein de représentations multi-sensorielles a pu être démontrée au travers d'expériences démontrant la présence d'interactions olfacto-visuelles dès les premiers mois de vie (e.g., Fernandez & Bahick, 1994). A notre connaissance, seules deux études se sont intéressées aux impacts du contexte olfactif sur le traitement des visages. Dans leur étude, Durand et collaborateurs (2013) ont montré que chez l'enfant de 4 mois, l'exposition à l'odeur maternelle accentuait la préférence d'exploration pour le visage vis-à-vis d'une voiture. Godard et collaborateurs (sous presse) ont quant à eux montré que dès 3 mois les nourrissons modulaient leur exploration de visages expressifs selon la congruence émotionnelle de ces derniers avec le contexte olfactif auquel ils étaient exposés : les nourrissons regardaient plus le visage dont l'expression coïncidait avec la valence du contexte olfactif (i.e., joie et odeur plaisante). De plus, nous avons pu observer dans notre précédente étude en poursuite de mouvements oculaires sur les enfants de 7 mois, que les enfants modulaient leurs patterns d'exploration des visages selon l'émotion/expression suscitée par l'odeur. Au vu de ces éléments il ressort que des interactions entre olfaction et vision sont présentes précocement au cours du développement dans le traitement des visages et des expressions faciales. Toutefois la nature et le décours temporel de ces interaction restent à éclaircir.

Dans notre étude précédente en EEG chez l'adulte, nous avons pu observer que le contexte olfactif influençait les réponses cérébrales aux expressions faciales, selon un processus en deux étapes : une première étape (≈ 160 ms) aspécifique au cours de laquelle les réponses aux visages étaient augmentées quelle que soit l'émotion qu'ils exprimaient et la

valence de l'odeur ; suivie par une seconde étape (≈ 200 ms) où le contexte olfactif a spécifiquement agi sur les réponses aux expressions congruentes/non-congruentes avec l'odeur. Ainsi, afin de préciser la nature et le décours temporel des interactions olfacto-visuelles dans le traitement des visages chez le nourrisson, nous nous sommes donnés pour objectif de déterminer si, comme chez l'adulte, un effet général des odeurs sur le traitement de visages (i.e., première étape aspécifique) était observable dans les réponses cérébrales des jeunes enfants. Pour cela, nous sommes venus étudier chez les nourrissons de 3 mois les effets de l'exposition à différents contextes olfactifs (i.e., plaisant, déplaisant et contrôle) sur les réponses en EEG à des visages inexpressifs.

Avant d'aller plus loin, nous tenons toutefois à souligner auprès du lecteur qu'il s'agit ici d'une étude préliminaire. En effet, seuls 9 enfants ont pu être étudiés et retenus pour cette étude, et les différents contrebalancements d'ordre de présentation des odeurs ne sont pas équilibrés en termes de sujets.

6.2. MATERIEL ET METHODE

6.2.1. Participants

Au total, 15 nourrissons âgés de 3 mois ont été étudiés. Sur cet échantillon, 6 enfants ont été exclus soit parce qu'ils étaient trop inattentifs pour obtenir un nombre d'essais suffisant pour analyses (n=1), soit en raison de croûtes de lait interférant sur la récolte du signal (n=1), soit car leurs signaux étaient trop bruités et ne permettaient pas de conserver suffisamment d'essais pour les analyses après rejet des artefacts (i.e., moins de 10 essais conservés ; n=4). Ainsi, l'échantillon final considéré pour cette étude comprenait 9 nourrissons (3 filles et 6 garçons), tous âgés en moyenne de 95,7 ± 4.2 jours. Tous étaient nés à terme, après une grossesse sans complication, avec un poids normal (> 3000 g) et des scores d'Apgar, à 1 et 5 minutes, supérieurs ou égaux à 8. Les parents n'ont déclaré aucun antécédent de troubles neurologiques ou de pathologies développementales chez leur enfant. Le recrutement des parents et de leur enfant était effectué à l'issue d'un rendez-vous pour une autre étude. Au cours du recrutement une description détaillée de l'expérience et de son matériel était fournie au(x) parent(s). Tous les parents ont fourni leur accord écrit et tous les

tests ont été effectués en accord avec la Déclaration de Helsinki pour l'expérimentation sur participants humains (*Bristich Medical Journal*, 1991 ; 302 : 1194).

6.2.2. Stimuli

A. Stimuli visuels

Le matériel utilisé était similaire à celui de la précédente étude en EEG sur l'enfant, à l'exception qu'ici, seules les versions inexpressives des visages étaient utilisées. Ainsi, pour cette étude nous avons réutilisé les 6 photographies des visages neutres des 6 modèles différents (modèles de la base NimStim F01, F02, F05, F07, F09 and F10) détourés et assignés sur fond gris de luminance moyenne (pour plus de détails voir **Chapitre 4 section 4.2.2**).

Des vidéos du (des) parent(s) ont également été employées au cours de cette étude. Six vidéos d'une durée de 6 à 10 secondes étaient enregistrées pendant la prise de rendez-vous. Au cours de ces vidéos les parents étaient invités à s'engager dans différents types d'interactions (e.g., présentation d'un jouet, chanson, paroles rassurantes, compliments) en s'adressant à l'objectif de la caméra comme ils le feraient avec leur enfant. Toutes les vidéos étaient enregistrées dans des conditions identiques (i.e., enregistrement des épaules au haut de la tête, tous les parents dans la même posture, faisant dos au même fond blanc et dans les mêmes conditions de luminosité) à celles de notre précédente étude.

B. Stimuli olfactifs

Deux odeurs hédoniquement contrastées ont été utilisées : la fraise (« Meilleur du chef », Maignon, France) comme odeur plaisante et l'acide butyrique (Sigma, Saint-Quentin-Fallaviers, France) comme odeur déplaisante. Ces odorants ont été sélectionnés non seulement du fait qu'ils représentent les deux versants hédoniques, mais aussi car ils ont été utilisés à de multiples reprises pour déclencher des réactions faciales et affectives contrastées (i.e., positives *versus* négatives) (Schaal, 1997 ; Soussignan et al., 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996 ; Wagner et al., 2013). L'arôme de fraise était utilisé sous forme non-diluée, tandis que l'acide butyrique était utilisé dilué dans de l'huile minérale à une concentration de 5.10^{-4} v/v. Chacun des deux odorants était déposé sur un morceau de matériel absorbant

inodore (P100, Powersorb, 3M) dans les quantités suivantes : 10 gouttes de l'arôme de fraise (i.e., 200 µl) et 5 gouttes d'acide butyrique dilué (i.e., 100 µl). Ces quantités ont été définies sur la base de leur iso-intensité au cours d'un prétest sur un panel de 4 adultes.

Pour cette expérience, la présentation des odeurs a été faite au moyen de bavoirs odorisés. Trois bavoirs distincts ont été utilisés : un bavoir pour la présentation de la fraise, un bavoir pour l'acide butyrique et un bavoir non-odorisé comme contrôle. Sur ces bavoirs était cousue, de façon centrée et à une distance de 3,5 cm du bord supérieur, une fenêtre en plastique possédant une ouverture (i.e., 3 × 3,3 cm) sur la face externe du bavoir. Au moyen de ce système, les odeurs pouvaient être présentées à l'enfant par l'insertion d'un morceau de matériel absorbant dans ces fenêtres. Les odorants étaient déposés sur le morceau de matériel absorbant après placement de ces derniers dans la fenêtre du bavoir. Pour le bavoir contrôle, le matériel absorbant était laissé intact (i.e., aucune odeur n'était déposée sur le morceau de matériel absorbant). Afin d'éviter toute contamination olfactive, chaque bavoir était spécifiquement assigné à une odeur.

6.2.3. Procédure

La procédure et le dispositif expérimental utilisés pour cette étude étaient identiques à ceux employés au cours de la première expérience en EEG sur le nourrisson (pour plus de détails voir **Chapitre 4 section 4.2.3**).

Les seules différences étaient qu'ici la session expérimentale était subdivisée en 6 blocs de 36 essais consistant en la présentation d'un visage inexpressif. Au sein de chaque bloc chacun des 6 visages inexpressifs était aléatoirement présenté 6 fois. Chaque bloc était assigné à un contexte olfactif spécifique (i.e., 2 blocs par condition olfactive). L'ordre de présentation des conditions olfactives était contrebalancé entre les enfants sur les 3 premiers blocs, et la même séquence de présentation était ensuite répétée. Ainsi, pour chaque condition olfactive, la procédure comprenait au total 72 essais, correspondant à la présentation d'un visage neutre, pour chaque condition olfactive. Avant le lancement de chaque bloc un nouveau morceau de matériel absorbant était inséré dans la fenêtre du bavoir correspondant à la condition olfactive souhaitée, et le dépôt d'odorant était alors effectué pour les bavoirs odorisés.

6.2.4. Enregistrement et analyses EEG

La méthodologie employée pour l'enregistrement et le filtrage des données EEG était en tout point identique à celle appliquée au cours de notre première étude en EEG sur les nourrissons de 3 mois (pour détails voir **Chapitre 4 section 4.2.4**). La seule exception étant qu'ici, nous avons effectué le moyennage des signaux sur 900 ms, comprenant 200 ms avant l'apparition du stimulus à l'écran et 700 ms après le début de présentation du stimulus. Cette réduction de la fenêtre temporelle (i.e., de 1200 à 900 ms) se justifie par le fait que c'est dans cette fenêtre temporelle que sont comprises les composantes nous intéressant, et que la restriction de la fenêtre permettait de limiter le rejet d'essais lié à la présence d'artefacts sur des composantes n'étant pas d'intérêt pour notre étude. Après exclusion des essais invalides (non-regardés par l'enfant ou présentant des artefacts), chaque condition olfactive contenait au moins 10 essais valides pour nos 9 enfants retenus (en moyenne 24 essais valides en conditions olfactive plaisante, 31 en condition déplaisante et 22 en condition contrôle ; l'étendue allant de 10 à 66 essais).

Les analyses inférentielles ont été faites sur 4 composantes différentes, classiquement étudiées dans la littérature sur le traitement des expressions faciales chez les nourrissons : la P100, la N290, la P400 et la Nc (pour plus de détails sur ces composantes **voir Chapitre 1 section 1.2.1.**). Tout comme dans notre précédente étude en EEG sur les nourrissons, 3 types de mesures ont été extraites pour chaque composante : l'amplitude moyenne, l'amplitude de pic et la latence de pic. Les différentes électrodes et fenêtres temporelles utilisées pour l'extraction des 3 types de mesures sur chacune des 4 composantes étaient elles aussi les mêmes que dans notre première étude en EEG : la P100, la N290 et la P400 étaient analysées au niveau des électrodes occipito-pariétales (O1/2 et P3/4) sur les fenêtres temporelles allant respectivement de 120 à 220 ms, de 220 à 400 ms, et de 400 à 650 ms, après apparition du stimulus ; tandis que la Nc était analysée sur les électrodes fronto-centrales (F3/4, C3/4 et FC1/2) sur la fenêtre allant de 350 à 700 ms après apparition du stimulus. Au cours de notre expérience en potentiels évoqués chez l'adulte, nous avons pu observer que le contexte olfactif induisait des modulations des réponses cérébrales aux visages - quelle que soit leur expression - au niveau de la VPP. Ainsi, afin d'étudier si un résultat similaire était présent chez le nourrisson de 3 mois nous avons tâché de relever cette composante. La VPP adulte

correspondant à la contrepartie positive de la N170 relevée sur les sites centraux (C3, Cz, C4) et dans la même fenêtre temporelle que celle-ci (George et al., 1997), nous avons donc relevé la « VPP bébé » en mesurant la contrepartie positive de la N290 sur les sites centraux (C3, Cz, C4) dans la fenêtre temporelle de la N290 (220 – 400 ms).

L'amplitude moyenne, le pic d'amplitude et la latence de pic de la P100, de la N290 et de la P400 ont tous trois été analysés au moyen d'ANOVAs comprenant le Site sur le scalp (O1/2 et P3/4), l'Hémisphère (gauche et droit) et le Contexte Olfactif (plaisant, déplaisant et contrôle) comme variables intra-sujets. Pour les analyses sur la Nc, une ANOVA comprenant le Site sur le scalp (F3/4, FC1/2 et C3/4), l'Hémisphère (gauche et droit) et le Contexte Olfactif (plaisant, déplaisant et contrôle) comme variables intra-sujets ont été utilisées. Les analyses sur la *VPP bébé* ont été effectuées avec une ANOVA comprenant uniquement le Site sur le scalp (C3, Cz et C4) et le Contexte Olfactif (plaisant, déplaisant et contrôle) comme variables intra-sujets. La variable Hémisphère n'était pas incluse pour les analyses sur cette composante, puisque l'électrode Cz (électrode centrale) était utilisée pour l'extraction. Des corrections de Greenhouse-Geisser ont été appliquées sur les effets simples et interactions révélés significatifs. Toutes les analyses post-hoc ont été faites avec des tests de Fischer LSD. Etant donné que notre intérêt dans cette étude se porte sur l'influence du contexte olfactif sur le traitement cérébral du visage, seuls les effets simples et interactions impliquant le contexte olfactif seront décrits.

6.3. RESULTATS

Les modulations des réponses cérébrales selon le contexte olfactif sur la P100, la N290 et la P400 (composantes mesurées sur les électrodes O1/2 et P3/4) sont représentées en **figure 29**. Les modulations de la Nc (mesurées sur les électrodes FC1/2, C3/4 et F3/4) selon le contexte olfactif sont quant à elles représentées en **figure 30**. Enfin, les variations des réponses cérébrales selon le contexte olfactif sur la VPP bébé (mesurées sur les électrodes C3, Cz et C4), sont représentées en **figure 31**.

Les analyses effectuées sur la ***P100***, n'ont révélé aucun effet significatif du Contexte Olfactif ni sur l'amplitude moyenne [$F(2,16)= 0.122$, $p= .886$], ni sur l'amplitude de pic [$F(2,16)= 0.177$, $p= .839$] et la latence de pic [$F(2,16)= 0.714$, $p= .505$]. Les analyses n'ont

également pas révélé d'interaction significative entre le contexte olfactif et les autres facteurs, et ce pour les trois types de mesures ici considérés (tous les *Fs* allant de 0.183 à 1.361).

Pour la ***N290***, aucun effet du Contexte Olfactif n'était observé à la fois sur l'amplitude moyenne [$F(2,16)= 0.733$, $p= .496$] et l'amplitude de pic [$F(2,16)= 0.626$, $p= .548$]. De même, les interactions entre le Contexte Olfactif et les autres variables n'atteignaient pas la significativité, et ce aussi bien pour l'amplitude moyenne (*Fs* allant de 0.11 à 1.14) que pour l'amplitude de pic (tous les $Fs<1$). Concernant les analyses sur la latence de pic, bien que l'effet simple du Contexte Olfactif n'atteignait pas la significativité [$F(2,16)= 2.426$, $p= .120$], il a pu être observé que l'interaction entre Contexte Olfactif et Hémisphère était significative [$F(2,16)= 4.882$, $\varepsilon= 0.964$, $p= .024$, $\eta p^2= .379$]. Les analyses ont démontré que l'effet du Contexte Olfactif était significatif seulement sur l'hémisphère gauche [$F(2,7)= 8.634$, $\varepsilon=.98$, $p= .01$, $\eta p^2=0.515$; sur l'hémisphère droit : $F(2,7)= 0.387$]. Les interactions entre le Contexte Olfactif et les autres variables étaient quant à elles non significatives ([$F(2,16)= 1.972$, $p= .172$] pour l'interaction entre Site et Contexte Olfactif ; [$F(2,16)= 0.591$, $p= .566$] pour la double interaction entre Site, Hémisphère et Contexte Olfactif). Les tests post-hoc en LSD de Fischer ont révélé que sur l'hémisphère gauche la latence de pic de la N290 était plus faible lorsque les enfants étaient exposés au contexte olfactif plaisant (274 ms) en comparaison avec les contextes olfactifs déplaisant (311 ms ; $p= .0174$) et contrôle (326 ms ; $p= .002$), et ce, sans différence significative entre ces deux contextes ($p= .308$). A l'inverse, sur l'hémisphère droit les tests post-hoc n'ont révélé aucune différence significative entre les différents contextes olfactifs (tous les $ps>.05$).

Similairement à la P100, les analyses sur la ***P400*** n'ont pas révélé d'effet significatif du Contexte Olfactif que ce soit sur l'amplitude moyenne [$F(2,16)= 0.462$, $p= .638$], l'amplitude de pic [$F(2,16)= 0.402$, $p= .676$] ou la latence de pic [$F(2,16)= 0.373$, $p= .695$]. De même les analyses sur les interactions entre Contexte Olfactif et les variables Site et Hémisphère n'ont pas révélé d'effet significatif, et ce, aussi bien pour l'amplitude moyenne (tous les *Fs* allant de 0.462 à 2.636, et tous les *ps* compris entre .121 et .619 après correction) que pour la latence de pic (tous les $Fs<1$). Concernant les analyses sur l'amplitude de pic, exceptée la présence d'une tendance à l'interaction entre le Contexte Olfactif et le Site ($p = .09$) qui s'est avérée être trop éloignée de la significativité après application d'une correction de Greenhouse-Geisser [$F(2,16)= 0.373$, $p= .111$], aucune interaction significative n'a été observée (tous les *Fs* compris entre .402 et 2.182, et tous les *ps* compris entre .158 et .643 après correction).

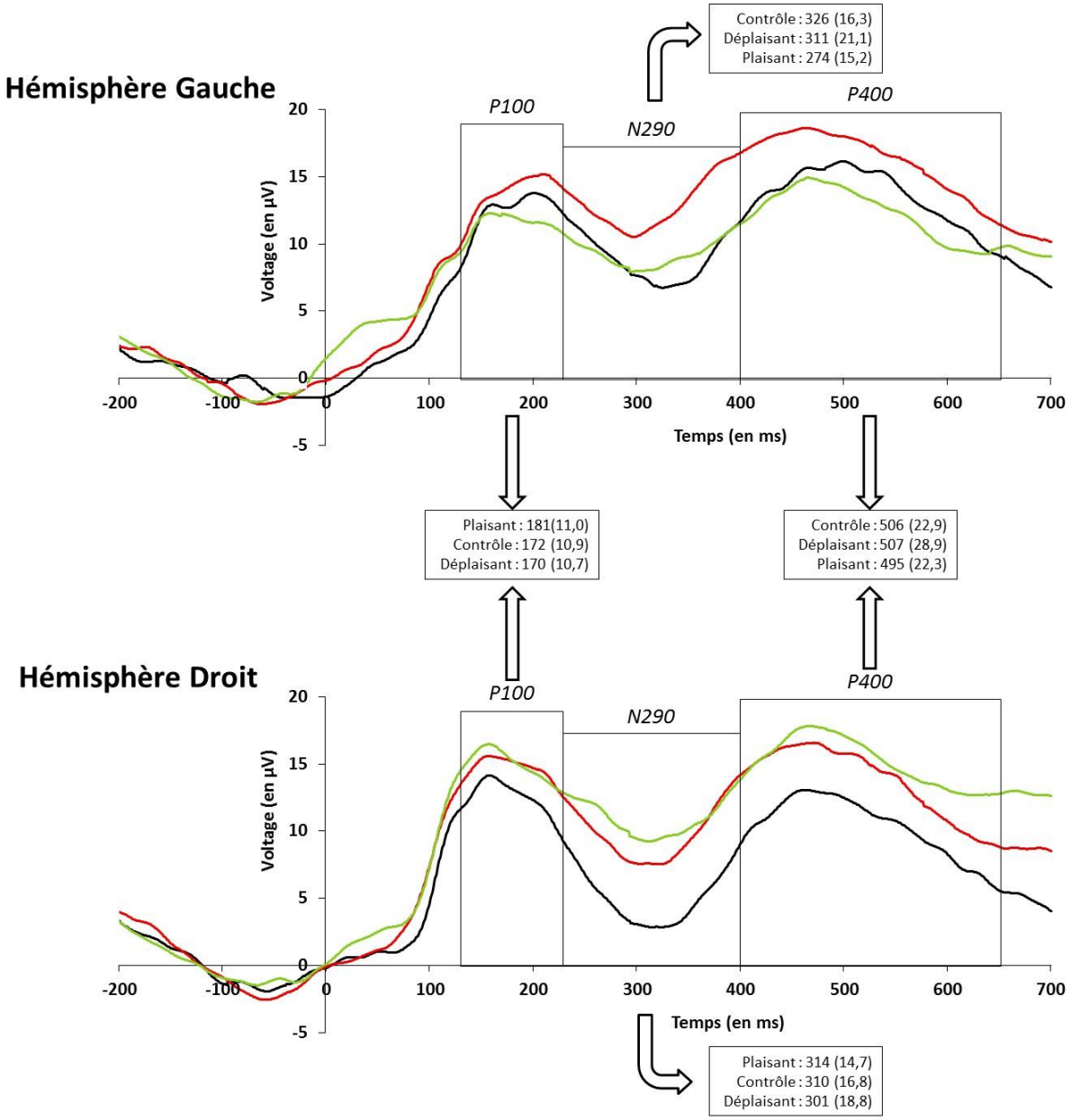


Figure 29 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche (O1 et P3) et de l'hémisphère droit (O2 et P4) pour les différentes conditions olfactives (plaisante, déplaisante et contrôle). Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse des différentes composantes (P100, N290 et P400). Les latences moyennes de pic et l'erreur standard pour chaque condition olfactive sont indiquées dans les encadrés.

Concernant la ***Nc***, les analyses sur l'amplitude moyenne n'ont dans un premier temps pas révélé d'effet significatif du Contexte Olfactif aussi bien seul [$F(2,16)=2.645$, $p= .102$] qu'en interaction (tous les $Fs\leq1$). Les analyses sur l'amplitude de pic n'ont pas non plus révélé d'effet significatif du Contexte Olfactif sur la *Nc* [$F(2,16)= 2.182$, $p= .145$, $\eta p^2= .341$]. Aucune interaction entre le Contexte Olfactif et les autres variables ne s'est révélée être significative (tous les $Fs\leq1$). Enfin, au cours des analyses sur la latence de pic nous n'avons pas observé d'effet significatif du Contexte Olfactif seul [$F(2,16)= 1.747$, $p= .206$]. Toutefois, ces analyses ont révélé une interaction significative entre le Contexte Olfactif et l'Hémisphère

[F(2,16)= 3.302, ε= 0.988, *p*= .064, ηp^2= .292] avec un effet significatif du Contexte Olfactif sur l'hémisphère droit [F(2,7)= 11.256, ε= .678, p<.01, ηp^2= .41] mais pas sur l'hémisphère gauche [F(2,7)= 0.077]. Les comparaisons post-hoc en LSD de Fischer ont montré que sur l'hémisphère droit la latence de pic était plus courte lorsque les enfants étaient exposés aux odeurs plaisante (479 ms) et déplaisante (497 ms) par rapport au contexte contrôle (543 ms ; *p*= .002 et *p*= .020, respectivement), sans différence significative entre les deux odeurs (*p*= .312). A l'inverse, aucune différence significative entre les 3 conditions olfactives n'était observée sur l'hémisphère gauche (contrôle : 533 ms ; plaisant : 504 ms ; déplaisant : 518 ms ; les 3 *ps*>.05).

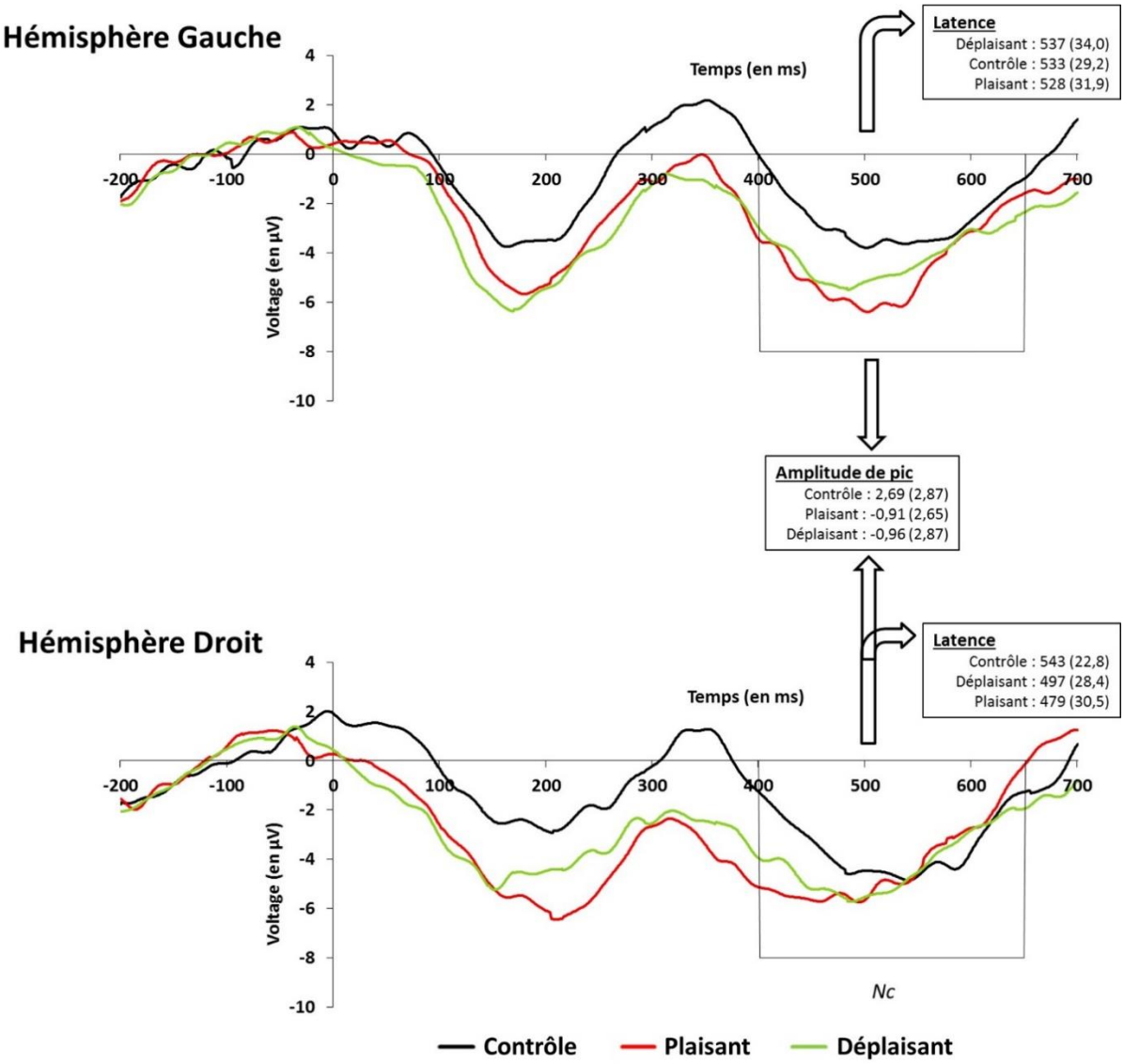


Figure 30 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes occipito-pariétales au niveau de l'hémisphère gauche (FC1, F3 et C3) et de l'hémisphère droit (FC2, F4 et C4) pour les différentes conditions olfactives (plaisante, déplaisante et contrôle). Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse de la Nc. Les latences moyennes de pic et l'amplitude moyenne, ainsi que l'erreur standard pour chaque condition olfactive sont indiquées dans les encadrés.

Les analyses sur la ***VPP bébé*** n'ont enfin indiqué aucun effet significatif du Contexte Olfactif, et ce, que ce soit sur l'amplitude moyenne [$F(2,16)= 1.923$, $p= .178$], l'amplitude de pic [$F(2,16)= 1.831$, $p= .192$] ou la latence de pic [$F(2,16)= 0.845$, $p= .448$]. De même, les analyses n'ont pas révélé la présence d'une interaction significative entre le Contexte Olfactif et le Site (tous les *Fs* allant de 0.380 à 1.408 et les *ps*>.05)

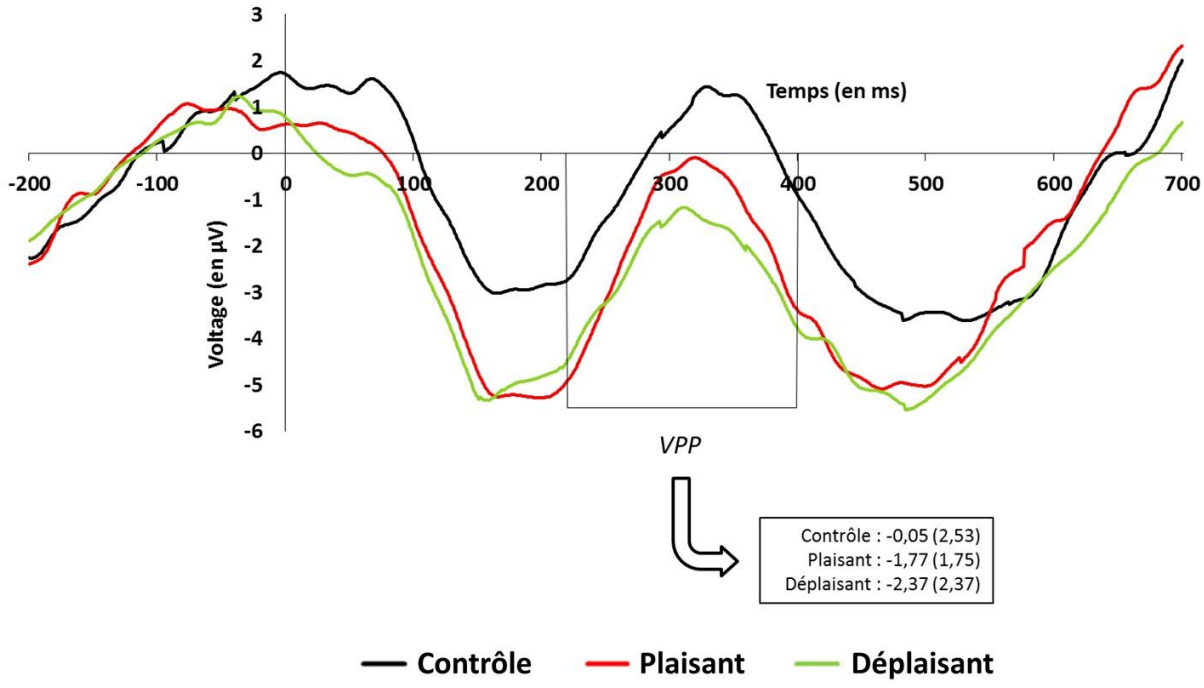


Figure 31 : Grand moyennage des ondes récoltées chez les nourrissons de 3 mois sur les électrodes centrales (C3, Cz et C4) pour les différentes conditions olfactives (plaisante, déplaisante et contrôle). Les crochets noirs indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour l'analyse de la *VPP bébé*. Les amplitudes moyennes et l'erreur standard pour chaque condition olfactive sont indiquées dans les encadrés.

En résumé l'analyse des données EEG a permis d'observer un effet du contexte olfactif sur deux composantes : la N290, composante spécifique du traitement et de l'encodage des visages, et la Nc, composante considérée comme reflétant l'allocation de l'attention sur le stimulus. En cas d'exposition à une odeur la latence de pic de ces deux composantes était plus précoce que lorsqu'aucune odeur n'était présentée. Aucun effet significatif du contexte olfactif n'a pu être observé sur les autres composantes considérées (i.e., la P100, la P400 et la *VPP bébé*).

6.4. DISCUSSION

Dans cette étude, nous avons utilisé la technique du potentiel évoqué avec pour objectif d'examiner si des contextes olfactifs hédoniquement contrastés induisaient des modulations du traitement de visage chez les nourrissons de 3 mois. Au cours de l'expérience, des visages inexpressifs étaient présentés aux nourrissons, tandis qu'ils étaient exposés à trois contextes olfactifs de valence distincte (plaisant, déplaisant et contrôle) et que leur signaux cérébraux étaient récoltés. Les résultats de cette étude restent préliminaires, puisque seules les données collectées sur 9 enfants ont pu être retenues pour analyses. Il est donc nécessaire de les considérer avec la précaution qui leur est due. Notamment, nous avons pu observer que le contexte olfactif modulait significativement les réactions cérébrales aux visages au niveau de deux composantes : la N290 et la Nc. Cependant, l'allure des graphiques nous invite à supposer que l'inclusion de participants supplémentaires à l'étude pourrait faire ressortir certains effets. Plus spécifiquement, bien que visuellement des effets semblent être présents au niveau de la P400 et de la VPP, ces derniers se sont avérés non significatifs après analyse. Ainsi, l'addition de nouveaux participants serait nécessaire à la fois pour confirmer les résultats obtenus et pour déterminer si les effets se profilant sur les graphiques se vérifient.

Dans cette discussion, nous ne nous focaliserons toutefois que sur les résultats ressortis significatifs au cours de cette étude. Nous aborderons dans un premier temps ces résultats en les mettant en écho avec la littérature existante sur le traitement multi-sensoriel des visages et des expressions faciales chez le nourrisson, ainsi qu'avec les données de notre expérience sur les influences du contexte olfactif sur le traitement des expressions chez l'adulte. Enfin, nous tâcherons de déterminer les facteurs permettant de les interpréter.

6.4.1. Les effets du contexte olfactif sur le traitement de visages inexpressifs

Dans un premier temps, les résultats des analyses n'ont pas indiqué d'effet du contexte olfactif sur les étapes précoces d'intégration. En effet, aucune modulation de la P100 selon l'odeur utilisée ne fut observée. Il apparaît donc que le contexte olfactif n'a pas d'impact sur l'orientation et la capture attentionnelle par les visages, ainsi que sur l'extraction et le traitement des informations de bas niveau sur ces derniers (de Haan et al., 2003 ; Smith et al.,

2013). Dans la littérature antérieure sur le traitement audio-visuel des visages, il est rapporté que les composantes précoces du traitement auditif (P150 et P200), mesurées dans la même fenêtre temporelle (120-250 ms) que la P100 étaient modulées à la fois par la synchronie entre voix et mouvements faciaux (Hyde et al., 2011), mais aussi par la simple addition du son à la vidéo d'un visage parlant (peu importe si synchrone ou non) (Reynolds et al., 2014). Dans leur étude, Otte et collaborateurs (2015) ont quant à eux observé une modulation de cette composante en réaction aux voix émotionnellement chargées selon la congruence émotionnelle de celles-ci avec l'expression d'un visage présenté en amorce. Ces différences entre nos résultats et ceux des études antérieures peuvent notamment être expliquées par le fait qu'ici nous nous sommes intéressés au traitement multi-sensoriel du visage en engageant une autre modalité (i.e., olfaction *versus* audition) dont la dynamique d'interaction avec le traitement visuel peut différer. Un autre facteur est que contrairement à ces études nous avons étudié la dynamique d'interaction inter-sensorielle et ses conséquences sur la modalité visuelle et non pas sur la modalité auditive. Ainsi les sites de mesures (sites occipitaux pour la P100 visuelle ; sites temporaux et/ou fronto-centraux pour la P150/P200 auditive), et par conséquent les régions cérébrales et les traitements engagés dont l'activité est récoltée, sont différents bien que s'effectuant dans la même fenêtre temporelle (i.e., P100 visuelle : reflète les traitements visuels d'informations de bas niveau et l'orientation/capture de l'attention ; la P150/P200 auditive : reflète l'attention préférentielle vers l'input auditif et est sensible à la langue maternelle et/ou est associée à la mémoire auditive). Contrairement à la littérature antérieure sur le traitement audio-visuel des visages et des expressions chez le jeune enfant, nos résultats sont en accord avec les résultats issus de notre précédente étude en EEG sur l'impact du contexte olfactif sur le traitement visuel des expressions faciales (voir **Chapitre 5**). En effet dans cette étude nous n'avions pas observé d'effet du contexte olfactif au niveau de la P100, mais sur des étapes un peu plus tardives du traitement de l'information.

Concernant les composantes reflétant plus spécifiquement le traitement des visages et l'encodage de leur structure (Bayet et al., 2014 ; de Haan et al., 2003 ; Hoehl & Wahl, 2012 ; de Schonen, 2009), nous avons pu observer que le contexte olfactif modulait les réponses cérébrales au niveau de la N290, mais pas au niveau de la P400. Plus spécifiquement, nous avons constaté que la N290 était plus précoce en réaction aux visages lorsque les enfants étaient exposés à une odeur plaisante, plutôt que lorsqu'ils étaient exposés à une odeur déplaisante ou en l'absence d'odeur. Il apparaît donc que le contexte olfactif ait ici accéléré les processus en lien avec le traitement des visages. Le fait que le contexte olfactif n'ait agi

que sur la N290 et pas sur la P400 peut paraître de prime abord surprenant, étant donné que les deux composantes sont conceptualisées comme des précurseurs d'une composante unique spécifique au traitement du visage à l'âge adulte (i.e., la N170) (de Haan, et al., 2002, 2003). Toutefois, il est spéculé qu'au lieu de refléter les mêmes processus, toutes deux reflètent des processus de traitement différents qui plus tard sont mesurés sur une composante unique (de Haan et al., 2003 ; Leppänen et al., 2007). Par exemple, chez l'adulte, la N170 est sensible à la fois à l'espèce du visage (i.e., humain *vs* singe) et à l'inversion des visages (i.e., présentation tête en bas), tandis que chez l'enfant de 6 mois c'est la N290 qui est sensible à l'espèce et la P400 qui est sensible à l'orientation du visage (de Haan, et al., 2002). Ainsi, il semble que le contexte olfactif agisse sur certains processus de traitement et d'encodage du visage spécifiquement mesurés au niveau de la N290. Ces résultats sont notamment cohérents avec ceux de Reynolds et collaborateurs (2014) sur le traitement audiovisuel du langage chez les enfants de 5 mois. Dans cette étude les auteurs observent un effet additif de la stimulation audio-visuelle par rapport à la stimulation visuelle seule au niveau de la N290 : celle-ci est plus ample en réaction à la présentation audiovisuelle d'un visage parlant (peu importe si la bande son est synchrone ou inversée) par rapport à la présentation seulement visuelle d'un visage parlant. Ainsi, dans cette étude, tout comme dans la nôtre, il apparaît que la N290, et par conséquent les traitements spécifiques à l'encodage du visage et de sa structure, sont modulés par l'addition d'une stimulation dans une autre sensorialité, sans nécessité qu'il y ait synchronie/redondance entre les deux sens.

Dans notre précédente expérience en EEG chez l'adulte, nous avons constaté la présence d'un effet global et aspécifique dans l'influence du contexte olfactif sur le traitement des visages expressifs. En effet, au cours de cette étude une VPP d'amplitude plus élevée était observée en réaction aux visages, quelle que soit leur expression, lorsque les participants étaient exposés à une odeur (peu importe sa valence) plutôt que lorsqu'ils ne l'étaient pas. Bien que nous n'ayons pas directement répliqué ces résultats, puisque les analyses sur la VPP n'ont pas démontré d'effet du contexte olfactif sur le traitement de visage au niveau de cette composante ; nous avons tout de même pu observer des effets de l'odeur sur son homologue négative : la N290. Ces résultats sont également non sans rappeler ceux d'autres études en EEG adulte sur le traitement de visages expressifs et démontrant des effets aspécifiques du contexte olfactif sur la N170 (e.g., Adolph, Meister & Pause, 2013 ; Forscher & Li, 2012). Il apparaît donc que similairement à l'adulte, les réactions cérébrales des nourrissons de 3 mois

sont elles aussi modulées par la présence d'une odeur dans le contexte au niveau de composantes connues comme étant spécifiques au traitement des visages.

La Nc est une composante considérée comme reflétant l'engagement de l'attention vers le stimulus chez l'enfant (Reynolds & Richards, 2005). Il a pu être observé que cette dernière était sensible à différents types d'informations en lien avec le traitement du visage, telles que la familiarité, la nouveauté et/ou le caractère inattendue de leur apparition (de Haan et al., 2003), mais aussi l'expression faciale (e.g., Grossman, Striano & Friederici, 2007 ; Kobiella et al., 2008 ; Leppänen et al., 2007 ; Rigato et al., 2010). Chez l'enfant de 5 mois, il a été rapporté que cette composante était plus ample en cas de congruence entre le son entendu et l'image du visage, à la fois au niveau du traitement langagier (Hyde et al., 2011) et expressif (Grossman et al., 2006). Il est également constaté que la simple addition d'un son à l'image d'un visage parlant, peu importe si la bande son correspond ou non à la vidéo présentée, suffit à moduler les amplitudes relevées au niveau de la Nc (Reynolds et al., 2014). Dans les études chez l'adulte sur les impacts de l'odeur de « transpiration anxieuse » sur le traitement des expressions faciales, il a pu être constaté que l'odeur modulait les réponses cérébrales aux visages expressifs au niveau d'une composante reflétant elle aussi l'engagement attentionnel vers les stimuli saillants : la LPP (Eimer & Holmes, 2002 ; Schupp et al., 2004 ; Smith et al., 2013). Selon ces études, la LPP était modulée en accord avec la congruence entre expression et odeur (Adolph et al., 2013 ; Diéguez-Risco et al., 2013). Est également rapportée une augmentation aspécifique de la LPP en cas d'exposition à l'odeur anxieuse pour les visages ambigus (quelle que soit leur expression) et neutres (Rubin et al., 2012). Similairement aux études sur les interactions audiovisuelles chez l'enfant, et aux études sur les interactions olfacto-visuelles chez l'adulte, nous avons pu observer que l'addition d'une stimulation, ici l'addition d'une odeur au sein du contexte, venait moduler la Nc (i.e., celle-ci était plus précoce en condition olfactive plaisante et déplaisante en comparaison avec la condition contrôle). En lien avec les considérations théoriques sur cette composante et ce qu'elle reflète, il apparaît que dans notre cas la présentation d'une odeur ait modulé l'engagement des ressources attentionnelles vers le visage en accélérant les processus en lien.

En résumé il apparaît donc que l'exposition à une odeur positive ou négative, module les réactions cérébrales aux visages inexpressifs chez les nourrissons de 3 mois, à la fois au

niveau d'une composante considérée comme reflétant spécifiquement le traitement et l'encodage du visage (la N290), mais aussi au niveau d'une composante reflétant l'allocation attentionnelle vers le stimulus (la Nc). Ces modulations se sont manifestées au travers d'une plus forte précocité de ces composantes en cas d'exposition à une odeur. Ces résultats sont non sans rappeler l'hypothèse de la redondance inter-sensorielle de Barhick (1994 ; Barhick & Lickliter, 2002) postulant que les événements/objets multi-sensoriels seraient plus saillants et mieux intégrés dès la prime enfance. De façon plus générale, nos résultats sont en accord avec les études comportementales de Godard et collaborateur (sous presse), et de Durand et collaborateurs (2013). En effet, comme dans leurs études nous observons, ici au niveau cérébral, que le traitement des visages chez le nourrisson de 3 mois est perméable aux influences du contexte olfactif. Les résultats de la présente étude apportent donc de nouveaux arguments en faveur de la présence d'interactions entre olfaction et vision modulant le traitement du visage dès les étapes précoces du développement socio-émotionnel. De plus, la présence de ces modulations du traitement visuel du visage par le contexte olfactif incrémente également la littérature faisant état d'une aptitude précoce du nourrisson à intégrer et encoder les stimuli et événements de façon multi-sensorielle (pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.1.**).

6.4.2. Quelles sont les causes de ces interactions entre olfaction et traitement de visages ?

Différentes interprétations peuvent être avancées pour rendre compte de ces effets de l'exposition à un odorant sur les réactions cérébrales des nourrissons aux visages. Néanmoins, plusieurs d'entre elles ne semblent pas éligibles pour expliquer ce phénomène. L'une des premières interprétations pouvant être rejetée est que les modulations observées seraient liées à la simple addition de l'activité des structures et réseaux cérébraux en charge du traitement olfactif. En effet, cette proposition ne peut expliquer les effets observés, puisque notre présentation de l'odeur était ici faite en continu au sein de chaque bloc. Ainsi, tout effet lié à l'activation des structures cérébrales répondant uniquement à l'odeur a été « retiré » lors de la correction de la ligne de base (i.e., alignement des différentes conditions en prenant ici pour référence les 200 ms précédant l'apparition du visage à l'écran). De plus, si tel n'était pas le cas, l'exposition à un odorant n'aurait pas induit de modulation sur des fenêtres temporelles spécifiques, mais une modulation de l'activité sur l'ensemble des fenêtres considérées étant

donné que les odeurs étaient ici présentées en continu. Les mêmes arguments permettent également d'exclure l'hypothèse selon laquelle les effets observés correspondraient simplement à l'induction d'un état émotionnel par l'odeur, et donc à l'activation du « cerveau émotionnel ».

Dans leur hypothèse sur la redondance inter-sensorielle, Bahrick et Lickliter (2002) proposent que le traitement multi-sensoriel serait sous-tendu par des zones de convergence multi-sensorielles au sein desquelles afflueraient les informations provenant des différents sens. Ils proposent également que de cette convergence des informations découlerait un effet super-additif se retranscrivant au travers d'une plus forte saillance des informations multi-sensorielles. Chez l'adulte, il a par exemple pu être observé qu'olfaction et traitement des expressions faciales engageaient des substrats cérébraux communs, tels que l'amygdale, l'insula, le cortex orbitofrontal ou encore le cortex cingulaire antérieur (e.g., Royet et al., 2000 ; Wicker et al., 2003 ; pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.4.** paragraphe 3). Ainsi, il est possible que l'effet du contexte olfactif observé dans la présente étude soit dû à une pré-activation de régions de convergence multi-sensorielle (i.e., communes au traitement des odeurs et des visages) : l'exposition à une odeur pré-activerait ces structures ce qui en retour faciliterait/accélérerait leur recrutement et leur activation au cours du traitement de visages. Toujours en lien avec l'hypothèse de Bahrick et Lickliter (2002), il est possible que les modulations observées au niveau de la Nc soient liées à une plus forte saillance des visages en cas d'exposition à une odeur. En effet, étant donné que la Nc est une composante connue pour refléter l'allocation de l'attention (de Haan et al., 2003 ; Reynolds et Richards, 2005), il est concevable que celle-ci soit donc sensible aux variations de saillance des stimuli en lien avec la multi-sensorialité de l'événement. Toutefois, il est à souligner que dans l'hypothèse de la redondance inter-sensorielle, les auteurs insistent sur l'importance du rôle joué par la synchronie (redondance) entre les informations relayées par les sens (Flom & Bahrick, 2007). Or dans notre cas, l'exposition à des odeurs était effectuée de façon continue. Dans différentes études en EEG sur le traitement audiovisuel du langage chez le jeune enfant, il a pu être observé que les réponses cérébrales étaient modulées selon la synchronie entre informations auditives et visuelles (Grossman et al., 2006 ; Hyde et al., 2011 ; Reynolds et al., 2014). Il serait donc intéressant que de futures études viennent considérer ce point, en vue de déterminer si l'action du contexte olfactif sur les réponses cérébrales aux visages diffère selon que l'exposition à l'odeur se fait de façon synchrone à l'apparition du visage ou non.

Une alternative est que le contexte olfactif ait déclenché une réaction faciale et/ou émotionnelle chez les nourrissons, venant en retour moduler le traitement des visages. En effet, dès la naissance les odeurs ont un fort potentiel à déclencher des réactions faciales et affectives (Schaal, 1988 ; Soussignan & Schaal, 2001 ; Soussignan, Schaal & Marlier, 1999 ; Soussignan et al., 1997 ; Steiner, 1979). Dans différents courants théoriques, tels que ceux de l'*embodied cognition*, il est spéculé que les réactions faciales font partie intégrante du processus de traitement des expressions (e.g., Niedenthal et al., 2005, 2010) (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.).** Il a par exemple pu être démontré que le blocage des réactions faciales spontanées interférait sur la reconnaissance des expressions (Niedenthal, 2007 ; Oberman et al., 2007 ; Ponari et al., 2012). De même, il est classiquement rapporté que l'état émotionnel courant module l'aptitude à traiter les stimuli émotionnels. Cet effet est décrit sous l'appellation de biais de congruence émotionnelle et renvoie au fait que la saillance, la détection et la perception émotionnelle des stimuli sont avantagées pour les stimuli congruents avec l'état émotionnel de l'individu (Bower, 1981 ; pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.4.** paragraphe 2). Concernant plus spécifiquement le traitement des expressions faciales, il est envisagé que l'état émotionnel courant module l'aptitude à incarner et/ou simuler l'expression d'autrui (soit au niveau cérébral, soit au niveau facial), ce qui en retour agit sur la capacité de traitement des expressions (e.g., Niedenthal et al., 2010 ; Wicker et al, 2003). Cette dernière hypothèse peut se retrouver au travers de différents courants théoriques tels que ceux de l'*appraisal*, de la *shared signal hypothesis* et de l'*embodied cognition* (pour plus de détails sur ces courants théoriques voir **Chapitre 1 section 1.3.2** et **Chapitre 2 section 2.4.**). Ainsi au vu de ces différents éléments, il apparaît que l'action du contexte olfactif sur le traitement des visages puisse passer à la fois au travers des réactions faciales et/ou émotionnelles induites par les odeurs, mais aussi, et surtout, par son action sur la simulation/incarnation des réactions émotionnelles. Dans notre cas, l'exposition des nourrissons à une odeur pourrait avoir induit des réactions faciales et émotionnelles spécifiques, encourageant ainsi la simulation et/ou l'incarnation d'une expression ce qui en retour aurait modulé les réactions cérébrales aux visages inexpressifs. Les modulations observées dans les réponses cérébrales (au niveau de la N290 et de la Nc) pourraient notamment refléter une réaction à l'absence de correspondance entre l'émotion et/ou l'expression induite par l'odeur et l'expression du visage à traiter, étant donné qu'ici seuls des visages inexpressifs étaient présentés. En lien avec ces considérations, Vogel, Monesson et Scott (2012) rapportent que la congruence/incongruence entre expression faciale et émotion amorcée au niveau auditif module l'amplitude de la Nc chez les enfants de 5 mois, et

l'amplitude de la N290 et de la P400 chez ceux de 9 mois. Similairement, dans leur étude sur les enfants de 5 mois, Grossman et collaborateurs (2006) ont observé que la présentation d'un visage expressif modulait les réactions cérébrales à l'audition d'une voix dont l'intonation communiquait une émotion : en cas d'incongruence entre voix et expression une Nc plus ample était observée. Les auteurs ont interprété cette modulation de la composante comme étant liée à une plus forte allocation attentionnelle vers le stimulus en réaction à l'incongruence (absence de correspondance) inter-sensorielle. En vue de pouvoir étudier plus en détails si les modulations des réponses cérébrales aux visages sont liées ou non à la correspondance entre expression/émotion suscitée par l'odeur et l'expression vue, il serait intéressant que de futures recherches en EEG étudient, chez les nourrissons de 3 mois, les effets d'odeurs hédoniquement contrastées sur les réponses cérébrales à des visages exprimant des émotions de valences différentes (notamment joie et dégoût).

En résumé, bien que cette étude soit préliminaire et qu'il soit par conséquent nécessaire de considérer ces résultats avec précaution, les données récoltées suggèrent que le contexte olfactif influe sur le traitement des visages chez le nourrisson de 3 mois. Cette influence de l'odeur s'est manifestée au travers d'une accélération d'une composante spécifique du traitement du visage et de sa structure (la N290) et d'une composante connue pour refléter l'engagement attentionnel (la Nc). Ces résultats encouragent donc à poursuivre l'expérience en vue de pouvoir plus amplement confirmer ces observations préliminaires, mais aussi à poursuivre les expériences en EEG sur le nourrisson afin de pouvoir déterminer plus précisément la nature des interactions olfacto-visuelles dans le traitement des visages et des expressions faciales.

Chapitre 7 :
Effet du contexte olfactif sur les stratégies d'exploration visuelle du visage chez les enfants de 7 mois (Expérience 5)

7.1. INTRODUCTION

Très tôt au cours de leur développement, les nourrissons sont capables de traiter et d'intégrer les informations présentes dans leur environnement de façon multi-sensorielle. Dans la littérature antérieure, il a pu être démontré que dès les étapes les plus précoces, les nourrissons sont non seulement capables de traiter et percevoir les équivalences intermodales (e.g., Jouen & Molina, 2000 ; Sann & Streri, 2007 ; Streri, 2012 ; Streri & Gentaz, 2003 ; Streri & Milhet, 1988), mais aussi et surtout, d'effectuer des apprentissages multi-sensoriels, et ce aussi bien au cours des périodes anté- et postnatales (Blass & Camp, 2001 ; Brookes et al., 2001 ; Herbinet & Busnel, 1995 ; James, 2010 ; Patterson & Werker, 2003 ; Spelt, 1948). Concernant le traitement des visages, cette thématique a majoritairement été étudiée au niveau des interactions audio-visuelles. Il a notamment été rapporté que dès les premiers mois de vie, les nourrissons mettent en correspondance les syllabes et les sons langagiers entendus avec l'image d'une personne les produisant (Lewkowicz et al., 2010, 2015 ; Patterson & Werker, 2003 ; Pons et al., 2009). Toujours au niveau audio-visuel, les enfants sont également capables de faire de même avec les expressions faciales : dès 4 mois pour la joie ; et pour la neutralité, la colère et la tristesse à 5 et 7 mois (Vaillant-Molina, Barhick & Flom, 2013 ; Walker, 1982 ; Walker-Andrews, 1986, 1988, 1997).

En outre, dans leur hypothèse sur la redondance inter-sensorielle, Bahrick et Lickliter (2002) avancent la présence d'un effet super-additif dans la multi-sensorialité : selon les auteurs, les informations présentes simultanément au niveau des différents sens seraient plus saillantes pour les jeunes enfants et seraient mieux intégrées par ces derniers (Barhick et Lickliter, 2002 ; Robinson et Sloutsky, 2010). En lien avec le traitement des expressions faciales, différentes études ont pu corroborer cette hypothèse en démontrant une meilleure aptitude des nourrissons à discriminer les émotions lorsqu'elles sont présentées de façon bimodale (i.e., expression faciale et vocale) (Caron et al., 1988 ; Walker-Andrews & Lennon, 1991), ainsi qu'en démontrant que la capacité des enfants à traiter les expressions de façon bimodale était antérieure à la capacité à les traiter de façon unimodale (Flom & Bahrick, 2007).

L'odorat constitue un sens bien représenté dans l'univers perceptif du jeune nourrisson. En effet celui-ci est l'un des premiers sens fonctionnels chez le fœtus (Schaal, 2012 ; Schaal & Durand, 2012), et différentes études démontrent la présence de capacités

d'apprentissage olfactif au cours des périodes anté- (e.g., Schaal et al., 2000) et postnatale (e.g., Delaunay-El Allam et al., 2006, 2010), mais aussi d'apprentissage multi-sensoriel impliquant l'olfaction dès les premiers mois de vie (Fernandez & Barhick, 1994 ; Rubin et al., 1998 ; Sullivan et al., 1991 ; Wada et al., 2012). De plus, olfaction et expression faciale sont toutes deux étroitement liées et ce dès la prime enfance. En effet, outre les études démontrant la présence d'une influence de l'olfaction sur le traitement des expressions faciales et un partage de substrats cérébraux entre les deux processus à l'âge adulte (pour détails voir **Chapitre 2 section 2.3.**), différentes études ont pu démontrer que, dès la naissance, les enfants manifestent des réactions faciales distinctes aux odeurs de valences hédoniques contrastées (Soussignan et al., 1997, 1999 ; Steiner, 1979).

Ces différents éléments amènent à penser que les jeunes enfants pourraient, au travers de leurs expériences (i.e., à la fois leurs propres réactions faciales aux odeurs et celles d'autrui), intégrer les odeurs au sein de représentations multi-sensorielles unifiant odeur et expression faciale, comme ils le font pour les informations perçues au moyen des autres sensorialités. Bien qu'il semble hautement probable que les jeunes enfants puissent intégrer/apprendre le lien unifiant expression et valence des odeurs, à notre connaissance, seule une étude s'est à l'heure actuelle penchée sur la question. Dans cette étude, Godard et collaborateurs (sous presse) ont exposé des enfants de 3, 5 et 7 mois à différents contextes olfactifs de valence contrastée (i.e., contrôle, plaisant/fraise et déplaisant/acide butyrique) tandis qu'ils étaient simultanément exposés à deux visages présentés côte à côte et exprimant des émotions elles aussi contrastées (i.e., dégoût et joie). Les auteurs ont pu observer qu'à 3 mois les enfants regardaient plus l'expression congruente avec le contexte olfactif auquel ils étaient exposés (i.e., plaisant-joie), mettant ainsi en avant la présence d'une habileté précoce du nourrisson à lier et mettre en correspondance odeurs et expressions faciales sur la base de leur valence affective/émotionnelle. Néanmoins, ce résultat ne se retrouvait pas chez les enfants plus âgés : les enfants de 5 mois exploraient plus le visage de dégoût quel que soit le contexte olfactif ; les enfants de 7 mois exploraient de façon équivalente les deux visages, là aussi peu importe l'odeur à laquelle ils étaient exposés. Les auteurs ont interprété cette différence dans les résultats observés comme pouvant être liée au fait que, chez les plus âgés, l'odeur aurait induit une attente spécifique quant à l'expression que le visage devrait arborer en réaction à l'odeur. Ainsi, en accord avec le contexte olfactif auquel ils étaient exposés, les enfants auraient recherché les éléments/AUs distinctifs et spécifiques de l'expression correspondant à l'odeur sentie, et en conséquence auraient exploré l'expression congruente

puisqu'elle présentait les modifications des éléments internes attendues ; mais aussi l'expression non-congruente du fait d'une réaction à la rupture entre les AUs attendues et celles affichées par le visage.

Le but principal de la présente étude était de déterminer si des interactions olfacto-visuelles pouvaient se retrouver dans le traitement des expressions faciales chez les enfants de 7 mois. Plus précisément, notre objectif était d'étudier si, comme spéculé par Godard et collaborateurs (sous presse), l'odeur déclenchait une attente quant à l'expression que le visage devrait arborer, ainsi qu'une recherche des actions faciales spécifiques/distinctives de ces expressions. A cette fin, nous avons exploré au moyen de la poursuite des mouvements oculaires, quelles étaient les modifications des stratégies d'exploration visuelle induites par l'exposition à des contextes olfactifs hédoniquement contrastés chez les enfants de 7 mois. Au cours de l'expérience, les enfants étaient successivement exposés à 10 essais, consistant en la présentation du même visage féminin arborant une expression neutre. Les 6 premiers essais correspondaient à une phase de familiarisation, tandis que les 4 derniers correspondaient à la phase test pendant laquelle un contexte olfactif était introduit. Les enfants étaient exposés soit à une odeur plaisante (i.e., fraise), soit à une odeur déplaisante (i.e., acide butyrique), soit à une condition contrôle (pas d'odeur).

Nous avons pu constater, au cours de la première expérience décrite dans cette thèse, que dans leur exploration des différentes expressions faciales, les enfants de 7 mois se focalisaient spécifiquement sur les éléments distinctifs et caractéristiques des expressions. Notamment, nous avons pu observer que ces derniers exploraient plus la bouche (i.e., étirement de la bouche et dents découvertes) sur les visages de joie, et le nez (i.e., plissement du nez) sur les visages de dégoût. En accord avec ces résultats, nous avons donc formulé l'hypothèse que si les enfants ont bien une attente quant à l'expression que devrait arborer le visage, et s'ils recherchent les éléments distinctifs de cette expression en lien avec l'odeur à laquelle ils étaient exposés, alors ils devraient se focaliser sur les zones où sont supposées apparaître les AUs distinctives de l'expression, et ce bien que le visage ne les affiche pas (i.e., visage demeurant neutre et statique). Les enfants devraient donc se focaliser sur le nez lorsqu'ils sont exposés à l'odeur déplaisante (i.e., attente de l'expression de dégoût). A l'inverse, ils devraient venir se focaliser sur la bouche lorsqu'ils sont exposés à l'odeur plaisante (i.e., attente de l'expression de joie).

7.2. METHODE

7.2.1. Participants

L'échantillon final considéré pour cette étude été composé de 75 enfants (33 filles et 42 garçons) tous âgés de 7 mois au moment de l'expérience (âge moyen = 214,5 ± 2,8 jours). Ce groupe total était subdivisé en 3 groupes de 25 enfants (11 filles et 14 garçons au sein de chaque groupe), chaque groupe étant assigné à une condition olfactive spécifique (i.e., contrôle, plaisant et déplaisant). Tous étaient nés à terme après une grossesse et un accouchement sans complication, avec un poids de naissance normal (M= 3.3 ± 0.5) et des scores d'Apgar à 1 min et 5 min eux aussi normaux (score à 1 min ≥ 6 ; score à 5 min ≥ 8). Tous les enfants étaient en bonne santé au moment de l'expérience, et les parents n'ont rapporté aucun antécédent ou suspicion de troubles neurologiques ou développementaux. Soixante-dix-huit autres enfants ont été testés, mais n'ont pas été retenus au sein de l'échantillon final. Différents critères ont mené à l'exclusion de ces enfants : énervement/agitation au cours de l'expérience (n= 40) ou inattention importante (n=2), naissance prématurée (n=7), problèmes techniques liés aux odeurs (n=1), problèmes techniques liés au système de poursuite de mouvements oculaires (i.e., perte du regard par le système) ou présence de comportements exploratoires atypiques (i.e., longue focalisation - plus de 4s - sur un point du visage, augmentation du temps d'exploration au cours de la phase de familiarisation, moins de regard s

ur les visages par rapport à l'ensemble du groupe) (n=28). Les parents ont été contactés au moyen d'un courrier suivi d'un appel téléphonique. Au cours de cet appel, ils étaient informés sur le but de l'étude et la procédure globale de l'expérience. Une fois au laboratoire, dans la salle d'étude sur l'enfant du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, les parents recevaient une description complète de l'expérience ainsi que du matériel utilisé. Pendant cet échange avec le(s) parent(s), les expérimentateurs maintenaient également une interaction joviale avec l'enfant. Tous les parents ont fourni leur accord écrit pour la participation de leur enfant à l'étude. Le(s) parent(s) étai(en)t présent(s) dans la salle tout au long de l'expérience et pouvai(en)t interrompre la session expérimentale à tout moment en cas de pleurs ou d'inconfort de leur enfant. L'ensemble des tests a été effectué en

accord avec la Déclaration de Helsinki pour l'expérimentation sur participants humains (*Bristich Medical Journal*, 1991 ; 302 : 1194).

7.2.2. Matériel

A. Stimuli visuels

Nous avons utilisé les photographies couleurs de 20 visages de jeunes femmes d'origine Caucasienne, toutes posant une expression neutre. Ces photographies ont été sélectionnées au sein d'une base locale de visages, précédemment pré-testée et utilisée au cours de diverses expériences (Chambon et al., 2006 ; Durand et al., 2007 ; Vernet, Baudouin & Franck, 2008). Dans un premier temps les photographies ont été détourées au moyen d'un filtre circulaire et montées sur un fond blanc. Les images obtenues ont ensuite été redimensionnées à une taille de 766 × 904 pixels ; représentant 17,3 cm de haut sur 26,3 cm de large une fois présentées à l'écran. Les images étaient présentées sur un écran de 22 pouces (résolution = 1680 × 1050 pixels) au moyen du logiciel ExperimentCenter (version 3.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Allemagne).

B. Stimuli Olfactifs

Deux odeurs ont été sélectionnées pour leur valence hédonique contrastée : une odeur plaisante de fraise (arome alimentaire, Meilleur du Chef, Maignon, France) et l'odeur déplaisante de l'acide butyrique (Sigma, Saint-Quentin-Falaviers, France). Ces odorants ont été choisis à la fois car ils sont considérés comme représentatifs des deux versants hédoniques, mais aussi du fait qu'ils ont souvent été utilisés pour déclencher des états affectifs et réactions faciales positives et négatives dans des études antérieures sur l'enfant et le nourrisson (Schaal, 1997 ; Soussignan et al., 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996 ; Wagner et al., 2013). L'arôme de fraise était utilisé non-dilué, tandis que l'acide butyrique était dilué dans de l'huile minérale à une concentration de 5.10^{-4} v/v. Les deux odorants étaient déposés sur un morceau de matériel absorbant inodore (P100, Powersorb, 3M) : 10 gouttes d'arôme de fraise (i.e., 200µl) et 5 gouttes de la dilution d'acide butyrique (i.e., 100µl). Ces quantités ont été choisies sur la base d'un prétest au cours duquel leur intensité et leur équivalence étaient jugées par 4 juges adultes. Le stimulus contrôle consistait en un morceau de matériel

absorbant sur lequel aucune odeur n'était déposée. Chacun des trois morceaux de matériel absorbant était inséré dans une bouteille distincte de 20 ml en polypropylène elles-mêmes connectées à un système d'arrivée d'air.

Pour la présentation des odeurs, nous avons utilisé un système de flux d'air continu. L'air non odorisé provenait d'un compresseur externe au sein duquel l'air était purifié au moyen de filtres à charbon et mis à température ambiante. Le flux d'air principal (non-odorisé) était sélectivement orienté vers l'une des trois bouteilles en polypropylène au moyen d'une valve actionnée manuellement, permettant ainsi aux flux d'air de venir entrainer l'air saturé en odeur qui se développait au-dessus du matériel absorbant dans chaque bouteille. Le flux d'air émanant de chaque bouteille était acheminé et relâché dans l'atmosphère entourant l'enfant à une distance d'environ 15 cm de son visage, au moyen d'un tube fixé sur le siège où l'enfant était installé. Afin d'éviter toute effet lié à la détection du flux d'air, celui-ci était maintenu en continu tout au long de l'expérience et à une pression basse (1 Bar). De plus, avant chaque expérience, il était vérifié que le flux d'air soit orienté de façon à ce qu'il ne vienne pas directement stimuler (tactilement) le visage de l'enfant.

7.2.3. Procédure

Toutes les sessions expérimentales ont eu lieu dans une salle dédiée à l'étude sur l'enfant et équipée en conséquence, et au sein de laquelle l'ambiance acoustique, thermique et lumineuse étaient maintenues constantes. A leur arrivée les parents étaient confortablement installés, tandis que les détails relatifs à l'étude leur étaient donnés. Au cours de cette période, les deux expérimentateurs s'engageaient également dans une interaction joviale et dans des jeux avec l'enfant, afin de le mettre à l'aise et en confiance. Ces interactions avec l'enfant étaient maintenues jusqu'à ce que parent(s) et expérimentateurs jugent l'enfant prêt pour débuter l'expérience et pour rester éloigné du parent durant de l'expérience.

Dans un premier temps, avant que l'enfant ne soit installé devant l'écran, le système d'arrivée d'air était allumé, avec la valve réglée de façon à ce que le flux d'air passe au sein de la bouteille « contrôle » (i.e., bouteille sans odorant). Ainsi, tout biais lié à l'arrivée soudaine du flux d'air au cours de l'expérience était évité. Suite à cela, l'enfant était confortement installé dans un siège-auto face à un écran de stimulation situé à une distance d'environ 60 cm. Etant donné que le système de poursuite de mouvements oculaires était

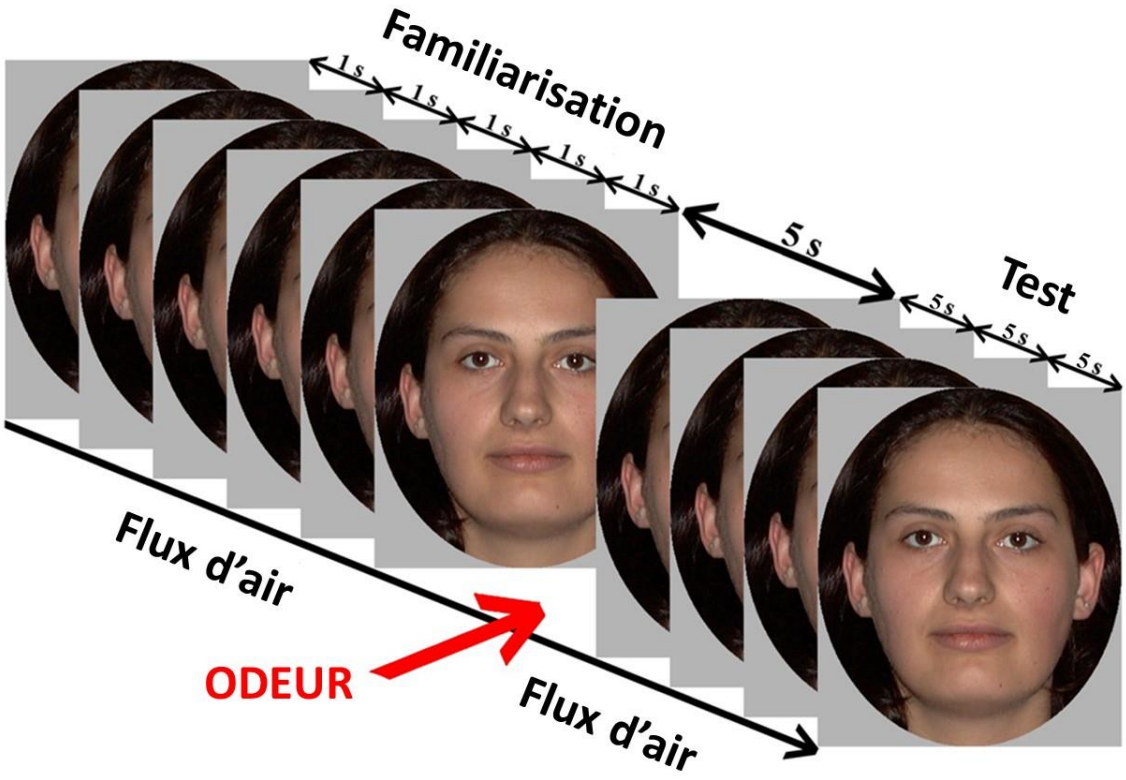
directement fixé sous l'écran, la position de ce dernier était réglée avant lancement de l'expérience afin d'optimiser la détection du regard par le système.

Au cours de l'expérience chaque enfant passait deux étapes expérimentales : une étape de calibration et l'étape d'expérimentation en elle-même, qui incluait une phase de familiarisation et une phase test.

La Calibration. Un personnage animé en mouvement et accompagné d'un son apparaissait au centre de l'écran. Dès que l'enfant fixait le personnage, le déplacement de la figure vers une nouvelle localisation était déclenché manuellement par l'expérimentateur. Le personnage était maintenu en position jusqu'à ce que l'enfant le fixe de nouveau et que l'expérimentateur déclenche un nouveau déplacement, et ce jusqu'à ce que le personnage ait été fixé en 5 localisations différentes sur l'écran (i.e., le centre et les 4 coins de l'écran). Une webcam (QuickCam Pro 9000, Logitech) positionnée au-dessus de l'écran de stimulation permettait de déterminer quand l'enfant fixait le personnage. Si le système de poursuite de mouvements oculaires ne détectait pas le regard sur toutes les positions, ou si la précision de détection du regard n'était pas satisfaisante (i.e., > 1°, ou tout du moins proche de cette valeur si supérieure après plusieurs calibrations), alors la procédure de calibration était effectuée une nouvelle fois.

La phase de familiarisation et de test. Les enfants étaient successivement exposés à 10 essais (6 essais de familiarisation et 4 essais de test) au cours desquels était présentée la photographie du même visage neutre féminin (1 identité neutre parmi les 20 utilisées, différents enfants étant exposés à des identités différentes) (pour illustration voir **figure 32**). Durant la phase de familiarisation, les enfants étaient exposés à 6 présentations du visage neutre. Une procédure contrôlée par l'enfant était utilisée pour la durée de présentation des stimuli : l'expérimentateur déclenchait le passage à l'essai suivant dès que l'enfant désengageait son regard de l'écran/visage pendant plus de 1s. La durée maximum de présentation de chaque essai était de 15 s. Ainsi, le visage neutre pouvait demeurer à l'écran pendant 15s, si l'enfant ne regardait pas ailleurs plus de 1 s au cours de cette période, ou si l'enfant ne regardait pas l'écran tout au long de l'essai. Entre chaque essai l'intervalle inter-stimulus consistait en un écran bleu d'une durée de 1s. Suite à la familiarisation, le contexte olfactif était introduit (i.e., passage du flux d'air dans la bouteille contenant ou non une odeur déclenché manuellement au moyen de la valve) et la phase test débutait. L'intervalle inter-

stimulus entre le dernier essai de familiarisation et le premier essai de la phase test, ainsi qu'entre tous les essais de la phase test était de 5s[9]. La phase test consistait simplement en la présentation du même visage neutre au cours de 4 essais supplémentaires, là aussi avec une procédure de présentation contrôlée par l'enfant, et cela dans l'un des 3 contextes olfactifs (i.e., plaisant, déplaisant ou contrôle). Au cours de cette phase test chaque enfant n'était



exposé qu'à une seule des 3 conditions olfactives.

Figure 32 : Représentation schématique de l'organisation temporelle de la présentation des visages et des odeurs au cours de la session expérimentale. Le même visage était présenté 6 fois pour familiarisation, sans addition d'odorant dans le flux d'air. Puis, le contexte olfactif était introduit selon le groupe de l'enfant (plaisant, déplaisant ou contrôle) pour 4 nouveaux essais avec le même visage. La durée des essais était déterminée selon une procédure contrôlée par l'enfant. Les temps précisés dans ce schéma représentent la durée des intervalles inter-stimulus.

Deux expérimentateurs étaient présents pour effectuer l'expérience, chacun remplissant un rôle distinct : le premier expérimentateur était en charge de contrôler

[9] Ces variations dans les intervalles inter-stimulus entre les deux phases (i.e., familiarisation et test) ont été mises en place pour différentes raisons techniques. L'intervalle de 1s pendant la période de familiarisation était appliqué dans le but de maintenir l'attention de l'enfant vers l'écran grâce à la présence de variations visuelles relativement rapides. L'intervalle de 5s était mis en place afin de permettre à l'odeur d'avoir le temps d'imprégner l'environnement aérien entourant l'enfant. Enfin, cet intervalle était maintenu au cours de la phase test afin d'éviter tout biais lié à une nouvelle variation de l'intervalle inter-stimulus

l'apparition des stimuli visuels à l'écran et de déclencher le passage à l'essai suivant lorsque l'enfant désengageait son attention du visage plus d'1s (comportement de l'enfant surveillé depuis l'écran de contrôle au moyen de la webcam fixée au-dessus de l'écran) ; le second expérimentateur avait en charge de déclencher la présentation du contexte olfactif en actionnant la valve du système de flux d'air. La condition olfactive était déterminée par le second expérimentateur, tandis que le premier expérimentateur était aveugle quant à la nature de l'odorant auquel l'enfant était exposé. De cette façon tout biais lié aux attentes du premier expérimentateur en lien avec la condition olfactive était ainsi évité.

Pendant la session expérimentale, les parents étaient installés sur une chaise située en dehors du champ de vision de l'enfant (i.e., derrière l'enfant à une distance de 1,5 m), et avaient pour consigne de rester aussi silencieux et immobiles que possible. En cas d'inconfort ou de pleurs de l'enfant, l'expérience était interrompue et les parents étaient invités à rejoindre leur enfant et à le réconforter.

7.2.4. Enregistrement et analyses des données

L'enregistrement bidimentionnel des paramètres oculométriques sur chaque œil des enfants au cours de l'expérience était effectué à l'aide d'un système de poursuite de mouvements oculaires SMI (RED250, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne) fixé sous l'écran de stimulation, et du logiciel iViewX (version 2.4, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne) avec une fréquence d'échantillonnage à 250 Hz. En moyenne, la résolution spatiale de calibration était de 0.69 ± 0.29 pour l'axe X et de 0.67 ± 0.44 pour l'axe Y. Les données brutes étaient, quant à elles, extraites après expériences au moyen du logiciel BeGaze (version 3.4, SensoriMotoricInstrument GmbH, Teltow Allemagne).

A. Transformation des données oculométriques

En vue de pouvoir effectuer des analyses fines sur la localisation des différentes fixations visuelles faites par les enfants, nous avons transformé la localisation des fixations sur chaque visage afin de les faire correspondre sur un même visage prototypique. Nous avons calculé les coordonnées de 166 points sur chacun des visages montrés aux enfants, correspondant aux éléments faciaux principaux (pour illustration voir **figure 33**). Cette

procédure est semblable à celle utilisée pour *morpher* ensemble différents visages, au cours de laquelle les points sont positionnés sur les éléments faciaux principaux afin de les moyenner. Ici, le but était de calculer les coordonnées x-y des différents points afin de définir 314 triangles couvrant l'ensemble du visage. La même procédure était appliquée sur un visage prototypique qui était un visage moyen de 32 visages féminins neutres généré au moyen d'un logiciel de morphing (Morpheus 5.1) et ayant été utilisé au cours d'une étude antérieure (Baudouin & Gallay, 2006). Pour chaque fixation (F) sur le visage original, nous avons dans un premier temps considéré le triangle dans lequel elle se situait. Ensuite, l'un des angles de ce triangle était considéré comme point de référence (point A), et étaient calculées les distances x et y entre cet angle et le point de fixation, ainsi que les distance x et y entre cet angle et les deux autres angles (points B et C). Six distances étaient ainsi calculées pour chaque point de fixation : AF, AB et AC pour les coordonnées x et y. Suite à cela, nous avons calculé le ratio de la distance AF par rapport aux distances AB et AC, également pour les coordonnées x et y, respectivement. De plus, pour transformer les coordonnées des points de fixation de façon à ce qu'elles correspondent sur le visage prototypique, nous avons calculé les distances AB et AC des triangles sur le visage prototypique, puis avons ensuite appliqué le ratio précédemment calculé sur ces distances afin de calculer la distance AF sur le visage prototypique (cela à la fois pour les coordonnées x et y). Les deux valeurs ainsi obtenues pour AB et AC étaient moyennées et ces valeurs moyennes obtenues pour x et y étaient ajoutées aux coordonnées du point A sur le visage prototypique pour obtenir les coordonnées transformées correspondant au visage prototypique.

Grace à cette procédure, une fixation de l'enfant localisée, par exemple, sur la pointe du nez sur les visages présentés était localisée sur la même zone sur le visage prototypique, et ce même si les coordonnées brutes de cette région étaient différentes entre ces deux visages. De la même façon, si deux enfants regardaient le sourcil de deux visages différents (i.e., chaque enfant ayant un visage féminin différent), les coordonnées transformées correspondaient à la même localisation sur le visage prototypique, même si les sourcils étaient différents (i.e., forme et position) entre les deux visages ; permettant ainsi la comparaison entre enfants bien que des identités variables leur aient été présentées. Cette procédure (i.e., transformation de chaque point de fixation pour chaque enfant et chaque visage pour correspondre sur un même visage prototypique) permettait le calcul et la création de cartes représentant la localisation des fixations sur un visage prototypique, et ce après correction des variations morphologiques liées au changement d'identité.

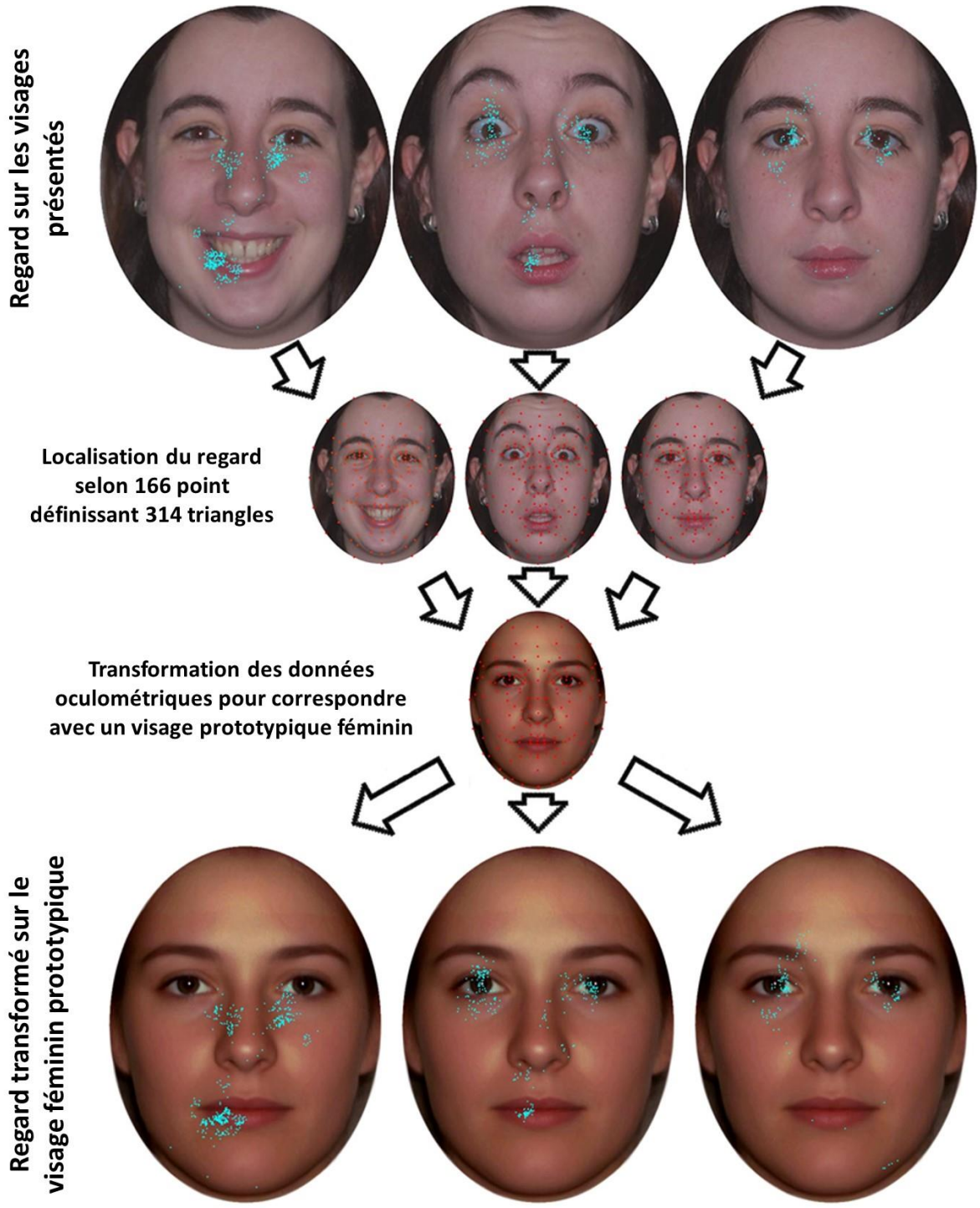


Figure 33 : Organigramme de la procédure de transformation des données oculométriques (d'après Baudouin et al., 2012). En haut : les points de fixation enregistrés d'un enfant de 8 mois (prélevés uniquement sur l'œil droit) pour 3 photographies du même visage féminin exprimant 3 émotions différentes. Au milieu : chaque fixation était localisée dans l'un des 314 triangles définis par 166 points sur les visages. Les fixations étaient ensuite « relocalisées » dans le triangle correspondant sur un visage prototypique. En bas : les fixations relocalisées sur le visage prototypique. Chaque fixation étant standardisée en référence au même visage prototypique, permettant ainsi de comparer/moyenner les fixations pour les différentes expressions et/ou les différents visages.

B. Analyses des données

Le temps total de regard pour chaque visage a été dérivé sur la base des données récoltées par le système de poursuite de mouvements oculaires. Afin de visualiser les patterns d'exploration visuelle des enfants, nous avons créé des « cartes exploratoires » représentant le temps passé par les enfants à regarder les différentes régions du visage. Pour chaque pixel de l'image du visage prototypique, nous avons calculé le temps passé par les enfants dans un périmètre de 41 pixels de diamètre, correspondant à un angle visuel de 1° à la distance à laquelle étaient les enfants par rapport à l'écran. Les cartes ainsi créées sont illustrées en **figures 36-38**. Sur ces cartes, le temps moyen de regard est retranscrit au moyen d'un code couleur.

Afin d'analyser les patterns d'exploration au cours de la phase de test, différentes régions d'intérêts (AOIs) ont été déterminées. Ces différentes AOIs ont été définies à la fois sur la base des observations sur les cartes exploratoires, mais aussi et surtout, de façon à inclure les localisations des AUs pertinentes pour le traitement des expressions (AUs 6, 12 pour la joie et AUs 9, 15 et 16 pour le dégoût, Ekman & Friesen, 1978). Cinq AOIs ont été utilisées : l'œil droit, l'œil gauche, le nez, les narines et la bouche (voir **figures 36-38** pour illutrations). Au sein de chaque AOI, 3 types de mesures ont été prélevés : le temps de regard dans l'AOI, le pourcentage d'enfants ayant regardé l'AOI et le pourcentage de temps passé par l'enfant à regarder au sein de chaque AOI par rapport au temps total passé à regarder le visage. Afin de limiter le bruit lié aux saccades lors du calcul du pourcentage d'enfants ayant regardé chaque AOI, il était considéré qu'un enfant avait regardé une AOI uniquement si son regard avait été détecté pendant au moins 100ms dans cette zone.

C. Analyses statistiques

Deux séries d'analyses ont été effectuées. Dans la première série, nous avons considéré le temps global de regard sur les visages. Pour vérifier l'équivalence de la familiarisation entre les trois groupes, nous avons fait une première analyse de variance sur la phase de familiarisation (i.e., phase où les enfants n'étaient exposés à aucune odeur). Sur la phase test, deux analyses ont été faites. Pour la première, nous avons analysé l'effet du contexte olfactif sur le temps global de regard sur les visages. Pour la seconde, nous avons

calculé le pourcentage de changement dans le temps de regard entre les 3 derniers essais de familiarisation et chaque essai de la phase test. Pour cela, nous avons soustrait le temps d'exploration moyen sur les 3 derniers essais de familiarisation au temps d'exploration au cours des essais de la phase test ; cette différence était ensuite divisée par le temps moyen de regard des trois derniers essais de familiarisation. De cette façon, si un réengagement de l'attention vers les visages suite à l'introduction de l'odeur était présent, alors un pourcentage positif devrait être observé.

Le but de la seconde série d'analyses était d'étudier si le contexte olfactif modifiait la façon dont les enfants exploraient et se focalisaient sur les différents éléments faciaux au cours de la phase test. Les 3 types de mesures (temps de regard, pourcentage d'enfant et pourcentage de temps de regard) ont été analysés après avoir soustrait à chaque essai de la phase test le temps moyen de regard au cours des 3 derniers essais de familiarisation. Cette opération a été faite pour chaque enfant et sur chaque essai de la phase test. Nous avons ainsi obtenu pour chaque groupe le changement moyen d'exploration entre la fin de la familiarisation et la phase test. Des cartes exploratoires différentielles (i.e., représentant les différences entre les trois groupes d'odeur) ont été créées afin de voir exactement sur quelles régions du visage les différences se situaient (voir **figure 36-38**). Les différences de temps d'exploration au sein des différentes AOIs ont ensuite été calculées au sein de chacune des AOIs. Ces différences ont ensuite été soumises à des analyses de variance. Toutes les analyses de variance ont été faites avec application de corrections de Greenhouse-Geiser. Les comparaisons post-hoc ont été effectuées au moyen de tests de Fisher LSD. Des analyses complémentaires effectuées au moyen de T de Student unidirectionnels ont été faites en vue de déterminer si une réaction significative était présente en phase test lorsque cela s'avérait pertinent. Elles étaient faites avec pour référence la valeur théorique *zéro* : valeur attendue si l'enfant ne changeait pas son temps d'exploration sur une AOI au cours de la phase test par rapport aux trois derniers essais de familiarisation.

7.3. RESULTATS

7.3.1. Effet des odeurs sur le temps d'exploration global des visages

Le temps moyen de regard pour chaque essai au cours de la phase de familiarisation et de la phase test est représenté en **figure 34**.

Pour la ***phase de familiarisation***, l'ANOVA comprenant les variables Contexte Olfactif (contrôle, plaisant et déplaisant) en inter-sujets et l'Essai de Familiarisation (1 à 6) en intra-sujets, a indiqué la présence d'un effet significatif de l'Essai de Familiarisation [$F(5,360)= 56.87$, $\varepsilon= .92$, $p<.0001$, $\eta p^2= .44$]. Les tests post-hoc de Fisher ont montré que le temps de regard diminuait significativement entre le premier et le troisième essai de familiarisation ($p<.05$), le troisième essai de familiarisation étant lui-même regardé plus longtemps que les deux derniers essais de familiarisation (les deux $ps<.05$). Le temps de regard ne différait pas entre les trois derniers essais de familiarisation. L'effet du Contexte Olfactif n'était pas significatif et il n'interagissait pas avec l'Essai de Familiarisation [les deux $Fs<1$]. Au vu de ces résultats, il apparaît que les enfants se sont habitués aux visages au cours de la phase de familiarisation, comme indiqué par la diminution significative de leur temps d'exploration au cours de cette phase, et ce sans différence entre les trois groupes.

Au cours de la ***phase test***, l'ANOVA comprenant les variables Contexte Olfactif (contrôle, plaisant et déplaisant) en inter-sujets et l'Essai de Test (de 1 à 4) en intra-sujets a indiqué la présence d'un effet significatif de l'Essai de Test [$F(3,216)= 2.90$, $\varepsilon= .91$, $p<.05$, $\eta p^2= .04$]. Les tests post-hoc de Fisher ont montré que le temps moyen de regard diminuait significativement entre le premier et les deux derniers essais de la phase test (les deux $ps<.05$). Plus important encore, l'effet du Contexte Olfactif était significatif [$F(2,72)= 3.71$, $p<.05$, $\eta p^2= .09$] et n'interagissait pas avec l'Essai de Test ($F<1$). Les tests post-hoc ont révélé que les enfants regardaient plus longtemps le visage en phase test lorsqu'ils étaient dans le groupe exposé à la fraise (4.4 s), par rapport aux groupes en condition contrôle et celui exposé à l'acide butyrique (3,3 et 3,1 s ; $p= .0379$ et $p = .0132$, respectivement).

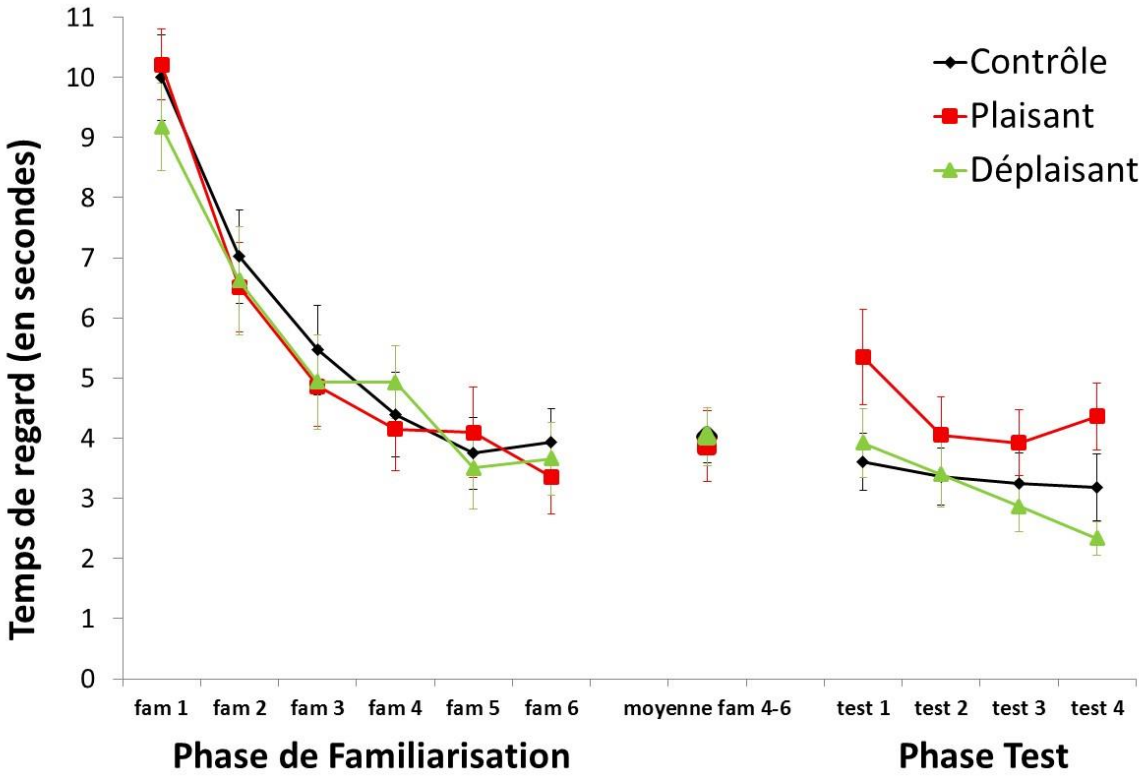


Figure 34 : Temps moyen de regard sur les visages pendant les phases de familiarisation et de test, selon le contexte/groupe olfactif (en secondes ; les barres d'erreurs représentent les erreurs standards).

Afin de tester plus précisément les variations de temps de regard au cours de la phase test, nous avons calculé le pourcentage de changement de temps de regard en phase test (pour plus de détails voir partie Analyses statistiques). Le pourcentage de changement de temps de regard est représenté en **figure 35**. Une ANOVA comprenant les variables Contexte Olfactif (contrôle, plaisant, déplaisant) en inter-sujets et Essai de Test (de 1 à 4) en intra-sujets a été appliquée. L'effet de l'Essai de Test n'était pas significatif [$F(3,216)= 1.41$] et n'interagissait pas avec le Contexte Olfactif [$F<1$], tandis que l'effet du Contexte Olfactif seul était lui significatif [$F(2,72)= 4.43$; $p<.02$, $\eta p^2= .11$]. Les tests post-hoc ont montré que le changement dans le temps de regard était plus important pour les enfants du groupe exposé au contexte olfactif plaisant (augmentation du pourcentage de temps de regard de 55.2% en moyenne) par rapport aux enfants des groupes exposés au contexte olfactif contrôle (-7.3% ; $p= .0092$) et déplaisant (-2.5% ; $p= .0160$). Aucune différence n'était observée entre les enfants des groupes exposés aux contextes contrôle et déplaisant. Les analyses complémentaires effectuées au moyen de T de Student ont indiqué que le pourcentage de changement de temps de regard était significativement supérieur à zéro pour les enfants du

groupe plaisant [T(24)= 2.39, *p*= .0250], mais pas pour les enfants des groupes contrôle [T(24)= -.77] et déplaisant. [T(24)= -.18].

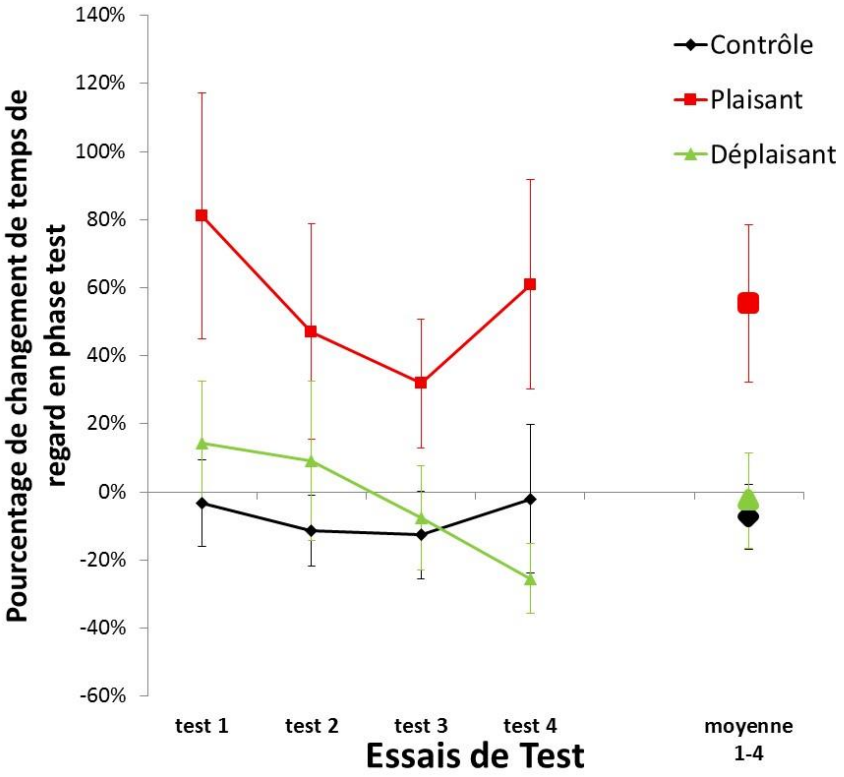


Figure 35 : Pourcentage moyen de changement de temps de regard sur les visages pendant la phase de test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon le contexte/groupe olfactif (les barres d'erreurs représentent les erreurs standards).

7.3.2. Effet du contexte olfactif sur l'exploration des différents éléments faciaux

Nous avons ensuite testé si les patterns d'exploration visuelle des différents éléments faciaux différaient selon le contexte olfactif auquel les enfants étaient exposés. Différentes AOIs ont été définies de façon à inclure les principaux éléments d'intérêt (i.e., l'œil gauche, l'œil droit, le nez, les narines et la bouche). Pour chaque AOI, trois types de mesures étaient calculés : le changement de temps d'exploration de l'AOI, le changement de pourcentage d'enfants regardant l'AOI, et le changement de pourcentage de temps de regard de l'AOI. Les valeurs moyennes des trois types de mesures sont représentées en **figure 36, 37** et **38**. Trois ANOVAs comprenant les variables Contexte Olfactif (contrôle, plaisant, déplaisant) en inter-sujets, et AOIs (œil droit, œil gauche, nez, narines et bouche) et Essais de Test (de 1 à 4) en intra-sujet ont été effectuées.

Pour les ***changements dans le temps de regard sur les différentes AOIs***, le seul effet révélé significatif était celui du Contexte olfactif [$F(2,72)= 4.12$, $p<.05$, $\eta p^2= .10$]. Les tests post-hoc de LSD de Fisher ont indiqué que le temps moyen passé par les enfants dans les AOIs augmentait plus chez les enfants en contexte olfactif plaisant par rapport aux enfants des groupes exposés aux contextes olfactifs contrôle et déplaisant ($p= .0213$ et $p= .0113$, respectivement), sans différence significative entre ces deux derniers contextes. Ces résultats confirment donc les résultats des analyses précédentes et indiquent une augmentation globale/aspécifique du temps de regard sur l'ensemble des éléments du visage, de façon relativement uniforme, chez les enfants exposés à l'odeur plaisante/fraise.

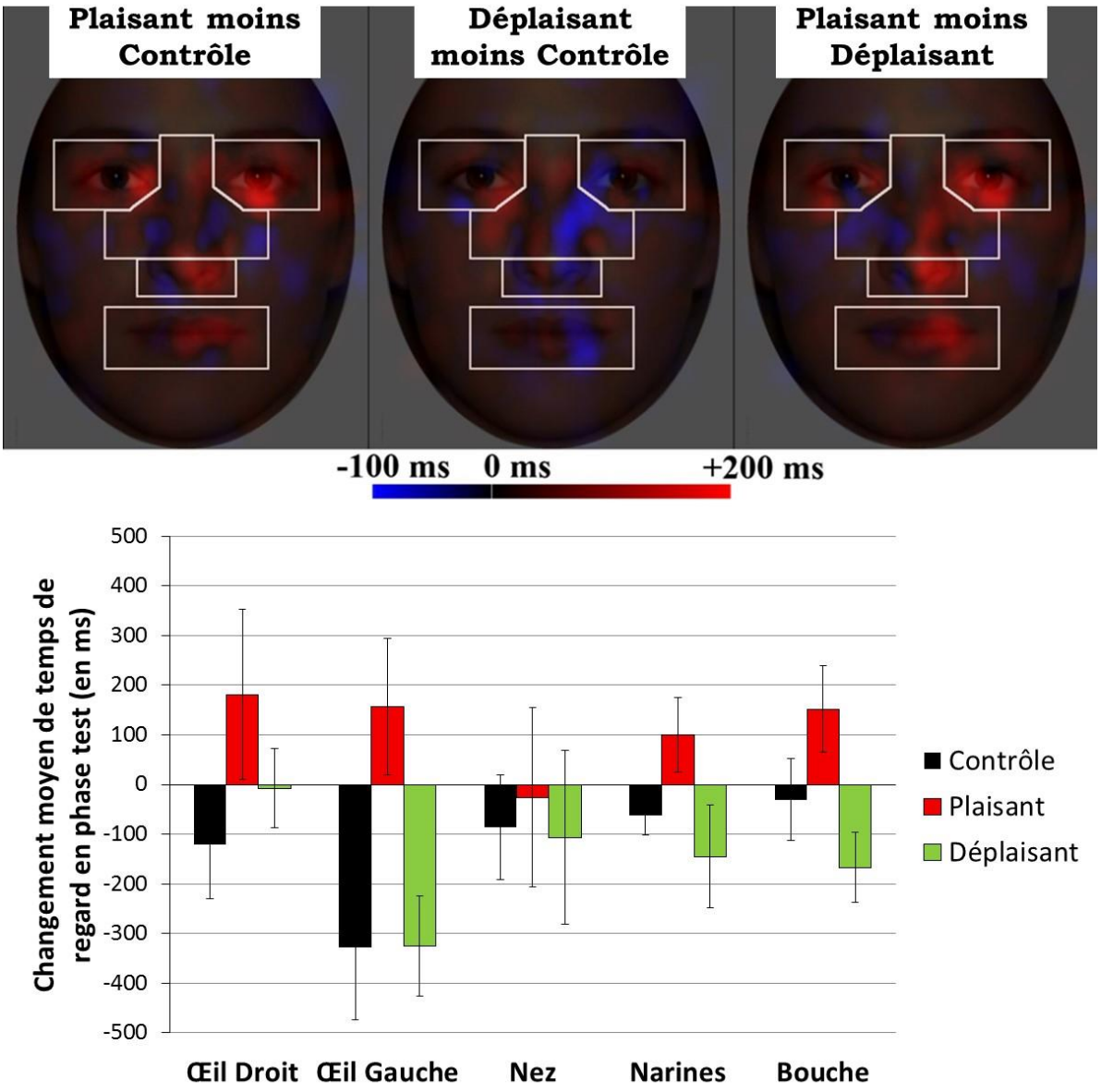


Figure 36 : Changement moyen de temps de regard en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon les AOIs et le contexte olfactif (en ms ; les barres d'erreurs représentent les erreurs standards).

Pour les ***changements dans le pourcentage d'enfants regardant les différentes AOIs***, l'effet du Contexte Olfactif était là aussi significatif [$F(2,72)= 6.11$, $p<.01$, $\eta p^2= .15$]. Les tests post-hoc de LSD de Fischer ont indiqué que le pourcentage d'enfants regardant les différentes AOIs augmentait plus chez le groupe d'enfants exposés au contexte plaisant (9.8 % en moyenne) en comparaison avec les groupes exposés aux contextes contrôle et déplaisant (-1.4% et -8.3%, $p= .0352$ et $p= .0009$, respectivement). Toutefois, l'interaction entre le Contexte olfactif et l'AOI était ici significative [$F(8,288)= 3.67$, $\varepsilon= .91$, $p<.001$, $\eta p^2= .09$]. Cet effet de l'AOI n'était significatif que pour le groupe exposé au contexte olfactif déplaisant [$F(4,288)= 6.50$, $p<.0001$; $F<1$ et $F(4,288)= 1.20$ pour les groupes exposés à l'odeur de fraise et à l'odeur contrôle, respectivement]. Pour le groupe exposé au contexte olfactif déplaisant, la libération de l'odeur a provoqué une diminution dans le pourcentage d'enfants venant fixer l'œil gauche et la bouche (-27,7% et -17.7%, respectivement, en comparaison avec les derniers essais de familiarisation), qui différait significativement de l'augmentation du pourcentage d'enfants regardant l'œil droit (10.3%) et le nez (2.3% ; les 2 *ps*<.05 en test post-hoc LSD de Fischer). Pour l'AOI de l'œil gauche et celle de la bouche, le groupe d'enfant en condition contrôle était à un niveau intermédiaire entre les deux autres groupes (+0.0% pour l'œil gauche et -3.0% pour la bouche), qui différait significativement du groupe en condition olfactive déplaisante pour l'œil gauche ($p= .0027$) et du groupe en condition olfactive plaisante sur la bouche ($p= .0187$). Les analyses complémentaires en test T de Student, effectuées pour tester si le pourcentage d'enfants changeait significativement de la valeur de référence (i.e ., zéro), ont montré que le pourcentage d'enfants regardant l'œil gauche et la bouche augmentait significativement en condition fraise (augmentation de 13.7% et 9.0% ; $T(24)= 2.57$, $p<.05$ et $T(24)= 2.49$, $p<.05$, respectivement). A l'inverse, le pourcentage d'enfants explorant ces AOIs diminuait significativement pour le groupe en condition olfactive déplaisante (diminution de -27.7% et -17.7% ; $T(24)= -3.77$, $p<.001$ et $T(24) = -2.71$, $p<.05$, respectivement). Aucun changement significatif n'était observé chez les enfants du groupe en condition contrôle.

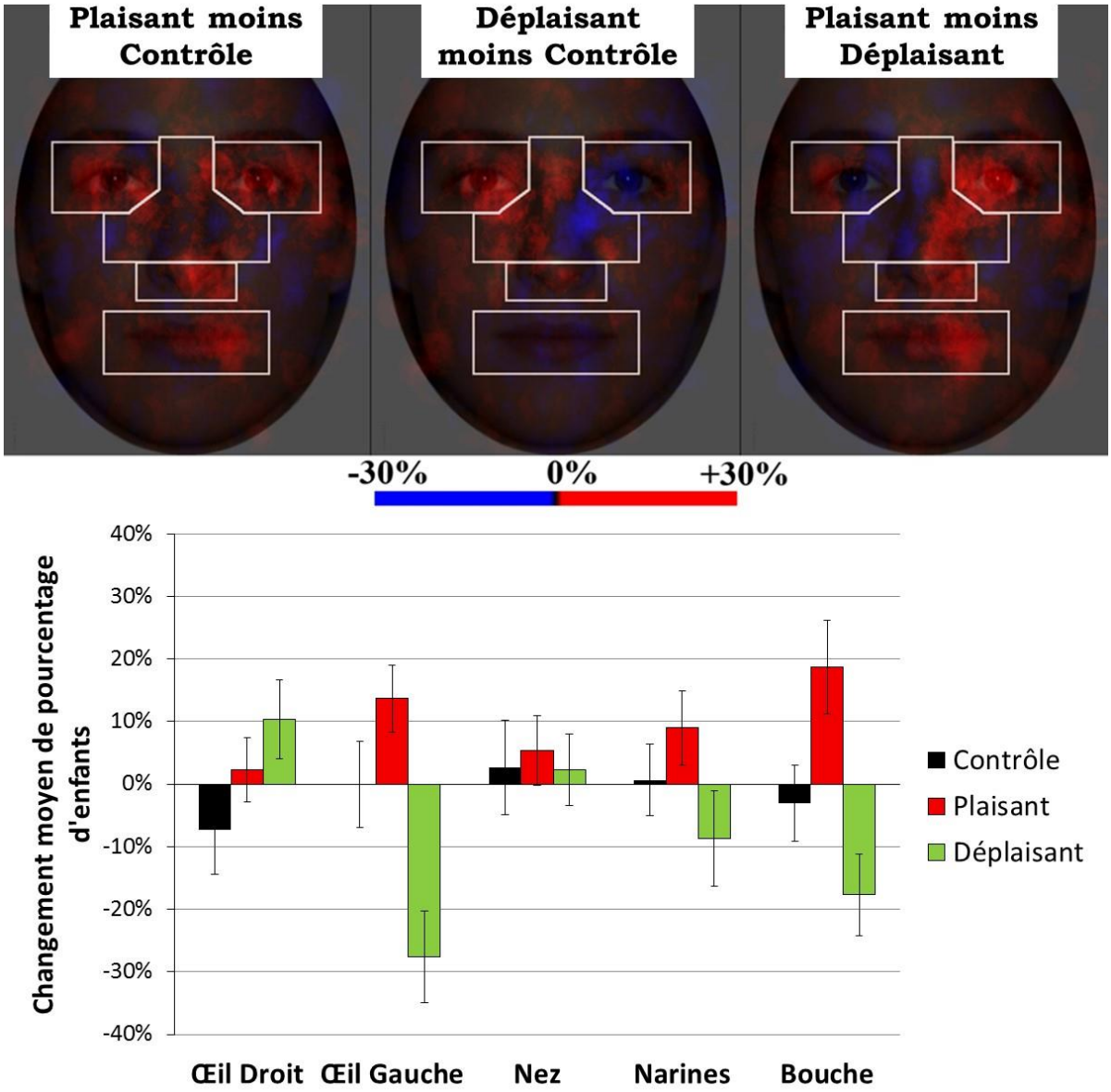


Figure 37 : Changement moyen de pourcentage d'enfants regardant les différentes AOIs en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisations, selon l'AOI et le contexte olfactif (en % ; les barres d'erreurs représentent les erreurs standards).

Pour le ***changement dans le pourcentage de temps de regard sur les différentes AOIs***, l'effet de l'AOI et son interaction avec le Contexte Olfactif étaient tous deux significatifs [$F(4,288)= 2.96$, $\varepsilon= .70$, $p<.05$, $\eta p^2= .04$ et $F(8,288)= 3.78$, $\varepsilon= .70$, $p<.01$, $\eta p^2= .10$, respectivement]. La décomposition de l'interaction a indiqué que l'effet de l'AOI était significatif uniquement pour le groupe exposé à l'odeur déplaisante [$F(4,288)= 8.32$, $p<.0001$; $F(4,288)= 1.30$ et $F<1$ pour les groupes en condition olfactive contrôle et plaisante] avec un changement négatif dans le pourcentage de temps de regard sur l'œil gauche et la bouche (diminution de -10.0% et -4.5%, respectivement), qui différait significativement du

changement positif observé pour l'œil droit et le nez (augmentation de 5.5% et 7.2%, respectivement, tous les *ps*<.01en test post-hoc LSD de Fischer). Les analyses sur l'effet du Contexte Olfactif ont indiqué que celui-ci était significatif seulement pour l'œil gauche [F(2,72)= 4.70, *p*<.05] et la bouche [F(2,72)= 4.08, *p*<.05]. Les tests post-hoc en LSD de Fischer ont indiqué une différence selon le contexte olfactif sur ces 2 éléments faciaux. Pour l'œil gauche, l'exposition au contexte olfactif déplaisant diminuait le pourcentage de temps passé à regarder cette zone, tandis que l'exposition à l'odeur plaisante l'augmentait (-10.0% *versus* +3.9%, *p*<.0001). A l'inverse, pour le nez, l'exposition à l'odeur déplaisante a provoqué une augmentation de ce pourcentage, tandis que l'odeur plaisante a provoqué une diminution de celui-ci (+7.2% versus -2.5%, respectivement ; *p*= .0033). Le groupe d'enfants en contrôle était quant à lui à un niveau intermédiaire (-3.9% pour l'œil gauche et +3.5% pour le nez) et différait seulement vis-à-vis du groupe d'enfants en condition olfactive plaisante pour l'œil gauche (*p*= .0167). Les analyses complémentaires effectuées au moyens du T de Student, pour tester si le pourcentage de temps de regard augmentait/diminuait par rapport à la référence (i.e., zéro), ont indiqué que des changements significatifs n'avaient lieu que pour le groupe exposé à l'odeur déplaisante : le pourcentage de temps passé à la fois sur l'œil droit et le nez augmentait significativement (5.5% et 7.2% ; T(24)= 2.33, *p*< 05 et T(24)= 3.10, *p*<.01, respectivement), tandis que celui-ci diminuait significativement pour l'œil gauche et la bouche (-10.0% et -4.5% ; T(24)= -2.77, *p*<.05 et T(24)= -2.24, *p*<.05, respectivement).

En résumé, les analyses effectuées sur l'exploration des différents éléments faciaux ont révélé qu'en réaction à l'introduction de l'odeur plaisante/fraise les enfants ont globalement augmenté leur temps de regard sur la plupart des éléments faciaux, si ce n'est tous. Un pattern différent a eu lieu pour les enfants du groupe exposé à l'odeur déplaisante : en réaction à l'odeur, ces derniers se sont plus focalisés sur certains éléments faciaux (le nez et l'œil droit) et ont moins exploré d'autres éléments (la bouche et l'œil gauche), avec un temps de regard global demeurant inchangé en comparaison avec le groupe contrôle.

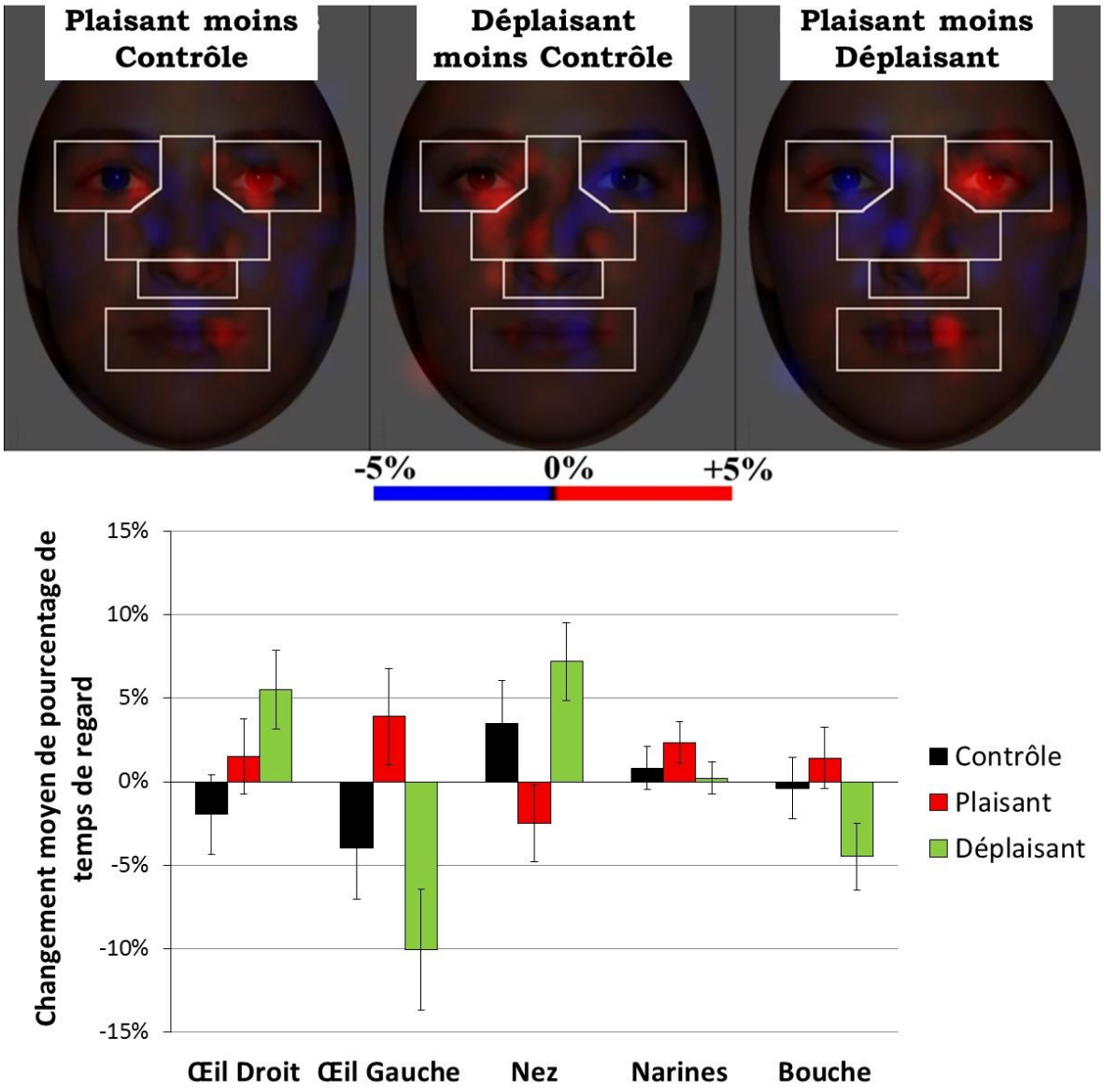


Figure 38 : Changement moyen de pourcentage de temps de regard sur les AOIs en phase test en comparaison avec les trois derniers essais de familiarisation, selon l'AOI et le contexte olfactif (en % ; les barres d'erreurs représentent les erreurs standards).

7.4. DISCUSSION

Par le recours à la technique de la poursuite des mouvements oculaires, cette étude avait pour objectif de déterminer si, en réaction aux odeurs, les enfants de 7 mois cherchaient une réaction faciale spécifique, sur le visage qui leur était présenté, en lien avec la valence de l'odeur à laquelle ils étaient exposés. Les résultats obtenus confirment en partie les prédictions que nous avions formulées. Nous avons observé qu'en accord avec nos

prédictions, les enfants ont significativement plus exploré les régions faciales connues pour contenir les AUs spécifiques/distinctives du dégoût en réaction à l'exposition à l'odeur déplaisante (i.e., acide butyrique). Pour le groupe d'enfants exposés à l'odeur plaisante, nous avons pu observer que les enfants ont augmenté leur temps d'exploration du visage par rapport à la phase de familiarisation, indiquant ainsi qu'il y a bien eu réaction de l'enfant à l'introduction de l'odeur. Toutefois, l'analyse détaillée de leur pattern d'exploration des différents éléments faciaux a révélé que cette augmentation du temps de regard était globale, et se distribuait de façon aspécifique sur l'ensemble du visage.

En raison de cette disparité dans les résultats entre les deux conditions olfactives nous les considérerons de façon distincte au cours de cette discussion. Les résultats obtenus pour le contexte olfactif déplaisant seront abordés en premier lieu, puis nous discuterons des interprétations permettant de rendre compte des divergences dans les résultats entre les deux contextes olfactifs.

7.4.1. Effets de l'exposition au contexte olfactif déplaisant sur les stratégies d'exploration du visage

Dans un premier temps, les analyses effectuées sur le groupe d'enfants exposés à l'odeur déplaisante (i.e., acide butyrique) ont montré que, suite à l'introduction d'un contexte olfactif de valence négative, les enfants modifiaient leur pattern d'exploration des visages. En comparaison avec la phase de familiarisation, une augmentation de l'exploration de la zone du nez et de l'œil droit accompagnée d'une diminution de l'intérêt porté sur l'œil gauche et la bouche, a pu être constatée ; ce résultat se retrouvant à la fois sur la proportion d'enfants venant explorer les différentes zones et sur la proportion de temps passé à regarder les différents éléments faciaux. Il semble donc qu'en réaction à l'odeur, le poids relatif des différents éléments faciaux dans l'exploration visuelle du visage se soit modifié pour donner lieu à une focalisation sur les éléments distinctifs. De plus, les régions sur lesquelles s'est faite cette focalisation, et tout particulièrement le nez, sont connues pour supporter les AUs spécifiques de l'expression de dégoût (notamment l'AU 9 : le froncement du nez, qui est la plus caractéristique ; Ekman & Friesen, 1978), et pour correspondre aux régions où les variations spécifiques au dégoût par rapport aux autres expressions sont les plus fortes (e.g., Smith et al., 2005). En outre, nous avons montré au cours de la première expérience présentée dans cette thèse, que cette région était spécifiquement plus explorée par les enfants de 7 mois

lorsque le visage exprimait le dégoût par rapport aux autres expressions faciales. Au vu de ces éléments, il semble donc qu'en réaction à l'apparition de l'odeur déplaisante dans le contexte, les enfants ont modulé leur exploration des visages pour se focaliser sur les régions « porteuses » de l'expression de dégoût. De plus, les enfants ont adapté leur pattern exploratoire en l'absence de variation d'expression sur le visage, indiquant ainsi que, conformément à nos prédictions, les enfants manifestent bien une attente et une recherche quant à l'expression que le visage/autrui devrait exprimer en réaction à l'odeur introduite.

Dans la littérature antérieure sur le traitement du langage et des sons langagiers, il est rapporté la présence d'une aptitude précoce du nourrisson à traiter et intégrer les informations multi-sensorielles liées aux visages (Blass & Camp, 2001 ; Brookes et al., 2001 ; Patterson & Werker, 2003 ; Rosenblum, Schmuckler & Jonson, 1997). Similairement, différentes études sur le traitement audio-visuel des expressions faciales démontrent que les jeunes enfants (i.e., 4-7 mois) sont capables de mettre en correspondance l'émotion entendue avec l'expression faciale qui lui est liée (Vaillant-Molina, et al., 2013 ; Walker, 1982 ; Walker-Andrews, 1986, 1988, 1997). Ainsi, les résultats de cette étude corroborent la littérature antérieure sur le traitement multi-sensoriel chez le nourrisson, et plus particulièrement celle sur la multi-sensorialité dans le traitement des expressions faciales, en les étendant au niveau des interactions olfacto-visuelles. Nos résultats viennent notamment corroborer ceux de Godard et collaborateurs (sous presse) sur les influences du contexte olfactif sur le traitement des expressions faciales chez les jeunes enfants, et leur hypothèse concernant la présence d'une réaction d'attente et de recherche d'expression spécifique déclenchée par le contexte olfactif chez les enfants de 7 mois. Au cours de l'expérience, les enfants n'ont pas simplement effectué une mise en correspondance directe entre l'information du contexte multi-sensoriel et l'expression faciale, comme rapporté dans les études antérieures, ils ont anticipé la réaction faciale en lien avec la valence de l'odeur et sont venus spécifiquement la rechercher sur des régions faciales distinctives.

D'un point de vue développemental, il est supposé que de façon précoce les jeunes enfants seraient capables de percevoir et d'intégrer les événements/objets de façon multi-sensorielle en des percepts et représentations unifiés (e.g., Flom & Barhick , 2007). Dans notre cas il apparaît qu'au travers de leurs expériences (i.e., leurs propres réactions faciales aux odeurs et/ou celles de leur entourage), les enfants ont intégré au sein de représentations multi-sensorielles le lien unifiant émotion exprimée facialement et valence hédonique des odeurs (e.g., odeur déplaisante et expression faciale de dégoût). Il apparaît également qu'à 7

mois ce lien est suffisamment bien intégré pour que l'odeur, et plus précisément sa valence, déclenche une réactivation de la représentation de l'expression qui lui est liée et, ainsi, une attente et une recherche spécifique des éléments (AUs) distinctifs qui sont intégrés au sein de cette représentation de l'expression.

Dans l'hypothèse de la redondance inter-sensorielle, il est avancé qu'il y aurait un effet super-additif dans la multi-sensorialité et qu'ainsi les événements/objets multi-sensoriels seraient perceptivement plus saillants et mieux encodés chez les jeunes enfants par rapport aux événements/objets perçus au travers d'une seule modalité sensorielle (Bahrick & Lickliter, 2002 ; Jouen & Molina, 2000 ; Lewkowicz et al., 2010 ; Robinson & Sloutsky, 2010). Il est également supposé que les informations amodales, tels que les affects, seraient d'abord perçues de façon multimodale avant de pouvoir être perçues efficacement de façon unimodale (Bahrick, 1994 ; Flom & Bahrick, 2007). Concernant le traitement des expressions faciales, différentes études ont pu corroborer cette hypothèse en démontrant que les nourrissons discriminent plus tôt et plus facilement les expressions lorsqu'elles sont présentées de façon bimodale (i.e., voie + visage) plutôt qu'unimodale (Caron et al., 1988 ; Flom & Bahrick, 2007 ; Walker-Andrews & Lennon, 1991). Dans notre cas, la capacité de l'enfant de 7 mois à se focaliser sur les éléments distinctifs de l'expression et faisant l'objet d'une redondance inter-sensorielle pourrait constituer un tremplin développemental pour l'acquisition progressive d'une expertise dans le traitement des expressions faciales, mais aussi, et surtout, pour la réalisation et la mise en place d'apprentissages sur les expressions faciales et leur signification sur la base des liens amodaux liant les expressions au contexte multi-sensoriel (ici olfactif) dans lequel elles apparaissent.

En outre, dans leurs travaux sur le traitement audiovisuel du langage chez les enfants de 4 à 12 mois, Lewkowicz et Hansen-Tift (2012) ont observé qu'à 8 mois les enfants engageaient leur attention sur la bouche lorsqu'ils étaient exposés à un visage leur parlant, et ce quelle que soit la langue parlée ; tandis qu'à 12 mois cette focalisation sur la bouche disparaissait pour les visages parlant la langue natale de l'enfant pour laisser place à une exploration préférentielle de la région des yeux. Selon les auteurs, l'allocation attentionnelle sur la région de la bouche permettrait à l'enfant de 8 mois d'accéder à la zone de redondance inter-sensorielle (i.e., synchronie entre les mouvements de la bouche et les variations acoustiques) ce qui en retour aiderait à l'acquisition d'une expertise dans le traitement langagier. A 12 mois, avec le développement de leur expertise dans le traitement de leur langue, les enfants auraient moins besoin de se reposer sur la zone de redondance inter-

sensorielle dans leur traitement audio-visuel du langage. Dans notre étude, nous n'avons pas simplement constaté une focalisation sur la zone de redondance olfacto-visuelle (i.e., le nez), nous avons observé une plus forte allocation de l'attention sur cette zone en l'absence d'élément de redondance physiquement présent sur le visage. Ainsi, les résultats observés dans notre étude sur les enfants de 7 mois pourraient signer une étape intermédiaire dans le développement d'une expertise dans le traitement des expressions, dans lequel l'olfaction semble elle aussi jouer un rôle important. Ici, la redondance inter-sensorielle entre odeur et réaction faciale (i.e., odeur déplaisante et froncement du nez) semble avoir été suffisamment bien intégrée pour que les enfants soient capables de rechercher spécifiquement les éléments faciaux coïncidant généralement avec l'apparition d'une odeur de valence négative ; et ce malgré leur absence. Il serait intéressant que de futures études approfondissent ces effets du développement de l'expertise de traitement en déterminant à différents âges (i.e., entre 3 et 7 mois) quelles sont les influences du contexte olfactif sur les patterns d'exploration visuelle des visages expressifs et non-expressifs. Cela permettrait notamment de déterminer à quel âge les nourrissons commencent à s'engager sur les régions faciales sur lesquelles se situe la redondance olfacto-visuelle, mais aussi à partir de quel âge l'expertise de traitement olfacto-visuel des expressions est suffisamment développée pour que les enfants n'aient plus besoin que les AUs distinctives soient présentes pour s'engager sur les régions du visage au niveau desquelles elles apparaissent.

7.4.2. Comment interpréter les différences observées entre les deux contextes olfactifs étudiés ?

Contrairement à l'odeur déplaisante, l'exposition des enfants de 7 mois à une odeur plaisante (i.e., fraise), n'a pas déclenché de modification spécifique dans les stratégies d'exploration des visages inexpressifs. En effet, en opposition avec nos prédictions, suite à l'introduction du contexte olfactif plaisant, les jeunes enfants n'ont pas spécifiquement plus regardé la région de la bouche sur le visage auquel ils étaient exposés. Au contraire, ils ont globalement augmenté leur temps d'exploration sur la plupart (si ce n'est toutes) les régions faciales de façon aspécifique. Différentes pistes interprétatives peuvent rendre compte non seulement des interactions olfacto-visuelles observées en contexte déplaisant et des disparités entre les deux contextes olfactifs, mais aussi et surtout, de l'aspécificité de l'exploration en condition d'exposition à l'odeur plaisante. Nous tâcherons ici de présenter ces différentes

interprétations et de les confronter aux éléments de la littérature en vue de déterminer laquelle semble être la plus à même d'expliquer les résultats observés.

L'une des premières interprétations possible, serait que, contrairement au dégoût, les enfants de 7 mois n'aient pas un pattern d'exploration visuelle différencié pour l'expression de joie. Ainsi, l'exposition à l'odeur de fraise ne déclencherait pas une exploration spécifique des éléments distinctifs de l'expression, étant donné qu'à cet âge l'exploration de l'expression congruente du point de vue de sa valence (i.e., la joie) n'implique pas une focalisation sur ces éléments. Les résultats décrits par Baudouin et collaborateur (2012) chez les enfants de 8 mois, ainsi que ceux de notre première expérience sur les enfants de 7 mois, viennent directement contredire cette interprétation. En effet, tout comme Baudouin et collaborateur sur les enfants de 8 mois, nous avons pu observer que les jeunes enfants de 7 mois venaient spécifiquement plus focaliser leur attention sur la région de la bouche lorsqu'ils étaient exposés à un visage de joie par rapport aux autres expressions. De plus, la région de la bouche est connue comme supportant les AUs distinctives de l'expression de joie (notamment l'AU 12 ; Ekman & Friesen, 1978) et comme étant la zone où les variations selon l'expression sont maximales pour cette expression (Smith et al., 2005). Enfin, la zone de la bouche est également reconnue comme étant plus explorée lors du traitement visuel de l'expression de joie chez l'adulte (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.**). Ainsi, au vu de ces éléments, il semble fortement improbable que les résultats observés soient liés à une indifférenciation du pattern d'exploration pour les visages de joie chez les enfants de 7 mois. De plus, ces éléments rejettent aussi l'alternative selon laquelle les enfants distribueraient leur attention sur l'ensemble des éléments faciaux pour chercher des éléments distinctifs de la joie autres que le sourire.

Une seconde interprétation serait que contrairement au dégoût et à l'odeur déplaisante, les enfants n'aient pas établi et appris le lien unifiant odeur de valence positive et joie. Bien qu'elle puisse rendre compte des résultats, cette hypothèse est elle aussi hautement improbable. En effet, dès leur premier jour de vie les enfants sont majoritairement exposés aux expressions faciales positives de leur entourage, notamment au cours des six premiers mois, multipliant ainsi les occasions d'expériences et d'apprentissages sur cette expression. A l'inverse, les enfants sont plus rarement exposés aux expressions négatives et ce n'est qu'aux alentours du sixième mois que les parents vont commencer à augmenter leur émission de celles-ci envers leur enfant (Biringen et al., 1995 ; Campos et al., 1992 ; Vaish, Grossmann & Woodward, 2008). Il serait ainsi surprenant que les enfants aient appris le lien unifiant

expressions et valence pour le dégoût et ne l'aient pas appris pour la joie, étant données les plus nombreuses occasions d'apprentissage sur cette dernière. En lien avec ce dernier point, il est rapporté que la capacité de l'enfant à détecter les équivalences intermodales au niveau audio-visuel dans le traitement des expressions est d'abord présente pour la joie, (i.e., dès 4 mois) avant d'être observée pour d'autres expressions (colère, dégoût, neutralité et tristesse, à partir de 5-7 mois) (Vaillant-Molina et al., 2013 ; Walker, 1982 ; Walker-Andrews, 1986, 1988, 1997). De plus, dans leurs travaux, Godard et collaborateurs (sous presse) ont montré que dès 3 mois les enfants sont capables de mettre en correspondance expression faciale et odeur sur la base de leur valence affective, et ce notamment pour l'expression de joie et l'odeur plaisante.

Au sein de la littérature, de nombreux modèles, et tout particulièrement ceux issus des théories de l'*embodied cognition*, font l'hypothèse que le feedback et l'efférence faciale font partie intégrante du processus de traitement des émotions et des expressions faciales (pour plus de détails voir **Chapitre 1 section 1.3.2.**). Cette importance des réactions faciales spontanées a notamment pu être démontrée au moyen d'études rapportant l'existence d'une corrélation positive entre score d'empathie et réactions faciales spontanées (Chartrand & Bragh, 1999). Mais aussi, par le biais d'études montrant un effet d'interférence du blocage du mimétisme facial sur la perception et la reconnaissance des expressions (Niedenthal 2007 ; Niedenthal et al., 2001 ; Oberman et al., 2007 ; Ponari et al., 2012). Ainsi, si l'on suit ces courants théoriques, le traitement d'une expression est facilité lorsque des réactions faciales congruentes (i.e., impliquant les mêmes AUs) sont produites. De même, de nombreux auteurs, tel Bower (1981), font l'hypothèse d'un avantage dans le traitement des stimuli dont l'émotion correspond à l'état émotionnel de l'individu (pour plus de détails voir **Chapitre 2 section 2.4.**). Les odeurs sont connues pour leur potentiel à déclencher et moduler les états affectifs (Aloui-Ismaïli et al., 1997 ; Herz, 2002 ; Schaal, 1988 ; Zucco et al., 2009), mais aussi, à déclencher des réactions faciales distinctes selon leur valence hédonique (Aloui-Ismaïli et al., 1997 ; de Groot et al., 2012) , et ce dès le premier jour de vie (Soussignan et al., 1997 ; Steiner, 1979). Ainsi, en accord avec ces différents éléments, il semble possible que les différences observées entre les deux contextes olfactifs puissent être liées à des différences dans les réactions faciales et/ou émotionnelles des enfants aux odeurs : l'odeur déplaisante déclencherait une réaction faciale et/ou émotionnelle aversive (i.e., dégoût) venant faciliter le traitement subséquent de cette expression (et des AUs impliquées), et la focalisation sur les éléments faciaux la supportant. L'odeur plaisante pourrait quant à elle ne pas avoir déclenché

de réaction faciale/émotionnelle spécifique, et, par conséquent, n'aurait pas engendré une focalisation sur des éléments faciaux distinctifs. Toutefois, il a pu être démontré de façon répétée, à la fois chez le nourrisson et l'enfant, que ces deux odeurs étaient clairement discriminées sur la base de leur valeur hédonique (e.g., Mondcrieff, 1966 ; Schaal et al., 1997 ; Schmidt & Beauchamp, 1989 ; Soussignan et al., 1997 ; Wada et al., 2012 ; Wagner et al., 2013) et qu'elles déclenchaient des réactions faciales et affectives distinctes (Schaal et al., 1997 ; Soussignan et al., 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996). Ces derniers éléments contredisent donc l'hypothèse selon laquelle les résultats observés seraient liés à une absence de spécificité des réactions faciales et émotionnelles aux odeurs positives.

Un autre facteur se présentant comme candidat potentiel dans l'interprétation des différences observées est celui de l'expérience. En effet, nous avons pu constater au travers de diverses questions posées aux parents en fin de session, qu'au 7éme mois il n'est pas rare que les enfants aient déjà eu des expériences avec l'arôme de fraise. En effet, 62,1% des parents interrogés ont déclaré que leur enfant avait déjà ingéré du Doliprane bébé (ayant un arôme de fraise), des yogourts ou petits suisses à la fraise, ou des compotes comportant de la fraise. A l'inverse, il était plus rare (18,9%) que cela soit le cas pour des arômes proches de l'acide butyrique (i.e., le fromage). Ces expériences avec l'arôme de fraise pourraient avoir été l'occasion d'apprentissages spécifiques, étant donné qu'elles correspondent à des situations (e.g., repas, administrer un médicament, soins, …) dans lesquelles des interactions riches et privilégiées avec le parent sont présentes (Black & Aboud, 2011 ; Engle, Bertley & Pelto, 2000 ; Stevenson et al., 1990). De plus, au cours de ces interactions les expressions et actions du parent vont aller au-delà de la seule expression de joie. Ainsi, il est concevable qu'à 7 mois, aux travers de leurs expériences, les enfants aient associé l'odeur/arôme de fraise à des actions faciales variées impliquant différentes régions distribuées sur le visage. Toujours en lien avec l'expérience, il est possible que les enfants aient développé une meilleure expertise dans le traitement multi-sensoriel de l'expression de joie du fait qu'ils soient plus fréquemment exposés à celle-ci par rapport aux expressions négatives, notamment au cours des 6 premiers mois (Biringen et al., 1995 ; Campos et al., 1992 ; Vaish et al., 2008). Dans les travaux sur le traitement audio-visuel du langage de Lewkowicz et Hansen-Tift (2012) que nous avons précédemment évoqués, les auteurs rapportent qu'une fois suffisamment experts dans le traitement langagier, les enfants ne se focalisent plus spécifiquement sur la zone de redondance inter-sensorielle. Il est donc concevable, du fait de leur plus forte fréquence d'exposition aux expressions positives, que les enfants développent plus rapidement une

expertise dans le traitement multi-sensoriel de celles-ci (comme démontré par Walker-Andrews, 1986, 1988, 1997). Cela modifierait en retour les stratégies d'exploration déployées. Bien que ces deux interprétations basées sur les effets de l'expérience et de l'acquisition d'une expertise semblent pertinentes pour rendre compte des différences dans les patterns d'exploration entre les deux conditions olfactives, elles ne permettent pas d'expliquer l'augmentation globale du temps d'exploration du visage observée lorsque l'odeur plaisante est introduite.

Une interprétation pouvant, quant à elle, rendre compte de l'ensemble des résultats obtenus est que nous soyons en présence d'un phénomène de référenciation sociale. En effet, comme souligné dans l'introduction de cette thèse (**Chapitre 1 section 1.2.2.**) c'est à l'approche du 7éme mois que les enfants peuvent avoir recours à la référenciation sociale, et donc se reposer sur l'adulte et son expression pour lever l'ambiguïté d'une situation. Il est également rapporté qu'en cas d'absence d'expression, les jeunes enfants maintiennent leur attention plus longuement et avec plus d'insistance sur le visage de l'adulte, puisqu'aucune clé permettant une levée de l'ambiguïté ne leur est fournie (e.g., Strianot & Rochat, 2000 ; Striano & Vaish, 2006). A la lueur de ces éléments, il semble que l'introduction de l'odeur plaisante ait créé une situation ambiguë, déclenchant alors une réaction d'orientation vers le visage en vue de trouver des clés expressives. Dans notre cas, les visages étaient inexpressifs, ainsi l'augmentation globale du temps de regard sur l'ensemble du visage pourrait s'expliquer par un maintien de l'attention sur le visage en raison d'une recherche active et aspécifique de clés expressives. Cette dernière se répartirait sur l'ensemble des régions supportant les éléments distinctifs des différentes expressions. Au contraire, le contexte olfactif aversif n'aurait pas été perçu comme ambigu, et n'aurait donc pas déclenché cette recherche active d'une expression (quelle qu'elle soit). Les enfants semblent ici avoir simplement recherché si l'expression attendue sur la base du contexte olfactif (i.e., le dégoût) était présente/absente, en se focalisant spécifiquement sur la région faciale porteuse des éléments distinctifs de cette expression (i.e., le nez). Différents facteurs peuvent expliquer la plus forte ambiguïté de l'odeur plaisante par rapport à l'odeur déplaisante. Dans un premier temps, elle pourrait être liée au fait que, comme mentionné précédemment, il n'est pas rare que les enfants de 7 mois l'aient déjà expérimentée. Ainsi, les enfants pourraient avoir lié l'odeur plaisante à des situations et objets particuliers, non-présents dans la situation expérimentale, et rendant donc l'odeur ambiguë du fait de leur absence. A l'inverse, pour l'odeur de l'acide butyrique, les enfants se seraient simplement reposés sur les qualités hédoniques intrinsèques de l'odeur. De

plus, cette odeur possède une forte aptitude à déclencher des réactions faciales/affectives aversives (Schaal et al., 1997 ; Soussignan et al., 1997 ; Soussignan & Schaal, 1996 ; Wagner et al., 2013). Cette différence dans l'ambiguïté suscitée entre les deux contextes olfactifs pourrait avoir été d'autant plus renforcée par le fait qu'à 7 mois le biais de négativité est depuis peu instauré, et qu'il y a par conséquent mise en priorité des informations/stimuli négatifs par rapport aux positifs (Vaish, et al., 2008)[10].

Dans leur étude Godard et collaborateurs (sous presse) ont observé une capacité du nourrisson de 3 mois à mettre en correspondance expression faciale et odeur sur la base de leur valence affective. Dans la présente étude, les résultats récoltés montrent une aptitude des jeunes enfants de 7 mois à percevoir et intégrer le lien unifiant expressions faciales et valence hédonique des odeurs. Est également observée une capacité des enfants de cet âge à utiliser les représentations multimodales intégrées pour anticiper quelle réaction faciale devrait être exprimée sur la base de l'odeur à laquelle ils sont exposés. De plus, l'anticipation de l'expression déclenchait une recherche de celle-ci et donc une orientation spécifique de l'attention vers les régions faciales porteuses des éléments distinctifs, et ce en dépit de leur absence. En lien avec les résultats de Godard et collaborateur, il semble donc, en comparaison avec les nourrissons de 3 mois, qu'à 7 mois les représentations multi-sensorielles entre odeur et expressions se soient enrichies et renforcées, et que l'habileté de l'enfant à se reposer sur celles-ci ce soit développée, permettant ainsi à l'enfant de les utiliser comme base d'anticipation. Enfin, les disparités dans les résultats observés entre les deux contextes olfactifs, notamment concernant l'odeur plaisante (i.e., fraise), semblent être liées à une question d'ambiguïté suscitée par l'odeur. Il serait intéressant que de futures études investiguent cette question en tachant de déterminer si, comme supposé, l'ambiguïté de l'odeur/situation déclenche une référenciation sociale et une recherche d'expression faciale aspécifique ; et si, à l'inverse, lorsque l'odeur ne suscite pas d'ambiguïté celle-ci déclenche une recherche d'expression spécifique sur la base de sa valeur hédonique.

[10] Un autre facteur pouvant également contribuer à la moindre ambiguïté de l'acide butyrique est qu'à 7 mois l'enfant est en pleine période de diversification alimentaire. Période à laquelle l'enfant exprime une certaine aversion à certain aliments (notamment au goûts acide, amer et soufré) et à leurs odeurs, parmi lesquels figure l'acide butyrique (Wagner et al., 2013 ; 2014).

Chapitre 8 :
Discussion Générale

Au cours de cette thèse, nous nous sommes donnés un double objectif. Dans un premier temps, nous avons tenté de lever certaines ambiguïtés relatives à l'ontogenèse des capacités de traitement des expressions faciales chez l'enfant au cours de la première année de vie. Plus spécifiquement, nous avons étudié le développement des stratégies visuelles d'exploration des émotions, ainsi que les réactions faciales aux expressions, à différents âges clés du développement socio-émotionnel chez le jeune enfant. De plus, afin de préciser la nature et le décours temporel de la distinction des expressions observables à 3 mois, nous avons étudié les réponses cérébrales aux expressions chez les nourrissons de cet âge. Notre second objectif était d'apporter de plus amples éléments permettant de préciser les interactions entre olfaction et vision dans le traitement des émotions exprimées facialement. Pour cela, nous avons en premier lieu étudié la nature et le décours temporel des interactions olfacto-visuelles dans le traitement des visages expressifs chez l'adulte, puis nous nous sommes efforcés de déterminer si, similairement à l'adulte, une modulation des réponses cérébrales aux visages était observée lors de l'exposition à une odeur chez les nourrissons de 3 mois. Enfin, nous avons étudié si comme spéculé par Godard et collaborateurs (sous presse), les enfants de 7 mois manifestent bien une recherche d'expression faciale spécifique sur la base de l'odeur à laquelle ils sont exposés.

Au cours de cette discussion générale, nous présenterons et discuterons les résultats issus des différentes expériences présentées dans ce manuscrit en deux temps. Seront d'abord évoqués les éléments de réponse apportés sur l'ontogenèse des capacités de traitement des expressions faciales. Suite à cela, nous nous intéresserons aux résultats issus des études sur l'influence des interactions olfacto-visuelles et à leurs implications sur la façon dont les capacités de traitement des expressions se mettraient en place et se perfectionneraient au cours de la première année.

8.1. LE DEVELOPPEMENT DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS FACIALES CHEZ LES ENFANTS DE 3 A 12 MOIS

Dans la littérature sur le développement socio-émotionnel de l'enfant au cours de la première année, et plus précisément sur le développement des capacités de traitement des

expressions faciales, trois âge clés se dessinent : (1) à 3 mois, il a pu être solidement démontré que les enfants sont capables de discriminer les visages de joie vis-à-vis des visages dits « renfrognés » ; (2) aux alentours du 7ème mois, les capacités de discrimination des expressions s'étendent aux expressions négatives (puisqu'ils peuvent les discriminer entre elles), sont aussi observées les premières preuves de perception catégorielle des expressions et débute également la référenciation sociale ; (3) à la fin de la première année de vie, les enfants reconnaissent les différentes expressions faciales de base et sont capables d'adapter leurs comportements en accord avec la signification du signal communiqué par l'expression.

Au cours de notre première expérience (Expérience 1), l'étude des stratégies d'exploration visuelle des expressions, par la récolte des mouvements oculaires, nous a permis d'observer que chez les nourrissons de 3 mois, l'exploration des expressions n'intégrait pas une focalisation sur les éléments distinctifs des émotions. Leur pattern d'exploration demeurait inchangé quelle que soit l'émotion exprimée. L'analyse de leurs réactions faciales aux expressions a quant à elle révélé qu'hormis une certaine sensibilité aux visages de joie (i.e., plus de sourires aux visages de joie), les réactions faciales des nourrissons de 3 mois ne se distinguaient pas selon le signal émotionnel véhiculé par l'expression regardée.

Parallèlement, au cours de notre étude en EEG sur les enfants du même âge (Expérience 2), nous avons pu voir que, conformément à la littérature antérieure et à nos résultats sur les réactions faciales aux expressions, une distinction dans les réponses cérébrales aux expressions était présente, notamment entre les visages de joie et les visages renfrognés (i.e., le dégoût). Ces différences ont été observées au niveau de composantes reflétant spécifiquement le traitement du visage et de sa structure (i.e., N290 et P400). Toutefois, nous avons également constaté que les différences observées au niveau de la composante la plus précoce et reflétant l'intégration des informations de bas niveau (i.e., P100) contribuaient aux différences observées au niveau des composantes plus tardives. Dans la littérature en EEG sur le traitement des expressions faciales chez les enfants plus âgés (i.e., 4 mois et 7 mois), il est décrit la présence d'un effet de l'expression uniquement sur les composantes de traitement du visage (i.e., N290 et P400), ainsi que sur la composante reflétant l'allocation attentionnelle vers le stimulus (i.e., Nc) (e.g., Hoehl & Striano, 2008 ; Kobiella et al., 2008 ; Leppänen et al., 2007 ; Rigato et al., 2010).

Notre première étude (Expérience 1), nous a également permis d'observer la présence d'une évolution dans les patterns d'exploration et les réactions faciales aux expressions au

cours du développement. Contrairement aux nourrissons de 3 mois, les enfants de 7 et 12 mois modulaient leur pattern d'exploration visuelle selon l'émotion à laquelle ils étaient exposés et se focalisaient sur les éléments distinctifs de l'expression (i.e., la bouche et le bas du nez pour la joie, le nez pour le dégoût, les yeux et les sourcils pour la peur et la colère). Concernant leurs réactions faciales, les résultats ont montré qu'à ces âges les enfants manifestaient des réponses faciales distinctes selon la valence de l'expression arborée par le visage qui leur était présenté. De plus, par l'inspection fine de ces réactions nous avons pu observer qu'elles ne correspondaient pas à une simple imitation de l'acte moteur observé, mais davantage à une imitation de la valence de l'émotion perçue sur le visage d'autrui, indiquant ainsi qu'à ces âges les enfants ont accès à la signification des expressions faciales. Il apparaît donc qu'en comparaison avec les nourrissons de 3 mois, les enfants de 7 et 12 mois manifestent non seulement des stratégies d'exploration impliquant une focalisation spécifique sur les éléments faciaux distinctifs de l'expression, mais également qu'ils perçoivent la valence émotionnelle des expressions. Nous avons pu également constater la présence d'un affinement des capacités de traitement entre 7 et 12 mois, puisque des patterns d'exploration et des réactions faciales plus distincts selon l'émotion ont été observés chez les enfants de 12 mois par rapport à ceux de 7 mois ; ainsi qu'une sensibilité à l'orientation du regard.

Il apparaît donc qu'au cours de la première année il y a présence d'un affinement progressif des capacités de traitement des expressions faciales pouvant se retrouver au niveau des différents paramètres que nous avons considérés ici. En effet, des réactions aux visages expressifs de plus en plus discriminantes peuvent être observées à la fois au niveau cérébral, au niveau des stratégies d'exploration visuelle, ainsi qu'au niveau des réactions faciales/émotionnelles aux expressions. Plus spécifiquement, se dégage de nos résultats la présence de changements significatifs du point de vue du développement socio-émotionnel entre 3 et 12 mois. Les enfants débutent avec un pattern d'exploration visuelle n'intégrant pas les variations des éléments faciaux, des réactions faciales ne semblant pas confirmer une intégration de la signification émotionnelle des expressions, et des réactions cérébrales indiquant une forte contribution des étapes précoces de traitement visuel (i.e., intégration d'informations de bas niveau) dans leur distinction des expressions. Puis, ils parviennent à l'âge d'un an, à un pattern d'exploration visuelle guidé par les actions faciales émotionnellement pertinentes, des réactions faciales se distinguant selon la valence de l'émotion observée et des réactions cérébrales décrites dans la littérature comme se différenciant au niveau des composantes spécifiques du traitement de visage.

Ces observations que nous avons pu faire sur les enfants 3, 7 et 12 mois et pointant la présence d'une évolution dans les capacités de traitement des expressions semblent suivre un schéma similaire à celui décrit dans la littérature sur la discrimination, la catégorisation et l'adaptation des comportements selon le signal émotionnel au cours de la première année, et délimitant ces 3 âges en tant que phases clés du développement socio-émotionnel.

Outre la maturation des réseaux et structures cérébrales au cours de la première année (Chugani & Phelps, 1986 ; Colombo, 2001 ; Matsuzawa et al., 2001 ; Richards, 2001 ; Richards, Reynolds & Courage, 2010), peut notamment être invoquée l'expérience de l'enfant avec les différentes expressions faciales comme facteur participant au développement des capacités de traitement des expressions. En effet, l'accumulation d'expériences avec les visages expressifs pourrait contribuer au perfectionnement des aptitudes de l'enfant par son action à de multiples niveaux. Dans un premier temps, la rencontre répétée des différentes expressions sur le visage d'autrui dans l'environnement pourrait participer à la spécialisation progressive des réseaux et structures cérébrales en charge de leur traitement (e.g., Nelson, 2001). Un second impact des expériences de l'enfant avec les visages expressifs est qu'elles permettraient un affinement progressif des stratégies d'exploration visuelle des expressions ; cela pouvant notamment passer par la création de représentations plus détaillées sur celles-ci. Enfin, c'est au travers de leurs rencontres avec les différentes émotions au quotidien que les enfants pourraient également apprendre leur signification, puisqu'ils pourraient ainsi les lier à des contextes d'apparition spécifiques et par voie de fait leur attribuer une valeur signalétique/émotionnelle spécifique.

La mise en place et l'affinement des stratégies d'exploration que nous avons pu observer pourraient également constituer un contributeur important du développement socio émotionnel, et plus spécifiquement, participer à l'élaboration d'une expertise dans le traitement des expressions faciales. La focalisation sur les éléments distinctifs des expressions pourrait notamment mener à la création de représentations des émotions au sein desquelles serait présente une emphase sur les éléments distinctifs et représentatifs des émotions. En retour, l'élaboration de représentations ayant une accentuation sur les éléments maximisant la distinctivité des différentes expressions pourrait contribuer à la sophistication des capacités de discrimination et de catégorisation des expressions. La focalisation sur les éléments représentatifs pourrait également promouvoir la spécialisation des circuits et réseaux cérébraux en charge du traitement des expressions, et cela, car l'input reçu par ces dernières est axé sur ces zones de distinctivité. Enfin, le recours à ce type de stratégies d'exploration

pourrait aussi aider à l'apprentissage de la signification des expressions, et cela, en facilitant la mise en lien entre les expressions et leur contexte d'apparition. Dans leurs travaux, Lewkowicz et Hansen-Tift (2012) avancent que la focalisation de l'attention sur la zone où il y a redondance entre informations auditives et visuelles (i.e , la bouche) facilite l'apprentissage de la corrélation voix-visage dans l'établissement d'une expertise de traitement du langage. Ainsi, la focalisation sur la zone où il y a cooccurrence entre variations d'expression et variations contextuelles (le contexte étant ici à considérer de façon multi-sensorielle) pourrait favoriser l'extraction et la mise en lien des informations présentes au sein du contexte, dans notre cas olfactif, et qui coïncident avec l'expression.

Chez l'adulte, il est considéré dans la proposition de Martinez et collaborateurs (Martinez & Du, 2012 ; Neth & Martinez, 2009, 2010), que les représentations des expressions faciales seraient regroupées en un *face space* au sein duquel elles seraient intégrées et organisées en un espace multidimensionnel. L'organisation des représentations se ferait autour de différentes dimensions. Les relations de second ordre et les changements de forme des éléments faciaux constitueraient des dimensions fortes de ce « *face space expressif* ». La reconnaissance/classification des expressions se ferait sur la base de la position relative du percept au sein de ce *face space*.

Appliqué à l'enfant, il apparaît logique de supposer que la focalisation sur les éléments distinctifs des expressions puisse participer à l'élaboration du « *face space expressif* » et, par la même occasion, à l'établissement des capacités de traitement des expressions faciales. En effet, l'intégration de représentations possédant une emphase sur les éléments distinctifs des expressions, et donc où les variations selon l'émotion sont les plus fortes, pourrait aider à l'organisation des représentations des expressions au sein du *face space expressif* (i.e., à leur regroupement et à leur dissociation au sein de celui-ci), mais aussi à la création de ses différentes dimensions. Poursuivant sur ce raisonnement, il est envisageable qu'à 3 mois le *face space expressif* n'intègre pas des représentations suffisamment détaillées et organisées en des espaces distincts, hormis pour la joie qui serait quant à elle bien « organisée » étant donné la capacité des nourrissons de cet âge à discriminer et répondre à cette expression. Tandis qu'à 7 et 12 mois, de par la répétition des expériences et l'intégration de représentations plus détaillées contenant une emphase sur les éléments distinctifs, le *face space* commencerait à être suffisamment bien élaboré et organisé, pour permettre une discrimination et une catégorisation des expressions (pour illustration voir **figure 39**).

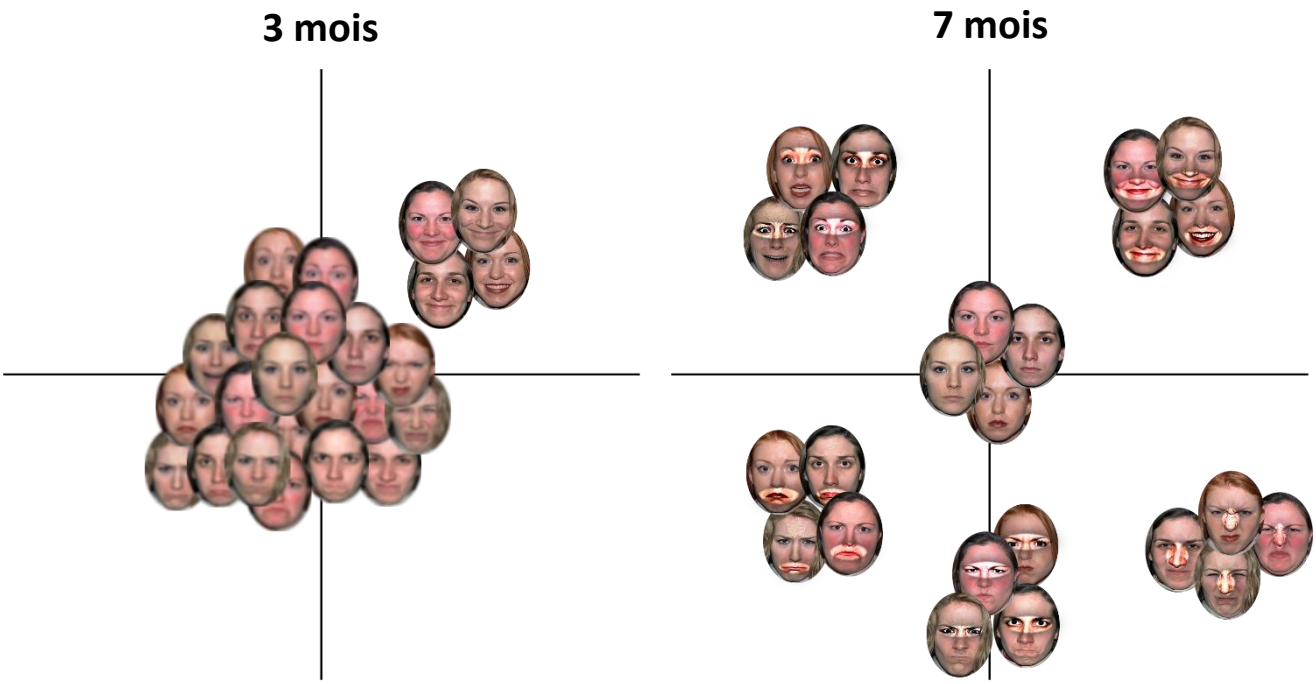


Figure 39 : Représentation schématique du *face space expressif* chez les enfants de 3 mois (à gauche) et les enfants de 7 mois et plus (à droite).

8.2. L'IMPACT DU CONTEXTE OLFACTIF SUR LE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS FACIALES ET LE ROLE POTENTIEL DE L'OLFACTION DANS L'ELABORATION DES CAPACITES DE TRAITEMENT DES EXPRESSIONS

Au cours de notre étude en potentiels évoqués sur l'adulte (Expérience 3), nous avons pu observer la présence d'un effet de l'odeur sur le traitement des expressions faciales selon un processus en deux étapes. D'abord un effet global et aspécifique de l'odeur sur les réactions cérébrales aux visages débutant environ 160 ms après apparition du stimulus. Cet effet était présent au niveau de la contrepartie positive de la N170 (i.e., la VPP) et consistait en une augmentation de l'amplitude de la composante lorsqu'une odeur était présente, et ce, quelle que soit l'émotion exprimée par le visage présenté. Ensuite, une seconde phase débutant environ 200 ms après l'apparition du stimulus était observée. Au cours de celle-ci l'odeur modulait spécifiquement les réponses aux expressions liées à l'odeur (i.e., le dégoût et

la joie) au niveau d'une composante considérée comme reflétant l'intégration de la valeur affective des stimuli : la P200.

Notre étude en potentiels évoqués s'intéressant aux effets du contexte olfactif sur les réponses cérébrales à des visages inexpressifs chez les nourrissons de 3 mois (Expérience 4) nous a permis d'observer un effet similaire à celui constaté chez l'adulte. En effet, les résultats de cette étude ont révélé que, chez les enfants de cet âge, l'odeur (i.e., l'arôme de fraise) modulait les réponses cérébrales au niveau de la N290, composante considérée comme reflétant le traitement et l'encodage de la structure du visage, et comme un précurseur de la N170 adulte (de Haan, Johnson & Halit, 2003 ; de Haan, Pascalis & Johnson, 2002). Nous avons pu également observer que l'odeur (i.e., arôme de fraise et acide butyrique) modifiait les réponses aux visages au niveau d'une composante plus tardive et indiquant l'allocation de l'attention vers le stimulus (i.e., la Nc). Ces deux composantes étaient plus précoces lorsque l'enfant était exposé à une odeur.

Il semble donc qu'à l'instar de la première étape aspécifique observée chez l'adulte, les odeurs moduleraient les réponses cérébrales aux visages sans nécessité de correspondance/lien entre odeur et expression chez les nourrissons de 3 mois. De plus, cet effet aspécifique de l'odeur semble intervenir au niveau d'étapes similaires dans le processus de traitement de visages chez l'adulte et le nourrisson (i.e., sur le nourrisson comme chez l'adulte il y a impact de l'odeur sur une composante spécifique au traitement du visage et de sa structure).

Le traitement et l'encodage des visages au niveau cérébral se révèle ainsi être perméable aux influences du contexte olfactif dans lequel ils apparaissent, et ce, dès les étapes précoces du développement socio-émotionnel. Chez les nourrissons de 3 mois, l'addition d'une stimulation olfactive (dans notre cas positive) semble suffire à accélérer les processus en lien avec l'intégration du visage (i.e., N290). De plus, la présence d'une modulation de la Nc semble indiquer que les mécanismes impliqués dans l'allocation attentionnelle (ici vers les visages) sont eux aussi accélérés lorsqu'une odeur est présente. Le traitement des visages semble dépendre du contexte olfactif dans lequel ils apparaissent. La présence de ces interactions olfacto-visuelles pourrait indiquer une habileté précoce du système à intégrer les variations olfactives lors du traitement de visages, pouvant ainsi mener à l'élaboration de représentations multi-sensorielles intégrant l'odeur, et ainsi faciliter la mise en lien entre variations faciales et variations du contexte olfactif.

En outre, dans leur étude, Godard et collaborateurs (sous presse) ont démontré que dès 3 mois, les nourrissons sont capables de mettre en correspondance l'odeur sentie avec l'expression faciale qui lui est liée sur la base du lien affectif les unifiant : à cet âge les enfants regardent plus le visage dont l'expression émotionnelle coïncide avec la valence hédonique de l'odeur à laquelle ils sont exposés. Il se dégage de ces résultats qu'à 3 mois la mise en lien au sein de représentations multi-sensorielles entre odeur et visage, et plus spécifiquement entre valence de l'odeur et expression, est déjà présente et effective. L'ensemble de ces éléments converge donc vers l'idée qu'à 3 mois le système serait non seulement prompt à intégrer les variations du contexte olfactif lors du traitement de visages, pouvant ainsi mener à la création de représentations multi-sensorielles du visage et des expressions comprenant l'odeur, mais aussi que ce type de représentations aurait déjà commencé à se mettre en place et serait déjà en œuvre, permettant alors au contexte olfactif d'influer sur le traitement des visages expressifs. Il en ressort également que dans l'ontogenèse des capacités socio-émotionnelles, olfaction et traitement des visages (et de leurs expressions) ne constitueraient pas deux processus dissociés et indépendants.

Les résultats de notre étude concernant les effets du contexte olfactif sur l'exploration visuelle de visages inexpressifs chez les enfants de 7 mois (Expérience 5), ont montré que sur la base de l'odeur et de sa valence affective, ceux-ci étaient capables d'anticiper l'expression que le visage d'autrui devrait arborer. En particulier, nous avons pu observer qu'en réaction à l'introduction du contexte olfactif déplaisant (i.e., l'acide butyrique) les enfants se lançaient dans une recherche de l'expression dont le signal émotionnel correspond à l'odeur sentie (i.e., le dégoût). Cette recherche d'une expression spécifique s'est manifestée au travers d'une plus forte focalisation sur la zone du visage où les AUs distinctives de l'expression attendue devraient apparaître (i.e., le nez). Ainsi, chez l'enfant de 7 mois, le contexte olfactif, et plus précisément sa valeur hédonique, semble déclencher une attente spécifique quant aux réactions faciales que le visage devrait manifester et une recherche de ses éléments distinctifs.

Il ressort donc qu'à 7 mois les représentations multi-sensorielles intégrant odeurs et expressions, intègrent également une emphase sur les éléments représentatifs et distinctifs de l'émotion concernée, permettant ainsi la focalisation sur ces éléments lorsqu'une recherche de l'expression est déclenchée lors de l'exposition à une odeur. Cette emphase pourrait être liée au fait que les enfants de cet âge, lorsqu'ils explorent les expressions, se focalisent sur ces zones où les variations en fonction de l'émotion sont les plus fortes, comme démontré lors de

notre première expérience. Elle pourrait également avoir été promue par le fait que la région de distinctivité de l'expression constitue une zone de redondance inter-sensorielle, puisque les variations de valence hédonique du contexte olfactif coïncident avec les variations d'action présentes sur ces régions.

Dans leurs travaux sur le développement des capacités de traitement du langage, Lewkowicz & Hansen-Tift (2012) avancent que la focalisation sur la zone de redondance inter-sensorielle faciliterait l'intégration de ces redondances ainsi que l'établissement d'apprentissages et le développement d'une expertise au niveau langagier. Dans notre cas, si l'on suit cette hypothèse, la focalisation sur la zone où il y a coïncidence entre les variations d'expressions et les variations du contexte olfactif, pourrait faciliter les apprentissages sur les liens olfaction-émotion, ainsi que l'établissement d'une expertise de traitement des expressions faciales. De plus, les hypothèses sur la redondance inter-sensorielle (Bahrick, 1994 ; Bahrick & Lickliter, 2002 ; Flom & Bahrick, 2007), avancent que les informations relayées simultanément par différents sens seraient plus saillantes et mieux encodées, mais aussi que la redondance d'informations entre les sens favoriserait le traitement d'informations amodales telles que les affects. Ainsi, la focalisation des enfants de 7 mois sur la zone du visage où la redondance inter-sensorielle est maximale pourrait contribuer non seulement au renforcement du lien odeur-expression au niveau des représentations multi-sensorielles, mais aussi au développement des capacités de traitement des expressions faciales, ainsi qu'à l'intégration et à l'apprentissage de leur signification.

En lien avec les observations faites par Godard et collaborateur (sous presse) il apparaît qu'entre 3 mois et 7 mois il y ait une évolution des représentations multi-sensorielles. Ces dernières semblent s'être enrichies, et une sophistication des capacités de traitement multi-sensoriel entre ces deux âges est observée, partant d'une aptitude à la mise en correspondance directe entre expressions et odeurs, pour parvenir à la capacité d'anticiper précisément l'expression faciale sur la base de l'odeur. Il semble donc qu'au sein des représentations multi-sensorielles la mise en lien odeur-expression se soit renforcée et complexifiée, permettant ainsi que l'odeur à elle seule suffise à réactiver la représentation de l'expression liée et déclenche sa recherche.

De plus, au cours de notre première étude (Expérience 1), nous avons pu observer que comparativement aux nourrissons de 3 mois qui montraient une sensibilité aux visages de joie, les jeunes enfants de 7 mois ont exprimé des réactions faciales de valence distincte selon la signification émotionnelle de l'expression à laquelle ils étaient exposés. Il semble donc

qu'en parallèle de la progression dans les capacités de traitement multi-sensoriel que nous avons pu observer entre 3 et 7 mois, est également présente une évolution des capacités de traitement uni-sensoriel des expressions, avec notamment une progression dans l'intégration de leur signification. De plus, là où nous avons pu observer qu'à 3 mois les jeunes enfants n'ont pas manifesté de réactions faciales attestant d'une intégration de la valeur émotionnelle des expressions, ces derniers ont toutefois manifesté une capacité à traiter la correspondance de valence affective entre odeur et expression dans l'étude de Godard et collaborateurs (sous presse). Ces différents éléments sont non sans rappeler l'hypothèse de Flom et Bahrick (2007), qui avancent que l'enfant apprendrait d'abord à percevoir les expressions affectives de façon multimodale, avant de pouvoir le faire de façon unimodale. Ainsi, en accord avec cette hypothèse, l'intégration olfacto-visuelle des expressions faciales pourrait aider l'enfant à traiter et percevoir la valeur affective des expressions au cours des étapes précoces du développement socio-émotionnel, et pourrait également contribuer à l'apprentissage de leur signification ainsi qu'à l'établissement de la capacité à percevoir les affects de façon unimodale (i.e., visuelle uniquement).

Enfin, nous avons précédemment évoqué que les représentations des expressions seraient stockées au sein d'un *face space* auquel l'enfant aurait recours lors du traitement des expressions. Au travers de nos travaux sur les interactions olfacto-visuelles chez les jeunes enfants, nous avons obtenu des résultats suggérant que dès les étapes précoces du développement, les représentations des expressions seraient multi-sensorielles et intégreraient les liens odeur-expression. Il apparaît donc logique de supposer que le *face space expressif* de l'enfant puisse lui aussi intégrer ces aspects multi-sensoriels, puisque son élaboration repose sur des représentations n'intégrant pas uniquement la modalité visuelle. Concernant l'olfaction, cette intégration de la multi-sensorialité au sein du *face space* pourrait se traduire, soit par l'inclusion de représentations comprenant les liens odeur-expression, soit par la présence de dimensions intégrant ces liens puisqu'elles ont été élaborées sur la base de représentations les comprenant. Dans notre cas, l'odeur pourrait donc, selon sa valence, venir pré-activer les représentations et/ou les dimensions liées, ce qui d'un point de vue fonctionnel augmenterait le poids relatif de ces représentations et/ou de ces dimensions, et viendrait en retour faciliter le traitement des expressions concernées par ces modulations. Ainsi, chez les nourrissons de 3 mois, là où le *face space* n'est pas encore suffisamment élaboré pour permettre une distinction fine des expressions (hormis pour la joie), l'addition de la

stimulation olfactive pourrait venir augmenter le poids relatif de certaines représentations et/ou dimensions au sein de ce dernier, et ainsi faciliter la distinction des expressions. Chez les enfants de 7 mois, bien que toujours en cours de mise place, le *face space* aurait évolué, et cette fois-ci les odeurs pré-activeraient des représentations et/ou dimensions contenant une emphase sur les éléments distinctifs de l'expression. De plus, à cet âge, le *face space* serait suffisamment élaboré et intégrerait des représentations suffisamment consolidées et fines pour permettre le déclenchement d'une attente et d'une recherche de l'expression sur la base de l'information olfactive, mais aussi une distinction des expressions sur la base de l'information visuelle seule (pour illustration voir **figure 40**).

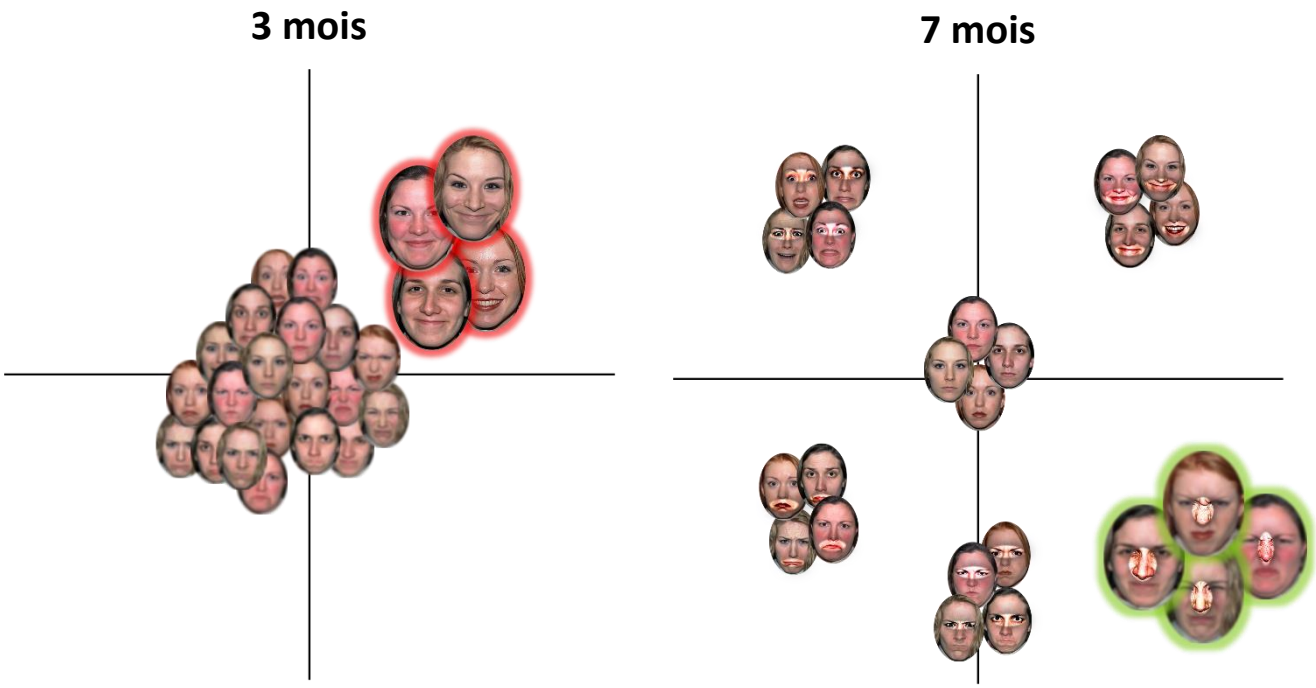


Figure 40 : Représentation schématique de l'effet du contexte olfactif plaisant sur le *face space expressif* chez les enfants de 3 mois (à gauche) et du contexte olfactif déplaisant chez les enfants de 7 mois (à droite).

De façon plus générale, il apparaît donc que le développement des capacités de traitement des expressions faciales n'est pas un processus indépendant de l'influence des autres modalités sensorielles, et notamment de l'olfaction. Bien au contraire, à l'instar de ce qui a déjà pu être observé pour l'audition, il ressort que l'olfaction pourrait contribuer au développement socio-émotionnel de l'enfant, et plus spécifiquement à l'établissement de son expertise dans le traitement des expressions faciales. Les odeurs impacteraient précocement le

traitement des visages et expressions, et seraient intégrées au sein de représentations multi-sensorielles assistant le jeune enfant lors du traitement des expressions faciales, et contribuant à son apprentissage de leur signification.

Bibliographie

Adams, R. B., Gordon, H. L., Baird, A. A., Ambady, N., & Kleck, R. E. (2003). Effects of gaze on amygdala sensitivity to anger and fear faces. *Science*, *300*(5625), 1536. doi:10.1126/science.1082244

Adams, R. B., & Kleck, R. E. (2005). Effects of direct and averted gaze on the perception of facially communicated emotion. *Emotion*, *5*(1), 3–11. doi:10.1037/1528-3542.5.1.3

Adelmann, P. K., & Zajonc, R. B. (1989). Facial efference and the experience of emotion. *Annual Review of Psychology*, *40*(1), 249–280.

Adolph, D., Meister, L., & Pause, B. M. (2013). Context counts ! Social anxiety modulates the processing of fearful faces in the context of chemosensory anxiety signals. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 1–17. doi:10.3389/fnhum.2013.00283

Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(2), 169–177. doi:10.1016/S0959-4388(02)00301-X

Adolphs, R., Gosselin, F., Buchanan, T. W., Tranel, D., Schyns, P., & Damasio, A. R. (2005). A mechanism for impaired fear recognition after amygdala damage. *Nature*, *433*(7021), 68–72.

Aggleton, J., & Saunders, R. (2000). 1- The amygdala : What's happened in the last decades? In J. Aggleton (Ed.), *The amygdala: A fonctional analysis (2nd edition)* (pp. 1–30). Oxford: Oxford University Press.

Alaoui-Ismaïli, O., Vernet-Maury, E., Dittmar, A., Delhomme, G., & Chanel, J. (1997). Odor hedonics: connection with emotional response estimated by autonomic parameters. *Chemical Senses*, *22*(3), 237–248. doi:10.1093/chemse/22.3.237

Amso, D., Fitzgerald, M., Davidow, J., Gilhooly, T., & Tottenham, N. (2010). Visual exploration strategies and the development of infants' facial emotion discrimination. *Frontiers in Psychology*, *1*, 180. doi:10.3389/fpsyg.2010.00180

Ashley, V., Vuilleumier, P., & Swick, D. (2004). Time-course and specificity of event-related potentials to emotional expressions. *NeuroReport*, 15, 211–215.

Atkinson, A. P., & Adolphs, R. (2011). The neuropsychology of face perception: Beyond simple dissociations and functional selectivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, *366*(1571), 1726–38. doi:10.1098/rstb.2010.0349

Aviezer, H., Hassin, R. R., Ryan, J., Grady, C., Susskind, J., Anderson, A., … Bentin, S. (2008). Angry, disgusted, or afraid? Studies on the malleability of emotion perception. *Psychological Science*, *19*(7), 724–732. doi:10.1111/j.1467-9280.2008.02148.x

Bahrick, L. E. (1994). The Development of Infants Sensitivity to Arbitrary Intermodal Relations. *Ecological Psychology*, *6*(2), 111–123.

Bahrick, L. E., & Lickliter, R. (2002). Intersensory redundancy guides early perceptual and cognitive development. *Advances in Child Development and Behavior*, *30*, 153–187.

Bannerman, R. L., Milders, M., de Gelder, B., & Sahraie, A. (2009). Orienting to threat: faster localization of fearful facial expressions and body postures revealed by saccadic eye movements. *Proceedings. Biological Sciences*, *276*(1662), 1635–1641.

Bannerman, R. L., Milders, M., & Sahraie, A. (2009). Processing emotional stimuli: Comparison of saccadic and manual choice-reaction times. *Cognition & Emotion*, *23*(5), 930–954.

Bannerman, R. L., Milders, M., & Sahraie, A. (2010). Attentional bias to brief threat-related faces revealed by saccadic eye movements. *Emotion*, *10*(5), 733–738.

Barrera, M. E., & Maurer, D. (1981). The perception of facial expressions by the three-month-old. *Child Development*, *52*(1), 203–206.

Barrett, L. F., & Bar, M. (2009). See it with feeling: affective predictions during object perception. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 364, 1325-1334.

Barrett, L. F., Mesquita, B., & Gendron, M. (2011). Context in emotion perception. *Current Directions in Psychological Science*, *20*(5), 286–290.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review Of. Psychology*, *59*, 617-645.

Bartrip, J., Morton, J., & de Schonen, S. (2001). Responses to mother's face in 3-week to 5-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*, *19*(2), 219–232.

Baudouin, J. Y., & Gallay, M. (2006). Is face distinctiveness gender based?.*Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*,*32*(4), 789.

Baudouin, J.Y., Monnot, Durand, K., Schaal, B. (2012). The development of the ability to process facial emotion in infancy. *Journal of Vision,* 12(9), 967.

Bavelas, J. B., Black, A., Lemery, C. R., & Mullet, J. (1986). "I show how you feel": Motor mimicry as a communicative act. *Journal of Personality and Social Psychology*, *50*(2), 322–329.

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*, *114*(03), 469–500. doi:10.4074/S0003503314003030

Bayliss, A. P., Frischen, A., Fenske, M. J., & Tipper, S. P. (2007). Affective evaluations of objects are influenced by observed gaze direction and emotional expression. *Cognition*, *104*(3), 644–53. doi:10.1016/j.cognition.2006.07.012

Bayliss, A. P., Schuch, S., & Tipper, S. P. (2010). Gaze cueing elicited by emotional faces is influenced by affective context. *Visual Cognition*, *18*(8), 1214–1232. doi:10.1080/13506285.2010.484657

Becker, D. V., Anderson, U. S., Mortensen, C. R., Neufeld, S. L., & Neel, R. (2011). The face in the crowd effect unconfounded: Happy faces, not angry faces, are more efficiently detected in single- and multiple-target visual search tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *140*(4), 637–659.

Bertin, E., & Striano, T. (2006). The still-face response in newborn, 1.5-, and 3-month-old infants. *Infant Behavior & Development*, *29*(2), 294–7. doi:10.1016/j.infbeh.2005.12.003

Bigelow, A. E., & Rochat, P. (2006). Two-month-old infants' sensitivity to social contingency in mother-infant and stranger-infant interaction. *Infancy*, *9*(3), 313–325. doi:10.1207/s15327078in0903_3

Biringen, Z., Emde, R., Campos, J., & Appelbaum, M. (1995). Affective reorganization in the infant, the mother, and the dyad: the role of upright locomotion and its timing. *Child Development*, *66*, 499–514.

Black, M. M., & Aboud, F. E. (2011). Responsive feeding is embedded in a theoretical framework of responsive parenting. *Journal of Nutrition*, *141*, 490–494.

Blass, E. M., & Camp, C. A. (2001). The ontogeny of face recognition: eye contact and sweet taste induce face preference in 9- and 12-week-old human infants. *Developmental Psychology*, *37*(6), 762–774.

Boisferon, A. H. De, Dupierrix, E., Quinn, P. C., Loevenbruck, H., Lewkowicz, D. J., Lee, K., & Pascalis, O. (2015). Perception of multisensory gender coherence in 6- and 9-month-old infants. *Infancy*, 1–14. doi:10.1111/infa.12088

Bornemann, B., Winkielman, P., & Der Meer, E. Van. (2011). Can you feel what you do not see? Using internal feedback to detect briefly presented emotional stimuli. *International Journal of Psychophysiology*, *85*,(1), 116–24. doi:10.1016/j.ijpsycho.2011.04.007

Bornstein, M. H., & Arterberry, M. E. (2003). Recognition, discrimination and categorization of smiling by 5-month-old infants. *Developmental Science*, *6*(5), 585–599. doi:10.1111/1467-7687.00314

Bornstein, M. H., Arterberry, M. E., Mash, C., & Manian, N. (2011). Discrimination of facial expression by 5-month-old infants of nondepressed and clinically depressed mothers. *Infant Behavior & Development*, *34*(1), 100–6. doi:10.1016/j.infbeh.2010.10.002

Bower, G. H. (1981). Mood and memory. *American Psychologist*, *36*(2), 129–148.

Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., Kennedy, W. A., Rauch, S. L., Buckner, R. L., … Rosen, B. R. (1996). Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression. *Neuron*, *17*(5), 875–887. doi:10.1016/S0896-6273(00)80219-6

Briñol, P., & Petty, R. E. (2008). Embodied persuasion: Fundamental processes by which bodily responses can impact attitudes. In G. R. Semin & E. R. Smith (Eds.), *Embodiment grounding Social cognitive affective and neuroscientific approaches* (Vol. 56, pp. 184–207). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1111/j.1460-2466.2006.00284.x

Briñol, P., Petty, R. E., & Wagner, B. (2009). Body posture effects on self-evaluation : A self-validation approach. *European Journal of Social Psychology*, *39*(6), 1053–1064. doi:10.1002/ejsp

Brookes, H., Slater, A., Quinn, P. C., Lewkowicz, J., Hayes, R., & Brown, E. (2001). Three-month-old infants learn arbitrary auditory–visual pairings between voices and faces. *Infant and Child Development*, *10*, 75–82.

Bruce, V., & Young, A. (1986). Understanding face recognition. *British Journal of Psychology*, *77*(3), 305–327.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., … Parma, I.-. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner : an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*, 400–404.

Bushnell, I. W. R. (1982). Discrimination of faces by young infants. *Journal of experimental child psychology*, *33*(2), 298-308.

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. doi:10.1037/0096-1523.26.2.527

Calvo, M. G., & Nummenmaa, L. (2008). Detection of emotional faces: salient physical features guide effective visual search. *Journal of Experimental Psychology. General*, *137*(3), 471–94. doi:10.1037/a0012771

Calvo, M. G., & Nummenmaa, L. (2011). Time course of discrimination between emotional facial expressions: The role of visual saliency. *Vision Research*, *51*(15), 1751–1759.

Calvo, M. G., Nummenmaa, L., & Avero, P. (2008). Visual search of emotional faces eye-movement assessment of component processes. *Experimental Psychology*, *55*(6), 359–370.

Campos, J. J., Kennoian, R., & Zumbahlen, M. R. (1992). Socioemotional transformations in the family system following infant crawling onset. *New Directions for Child Development*, *1992*(55), 25–40.

Camras, L. a., Oster, H., Bakeman, R., Meng, Z., Ujiie, T., & Campos, J. J. (2007). Do infants show distinct negative facial expressions for fear and anger? Emotional Expression in 11-Month-Old European American, Chinese, and Japanese Infants. *Infancy*, *11*(2), 131–155. doi:10.1111/j.1532-7078.2007.tb00219.x

Caron, A., Caron, R. F., & MacLean, D. (1988). Infant discrimination of naturalistic emotional expressions: the role of face and voice. *Child Development*, *59*(3), 604–616.

Carroll, J. M., & Russell, J. A. (1996). Do facial expressions signal specific emotions? Judging emotion from the face in context. *Journal of Personality and Social Psychology*, *70*(2), 205–218. doi:10.1037//0022-3514.70.2.205

Carver, L. J., & Vaccaro, B. G. (2007). 12-month-old infants allocate increased neural resources to stimuli associated with negative adult emotion. *Developmental Psychology*, *43*(1), 54–69. doi:10.1037/0012-1649.43.1.54.12-Month-Old

Castiello, U., Zucco, G. M., Parma, V., Ansuini, C., & Tirindelli, R. (2006). Cross-Modal interactions between olfaction and vision when grasping. *Chemical Senses*, *31*(7), 665–671.

Chambon, V., Baudouin, J., & Franck, N. (2006). The role of configural information in facial emotion recognition in schizophrenia. *Neuropsychologia*, *44*(12), 2437–2444.

Chartrand, T., & Bargh, J. (1999). The chameleon effect: The perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, *76*(6), 893–910.

Chen, D., & Dalton, P. (2005). The effect of emotion and personality on olfactory perception. *Chemical Senses*, *30*(4), 345–351. doi:10.1093/chemse/bji029

Chen, D., Katdare, A., & Lucas, N. (2006). Chemosignals of fear enhance cognitive performance in humans. *Chemical Senses*, *31*(5), 415–423. doi:10.1093/chemse/bjj046

Chen, X., Striano, T., & Rakoczy, H. (2004). Auditory-oral matching behavior in newborns. *Developmental Science*, *7*(1), 42–47.

Chen, Y.-H., Dammers, J., Boers, F., Leiberg, S., Edgar, C. J., Roberts, T. P. L., & Mathiak, K. (2009). The temporal dynamics of insula activity to disgust and happy facial expressions : A magnetoencephalography study. *NeuroImage*, *47(4)*, 1921–1928. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.04.093

Chepenik, L. G., Cornew, L. A., & Farah, M. J. (2007). The influence of sad mood on cognition. *Emotion*, *7*(4), 802–811.

Chugani, H., & Phelps, M. (1986). Maturational changes in cerebral function in infants determined by 18FDG positron emission tomography. *Science*, *231*, 840-843.

Cohen, L. B., & Cashon, C. H. (2001). Do 7-month-old infants process independent features or facial configurations? *Infant and Child Development*, *10*(1-2), 83–92. doi:10.1002/icd.250

Colombo, J. (2001). The development of visual attention in infancy. *Annual Review of Psychology*, *52*, 337–367.

Coulon, M., Guellai, B., & Streri, A. (2011). Recognition of unfamiliar talking faces at birth. *International Journal of Behavioral Development*, *35*(3), 282–287. doi:10.1177/0165025410396765

Critchley, H., Daly, E., Phillips, M., Brammer, M., Bullmore, E., Williams, S., … Murphy, D. (2000). Explicit and implicit neural mechanisms for processing of social information from facial expressions: a functional magnetic resonance imaging study. *Human Brain Mapping*, *9*(2), 93–105

Crouzet, S. M., Kirchner, H., & Thorpe, S. J. (2010). Fast saccades toward faces: face detection in just 100 ms. *Journal of Vision*, *10*(4), 16.1–17.

D'Entremont, B. D., & Muir, D. (2000). Infant responses to adult happy and sad vocal and facial expressions during face-to-face interactions. *Infant Behavior & Development*, *22*(204), 527–539.

Dalton, P., Mauté, C., Jaén, C., & Wilson, T. (2013). Chemosignals of Stress Influence Social Judgments. *PLoS ONE*, *8*(10), e77144.

Damasio, A. R. (1998). Emotion in the perspective of an integrated nervous system. *Brain Research Reviews*, *26*, 83–86.

Darwin, C. (1872/1998). *The expression of the emotions in man and animals.* In Emotion processing in infancy. In J. Murray (Ed.). New York: Oxford University Press.

De Gelder, B. (1999). Recognizing emotions by ear and by eye. In R. D. Lane, & L. Nadel (Eds.) *Cognitive Neuroscience of Emotions* (pp. 84–105). Oxford: Oxford University Press.

De Groot, J. H. B., Smeets, M. a M., Kaldewaij, A., Duijndam, M. J. a, & Semin, G. R. (2012). Chemosignals communicate human emotions. *Psychological Science*, *23*(11), 1417–24. doi:10.1177/0956797612445317

De Groote, I., Roeyers, H., & Striano, T. (2007). Gaze following as a function of affective expression in 3-, 6- and 9-month-old infants. *Infant Behavior and Development*, *30*(3), 492–498.

De Haan, M., Belsky, J., Reid, V., Volein, A., & Johnson, M. H. (2004). Maternal personality and infants' neural and visual responsivity to facial expressions of emotion. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, *45*(7), 1209–18. doi:10.1111/j.1469-7610.2004.00320.x

De Haan, M., Johnson, M. H., & Halit, H. (2003). Development of face-sensitive event-related potentials during infancy: a review. *International Journal of Psychophysiology*, *51*(1), 45–58. doi:10.1016/S0167-8760(03)00152-1

De Haan, M., Pascalis, O., & Johnson, M. H. (2002). Specialization of neural mechanisms underlying face recognition in human infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(2), 199–209. doi:10.1162/089892902317236849

De Heering, A., de Liedekerke, C., Deboni, M., & Rossion, B. (2010). The role of experience during childhood in shaping the other-race effect. *Developmental Science*, *13*(1), 181–7. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00876.x

De Schonen, S. (2009). Percevoir un visage dans la petite enfance. *L'Évolution Psychiatrique*, *74*(1), 27–54. doi:10.1016/j.evopsy.2008.12.016

Defensor, E. B., Corley, M. J., Blanchard, R. J., & Blanchard, D. C. (2012). Facial expressions of mice in aggressive and fearful contexts. *Physiology & behavior*, *107*(5), 680-685.

Delaunay-El Allam, M., Marlier, L., & Schaal, B. (2006). Learning at the breast: Preference formation for an artificial scent and its attraction against the odor of maternal milk. *Infant Behavior and Development*, *29*(3), 308–321. doi:10.1016/j.infbeh.2005.12.008

Delaunay-El Allam, M., Soussignan, R., Patris, B., Marlier, L., & Schaal, B. (2010). Long-lasting memory for an odor acquired at the mother's breast. *Developmental Science*, *13*(6), 849–863. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00941.x

Demattè, M. L., Osterbauer, R., & Spence, C. (2007). Olfactory cues modulate facial attractiveness. *Chemical Senses*, *32*(6), 603–610. doi:10.1093/chemse/bjm030

Dezecache, G., Conty, L., Chadwick, M., Philip, L., Soussignan, R., Sperber, D., & Grèzes, J. (2013). Evidence for unintentional emotional contagion beyond dyads. *PloS One*, *8*(6), e67371. doi:10.1371/journal.pone.0067371

Dezecache, G., Mercier, H., & Scott-Phillips, T. C. (2013). An evolutionary approach to emotional communication. *Journal of Pragmatics*, *59*, 221–233. doi:10.1016/j.pragma.2013.06.007

Diéguez-Risco T., Aguado, L., Albert, J., & Antonio Hinojosa, J. (2013). Faces in context: Modulation of expression processing by situational information. Social Neuroscience, 8 (6), 601-620.

Dimberg, U., & Thunberg, M. (1998). Rapid facial reactions to emotional facial expressions. *Scandinavian Journal of Psychology*, *39*(1), 39–45

Doi, H., Tagawa, M., & Shinohara, K. (2010). Gaze direction modulates the disengagement of attention from facial expression in 10-month-olds. *Emotion*, *10*(2), 278–82. doi:10.1037/a0017800

Dollion, N., Baudouin, J.Y., Durand, K., & Schaal, B. (soumis). Subliminal pleasant odors speed the visual processing of facial expressions. *Acta Psychologica*

Dorthe, N. J. Blumenthal, T. D. Jason, D. R. & Lantz, P. E. (1995) The use of next-of-kin in assessing handedness Perceptual and Motor Skills, 81, 203-208.

Doucet, S., Soussignan, R., Sagot, P., & Schaal, B. (2007). The "Smellscape" of mother's breast : Effects of odor masking and selective unmasking on neonatal arousal, oral, and visual responses. *Developmental Psychobiology*, *49*, 129–138. doi:10.1002/dev

Doucet, S., Soussignan, R., Sagot, P., & Schaal, B. (2009). The secretion of areolar (Montgomery's) glands from lactating women elicits selective, unconditional responses in neonates. *PloS One*, *4*(10), e7579. doi:10.1371/journal.pone.0007579

Doucet, S., Soussignan, R., Sagot, P., & Schaal, B. (2012). An overlooked aspect of the human breast: areolar glands in relation with breastfeeding pattern, neonatal weight gain, and the dynamics of lactation. *Early Human Development*, *88*(2), 119–28. doi:10.1016/j.earlhumdev.2011.07.020

Durand, K., Baudouin, J. Y., Lewkowicz, D. J., Goubet, N., & Schaal, B. (2013). Eye-catching odors: Olfaction elicits sustained gazing to faces and eyes in 4-month-old infants. *PLoS ONE*, *8*(8), e70677.

Durand, K., Gallay, M., Seigneuric, A., Robichon, F., & Baudouin, J.-Y. (2007). The development of facial emotion recognition: the role of configural information. *Journal of Experimental Child Psychology*, *97*(1), 14–27.

Eimer, M., & Holmes, A. (2002). An ERP study on the time course of emotional face processing. *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology*, *13*(4), 1–5.

Ekman, P. (1973). Cross culture studies of facial expression. In P. Ekman (Ed.), *Darwin and facial expression: A century of research in review,* (pp. 169-222), New York: Academic Press.

Ekman, P. & Friesen, W. (1978). *Facial Action Coding System: A technique for measurement of facial movement*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologist Press.

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: Oxford University Press.

Engle, P. L., Bentley, M., & Pelto, G. (2000). The role of care in nutrition programmes: current research and a research agenda. *Proceedings of the Nutrition Society*, *59*(01), 25–35. doi:10.1017/S0029665100000045

Ellsworth, P.C., & Scherer, K.R. (2003). Appraisal processes in emotion. In R.J. Davidson, K.R. Scherer, & H. H. Goldsmith (eds.), *Handbook of affective sciences* (pp. 572-595). New York: Oxford University Press.

Fairhall, S. L., & Ishai, A. (2007). Effective connectivity within the distributed cortical network for face perception. *Cerebral Cortex*, *17*(10), 2400–2406. doi:10.1093/cercor/bhl148

Farroni, T., Csibra, G., Simion, F., & Johnson, M. H. (2002). Eye contact detection in humans from birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(14), 9602–9605.

Farroni, T., Menon, E., Rigato, S., & Johnson, M. H. (2007). The perception of facial expressions in newborns. *The European Journal of Developmental Psychology*, *4*(1), 2–13.

Feinman, S., & Lewis, M. (1983). Social referencing at ten months: a second-order effect on infants' responses to strangers. *Child Development*, *54*(4), 878–887.

Fernandez, M., & Bahrick, L. E. (1994). Infants' sensitivity to arbitrary pairings. *Infant Behavior & Development*, *17*, 471–474.

Field, T., Diego, M., & Hernandez-Reif, M. (2009). Depressed mothers' infants are less responsive to faces and voices. *Infant Behavior & Development*, *32*(3), 239–244. doi:10.1016/j.infbeh.2009.03.005

Field, T. M., Woodson, R., Cohen, D., Greenberg, R., Garcia, R., & Collins, K. (1983). Discrimination and imitation of facial expressions by term and preterm neonates. *Infant Behavior Development*, *6*(4), 485–489. doi:10.1016/S0163-6383(83)90316-8

Field, T., Pickens, J., Fox, N. A., Gonzalez, J., & Nawrocki, T. (1998). Facial expression and EEG responses to happy and sad faces/voices by 3-month-old infants of depressed mothers. *British Journal of Developmental Psychology*, *16*(4), 485–494. doi:10.1111/j.2044-835X.1998.tb00766.x

Field, T., Woodson, R., Greenberg, R., & Cohen, D. (1982). Discrimination and imitation of facial expressions by neonates. *Science*, *218*(8), 179–181.

Flom, R., & Bahrick, L. E. (2007). The development of infant discrimination of affect in mulimodal and unimodal stimulation: The role of intersensory redundancy. *Developmental Psychology*, *43*(1), 238–252. doi:10.1037/0012-1649.43.1.238.The

Forscher, E. C., & Li, W. (2012). Hemispheric Asymmetry and Visuo-Olfactory Integration in perceiving subthreshold (Micro) fearful expressions. *The Journal of Neuroscience*, *32*(6), 2159–2165. doi:10.1523/JNEUROSCI.5094-11.2012

Förster, J. (2004). How body feedback influences consumers' evaluation of products. *Journal of Consumer Psychology*, *14*(4), 416–426. doi:10.1207/s15327663jcp1404_10

Fox, E., & Damjanovic, L. (2007). The eyes are sufficient to produce a threat superiority effect. *Emotion*, *6*(3), 534–539. doi:10.1037/1528-3542.6.3.534.The

Frank, M. C., Vul, E., & Johnson, S. P. (2009). Development of infants' attention to faces during the first year. *Cognition*, *110*(2), 160–170.

Fridlund, A. J. (1994). *Human facial expression: An evolutionary view*. San Diego, CA: Academic Press.

Frischen, A., Eastwood, J. D., & Smilek, D. (2008). Visual search for faces with emotional expressions. *Psychological Bulletin*, *134*(5), 662–676. doi:10.1037/0033-2909.134.5.662

Gallay, M., Baudouin, J., Durand, K., Lemoine, C., & Lécuyer, R. (2006). Qualitative differences in the exploration of upright and upside-down faces in four-month-old infants : An eye-movement study. *Child Development*, *77*(4), 984–996.

Gallese, V. (2007). Before and below "theory of mind": embodied simulation and the neural correlates of social cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *362*(1480), 659–69. doi:10.1098/rstb.2006.2002

Ganel, T., Goshen-Gottstein, Y., & Goodale, M. A. (2005). Interactions between the processing of gaze direction and facial expression. *Vision Research*, *45*(9), 1191–200. doi:10.1016/j.visres.2004.06.025

Gao, X., Maurer, D., & Nishimura, M. (2013). Altered representation of facial expressions after early visual deprivation. *Frontiers in Psychology*, *4*, 878. doi:10.3389/fpsyg.2013.00878

Geldart, S., Mondloch, C. J., Maurer, D., de Schonen, S., & Brent, H. P. (2002). The effect of early visual deprivation on the development of face processing. *Developmental Science*, *5*(4), 490–501. doi:10.1111/1467-7687.00242

George, N., Jemel, B., Fiori, N., & Renault, B. (1997). Face and shape repetition effects in humans : A spatio-temporal ERP study. NeuroReport, 8, 1417-1423.

Gerritsen, C., Frischen, A., Blake, A., Smilek, D., & Eastwood, J. D. (2008). Visual search is not blind to emotion. *Perception & Psychophysics*, *70*(6), 1047–1059.

Gläscher, J., & Adolphs, R. (2003). Processing of the arousal of subliminal and supraliminal emotional stimuli by the human amygdala. *The Journal of Neuroscience*, *23*(32), 10274–10282.

Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2005). Structural encoding of body and face in human infants and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(8), 1328–1340. doi:10.1162/0898929055002481

Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Development of a view-invariant representation of the human head. *Cognition*, *102*(2), 261–288. doi:10.1016/j.cognition.2006.01.004

Gobbini, M. I., & Haxby, J. V. (2007). Neural systems for recognition of familiar faces. *Neuropsychologia*, *45*(1), 32–41.

Godard, O., Baudouin, J. Y., Schaal, B., & Durand, K. (sous presse). Affective matching of odors and facial expressions in infants: shifting patterns between 3 and 7 months. *Developmental Science*. doi: 10.1111/desc.12292.

Goldman, A. I., & Sripada, C. S. (2005). Simulationist models of face-based emotion recognition. *Cognition*, *94*(3), 193–213.

Goren, C. C., Sarty, M., & Wu, P. Y. K. (1975). Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants. *Pediatrics*, *56*(4), 544–561.

Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2001). Bubbles: a technique to reveal the use of information in recognition tasks. *Vision Research*, *41*(17), 2261–2271. doi:10.1016/S0042-6989(01)00097-9

Gottfried, J. A., & Dolan, R. J. (2003). The nose smells what the eye sees: crossmodal visual facilitation of human olfactory perception. *Neuron*, *39*(2), 375–386.

Green, M., Williams, L., & Davidson, D. (2003). In the face of danger: Specific viewing strategies for facial expressions of threat? *Cognition & Emotion*, *17*(5), 779–786. doi:10.1080/02699930302282

Grezes, J., Dezecache, G., & Eskenazi, T. (2015). Limbic to motor interactions during social perception. *Brain Mapping: An Encyclopedic Reference*, *3*, 1027–1030.

Grèzes, J., Philip, L., Chadwick, M., Dezecache, G., Soussignan, R., & Conty, L. (2013). Self-relevance appraisal influences facial reactions to emotional body expressions. *PloS One*, *8*(2), e55885. doi:10.1371/journal.pone.0055885

Grigor, J. (1995) Do the eyes see what the nose knows? An investigation of the effects of olfactory priming on visual event related potentials. Chem. Senses, 20, 163.

Grigor, J., Toller, S. Van, Behan, J., Richardson, A. (1999). The effect of odour priming on long latency visual evoked potentials of matching and mismatching objects, *Chemical Senses*, *24*(2), 137–144.

Grossmann, T. (2015). The development of social brain functions in infancy. *Psychological Bulletin*. doi:10.1037/bul0000002

Grossmann, T., Striano, T., & Friederici, A. D. (2006). Crossmodal integration of emotional information from face and voice in the infant brain. *Developmental Science*, *9*(3), 309–315.

Grossmann, T., Striano, T., & Friederici, A. D. (2007). Developmental changes in infants' processing of happy and angry facial expressions: a neurobehavioral study. *Brain and Cognition*, *64*(1), 30–41. doi:10.1016/j.bandc.2006.10.002

Guellaï, B., Coulon, M., & Streri, A. (2011). The role of motion and speech in face recognition at birth. *Visual Cognition*, *19*(9), 1212–1233. doi:10.1080/13506285.2011.620578

Gunnar, M. R., & Stone, C. (1984). The effects of positive maternal affect on infant responses to pleasant, ambiguous, and fear-provoking toys. *Child Development*, *55*(4), 1231–1236. doi:10.2307/1129992

Guthrie, D., & Buchwald, J. S. (1991). Significance testing of difference potentials. *Psychophysiology*, 28 (2), 240-244.

Hagan, C. C., Woods, W., Johnson, S., Calder, A. J., Green, G. G. R., & Young, A. W. (2009). MEG demonstrates a supra-additive response to facial and vocal emotion in the right superior temporal sulcus. *PNAS*, *106*(47), 20010–20015.

Hailine, L. (1978). Developmental changes in visual scanning of face and nonface patterns by infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *25*, 90–115.

Hains, S. M., & Muir, D. W. (1996). Infant sensitivity to adult eye direction. *Child Development*, *67*, 1940-1951.

Haith, M., Bergman, T., & Moore, M. (1977). Eye contact and face scanning in early infancy. *Science*, *198*, 853–855.

Halit, H., Csibra, G., Volein, A., & Johnson, M. H. (2004). Face-sensitive cortical processing in early infancy. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, *45*(7), 1228–34. doi:10.1111/j.1469-7610.2004.00321.x

Halit, H., de Haan, M., & Johnson, M. . (2003). Cortical specialisation for face processing: face-sensitive event-related potential components in 3- and 12-month-old infants. *NeuroImage*, *19*(3), 1180–1193. doi:10.1016/S1053-8119(03)00076-4

Hansen, C. H., & Hansen, R. D. (1988). Finding the face in the crowd: an anger superiority effect. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*(6), 917–924.

Hatfield, E., Rapson, R. L., & Le, en-C. L. (2012). Emotional contagion and empathy. In J. Decety & W. Ickes (Eds.), *The social neuroscience of empathy* (pp. 19–30). Cambridge: MIT Press.

Haviland, J. M., & Lelwica, M. (1987). The induced affect response: 10-week-old infants' responses to three emotion expressions. *Developmental Psychology*, *23*(1), 97–104. doi:10.1037/0012-1649.23.1.97

Haxby, J. V., & Gobbini, M. I. (2011). Distributed neural systems for face perception. In Calder, A. J. et al. (Eds.), *The Oxford Handbook of Face perception* (pp. 93-110). Oxford: University Press.

Haxby, J. V, Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, *293*(5539), 2425–2430.

Haxby, J. V., Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(6), 223–233. doi:10.1016/S1364-6613(00)01482-0

Herbinet, E., & Busnel, M. (1995). Le fœtus pierre et le loup entretien avec Feijoo. In É. Herbinet & M.-C. Busnel (Eds.), *Les cahiers du nouveau-né Tome 5 : L'aube des sens* (pp. 100–107). Paris, France: Stock.

Hermans, D., Baeyens, F., & Eelen, P. (1998). Odours as affective-processing context for word evaluation: A case of cross-modal affective priming. *Cognition & Emotion*, *12*(4), 601–613. doi:10.1080/026999398379583

Hernandez-Reif, M., Field, T., Diego, M., Vera, Y., & Pickens, J. (2006). Happy faces are habituated more slowly by infants of depressed mothers. *Infant Behavior & Development*, *29*(1), 131–5. doi:10.1016/j.infbeh.2005.07.003

Heron-Delaney, M., Anzures, G., Herbert, J. S., Quinn, P. C., Slater, A. M., Tanaka, J. W., … Pascalis, O. (2011). Perceptual training prevents the emergence of the other race effect during infancy. *PloS One*, *6*(5), e19858. doi:10.1371/journal.pone.0019858

Hertenstein, M. J., & Campos, J. J. (2004). The retention effects of an adult's emotional displays on infant behavior. *Child Development*, *75*(2), 595–613. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00695.x

Herz, R. S. (2002). Influences of odors on mood and affective cognition. In C. Rouby, B. Schaal, D. Dubois, R. Gervais, & A. Holley (Eds.), *Olfaction, taste, and cognition* (pp. 160–177). Cambridge: Cambridge University Press.

Hess, U., Adams, R. B., & Kleck, R. E. (2007). Looking at you or looking elsewhere: The influence of head orientation on the signal value of emotional facial expressions. *Motivation and Emotion*, *31*(2), 137–144. doi:10.1007/s11031-007-9057-x

Hess, U., & Fischer, A. (2013). Emotional mimicry as social regulation. *Personality and Social Psychology Review*, *17*(2), 142–157. doi:10.1177/1088868312472607

Hess, U., & Fischer, A. (2014). Emotional mimicry: Why and When we mimic emotions. *Social and Personality Psychology Compass*, *8*(2), 45–57. doi:10.1111/spc3.12083

Hess, U., Houde, S., & Fischer, A. (2014). Do we mimic what we see or what we know? In C. von Scheve & M. Salmela (Eds.), *Collective Emotions.* (pp. 94–107). Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780199659180.001.0001

Heyes, C. (2001). Causes and consequences of imitation. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(6), 253–261. doi:10.1016/S1364-6613(00)01661-2

Hoehl, S. (2013). Emotion processing in infancy. In K. H. Lagattuta (Ed.), *Children and Emotion: New Insights into Developmental Affective Sciences* (Vol. 26, pp. 1–12). Basel: Karger. doi:10.1159/000354346

Hoehl, S., Palumbo, L., Heinisch, C., & Striano, T. (2008). Infants' attention is biased by emotional expressions and eye gaze direction. *Neuroreport*, *19*(5), 579–82. doi:10.1097/WNR.0b013e3282f97897

Hoehl, S., & Striano, T. (2008). Neural processing of eye gaze and threat-related emotional facial expressions in infancy. *Child Development*, *79*(6), 1752–60. doi:10.1111/j.1467-8624.2008.01223.x

Hoehl, S., & Striano, T. (2010a). Discrete emotions in infancy : Perception without production. *Emotion Review*, *2*(2), 132–133.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010b). Infants' neural processing of positive emotion and eye gaze. *Social Neuroscience*, *5*(1), 30–39.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010c). The development of emotional face and eye gaze processing. *Developmental Science*, *13*(6), 813–25. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00944.x

Hoehl, S., & Wahl, S. (2012). Recording infant ERP data for cognitive research. *Developmental Neuropsychology*, *37*(3), 187–209. doi:10.1080/87565641.2011.627958

Hoehl, S., Wiese, L., & Striano, T. (2008). Young infants' neural processing of objects is affected by eye gaze direction and emotional expression. *PloS One*, *3*(6), e2389. doi:10.1371/journal.pone.0002389

Holland, R. W., Hendriks, M., & Aarts, H. (2005). Smells like clean spirit. Nonconscious effects of scent on cognition and behavior. *Psychological Science*, *16*(9), 689–693. doi:10.1111/j.1467-9280.2005.01597.x

Hornik, R., Risenhoover, N., & Gunnar, M. (1987). The effects of maternal positive, neutral, and negative affective communications on infant responses to New Toys. *Child Development*, *58*(4), 937–944.

Hunnius, S., de Wit, T. C. J., Vrins, S., & von Hofsten, C. (2011). Facing threat: infants' and adults' visual scanning of faces with neutral, happy, sad, angry, and fearful emotional expressions. *Cognition & Emotion*, *25*(2), 193–205. doi:10.1080/15298861003771189

Hunnius, S., & Geuze, R. H. (2004). Developmental changes in visual scanning of dynamic faces and abstract stimuli in infants: A longitudinal study. *Infancy*, *6*(2), 231–255. doi:10.1207/s15327078in0602_5

Hyde, D. C., Jones, B. L., Flom, R., & Porter, C. L. (2011). Neural signatures of face–voice synchrony in 5-month-old human infants. *Developmental Psychobiology*, *53*, 359–370. doi:10.1002/dev.20525

Itier, R. J., & Taylor, M. J. (2002). Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: a repetition study using ERPs. *Neuroimage*, *15*(2), 353-372.

Izard, C. E., Fantauzzo, C. A., Castle, J. M., Haynes, O. M., Rayias, M. F., & Putnam, P. H. (1995). The ontogeny and significance of infants' facial expressions in the first 9 months of life. *Developmental Psychology*, *31*(6), 997–1013.

Jacobson, S. W. (1979). Matching behavior in the young infant. *Child Development*, *50*(2), 425. doi:10.2307/1129418

Jadauji, J. B., Djordjevic, J., Lundström, J. N., & Pack, C. C. (2012). Modulation of olfactory perception by visual cortex stimulation. *The Journal of Neuroscience*, *32*(9), 3095–100. doi:10.1523/JNEUROSCI.6022-11.2012

James, D. K. (2010). Fetal learning: A critical review. *Infant and Child Development*, *19*(1), 45–54. doi:10.1002/icd

Jones, W., & Klin, A. (2013). Attention to eyes is present but in decline in 2-6-month-old infants later diagnosed with autism. *Nature*, *504*(7480), 427–31. doi:10.1038/nature12715

Jouen, F., & Molina, M. (2000). Le rôle des flux sensoriels dans les débuts du développement. *Enfance*, *53*(3), 235–247.

Kaitz, M., Meschulach-Sarfaty, O., Auerbach, J., & Eidelman, A. (1988). A reexamination of newborns' ability to imitate facial expressions. *Developmental Psychology*, *24*(1), 3–7. doi:10.1037/0012-1649.24.1.3

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2000). *Principles of neural science* (4th ed., pp. 1227–1246). New York: McGraw-Hill.

Kanwisher, N. (2010). Functional specificity in the human brain: a window into the functional architecture of the mind. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(25), 11163–11170. doi:10.1073/pnas.1005062107

Kassam, K. S., Markey, A. R., Cherkassky, V. L., Loewenstein, G., & Just, M. A. (2013). Identifying emotions on the basis of neural activation. *PloS One*, *8*(6), e66032. doi:10.1371/journal.pone.0066032

Kestenbaum, R., & Nelson, C. A. (1990). The recognition and categorization of upright and inverted emotional expressions by 7-month-old infants. *Infant Behavior and Development*, *13*(4), 497–511. doi:10.1016/0163-6383(90)90019-5

Kirk-Smith, M. D., van Toller, C., & Dodd, G. H. (1983). Unconscious odour conditioning in human subjects. *Biological Psychology*, *17*(2-3), 221–231. doi:10.1016/0301-0511(83)90020-0

Kleiner, K. A., & Banks, M. S. (1987). Stimulus energy does not account for 2-month-olds' face preferences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*(4), 594–600. doi:10.1037//0096-1523.13.4.594

Kleiner, K., & Banks, M. (1987). Stimulus energy does not account for 2-month-olds' face preferences. *Journal of Experimental Psychology*, *13*(4), 594–600.

Klinnert, M. D. (1984). The regulation of infant behavior by maternal facial expression. *Infant Behavior and Development*, *7*(4), 447–465. doi:10.1016/S0163-6383(84)80005-3

Klucharev, V., & Sams, M. (2004). Interaction of gaze direction and facial expressions processing : ERP study. *Neuroreport*, *15*(4), 621–625. doi:10.1097/01.wnr.0000116052.55437

Kobiella, A., Grossmann, T., Reid, V., & Striano, T. (2008). The discrimination of angry and fearful facial expressions in 7-month-old infants: An event-related potential study. *Cognition & Emotion*, *22*(1), 134–146. doi:10.1080/02699930701394256

Kolassa, I., & Miltner, W. H. R. (2006). Psychophysiological correlates of face processing in social phobia. *Brain Research*, *1118*(2006), 130–141.

Kotsoni, E., De Haan, M., & Johnson, M. H. (2001). Categorical perception of facial expressions by 7-month-old infants. *Perception*, *30*(9), 1115–1125.

Kraut, R. E. (1982). Social presence, facial feedback, and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, *42*(5), 853–863. doi:10.1037/0022-3514.42.5.853

Kret, M. E., Roelofs, K., Stekelenburg, J. J., & de Gelder, B. (2013). Emotional signals from faces, bodies and scenes influence observers' face expressions, fixations and pupil-size. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 810. doi:10.3389/fnhum.2013.00810

Kret, M. E., Stekelenburg, J. J., Roelofs, K., & de Gelder, B. (2013). Perception of face and body expressions using electromyography, pupillometry and gaze measures. *Frontiers in Psychology, 4*, 28. doi:10.3389/fpsyg.2013.00028

Kreutzer, M. A., & Charlesworth, W. R. (1973, Mars). Infants' reactions to different expressions of emotions. Paper presented at *the biennial meeting of the Society for Research in Child Development*; Philadelphia.

Kuchuk, A., Vibbert, M., & Bornstein, M. H. (1986). The perception of smiling and its experiential correlates in three-month-old infants. *Child Development, 57*(4), 1054–1061.

LaBarbera, J., Izard, C., Vietze, P., & Parisi, S. (1976). Four- and Six-month-old infants' visual responses to joy, anger, and neutral expressions. *Child Development1*, *47*, 535–538.

Laird, J. D. (1974). Self-attribution of emotion: The effects of expressive behavior on the quality of emotional experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, *29*(4), 475–486. doi:10.1037/h0036125

Langford, D. J., Bailey, A. L., Chanda, M. L., Clarke, S. E., Drummond, T. E., Echols, S., ... & Mogil, J. S. (2010). Coding of facial expressions of pain in the laboratory mouse. *Nature methods*, *7*(6), 447-449.

Langton, S. R. H., Law, A. S., Burton, A. M., & Schweinberger, S. R. (2008). Attention capture by faces. *Cognition*, *107*(1), 330–342.

Le Grand, R., Mondloch, C. J., Maurer, D., & Brent, H. P. (2001). Early visual experience and face processing. *Nature, 410*(6831), 890. doi:10.1016/j.echo.2007.08.009

Legerstee, M., & Varghese, J. (2001). The role of maternal affect mirroring on social expectancies in three-month-old infants. *Child Development, 72*(5), 1301–1313. doi:10.1111/1467-8624.00349

Ledoux, J. E. (2000). Emotion circuit in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, *23*, 155–184.

Leleu, A., Demily, C., Franck, N., Durand, K., Schaal, B., & Baudouin, J.-Y. (2015). The odor context facilitates the perception of low-intensity facial expressions of emotion. *PloS One, 10*(9), e0138656. doi:10.1371/journal.pone.0138656

Leppanen, J. M., & Hietanen, J. K. (2003). Affect and face perception: odors modulate the recognition advantage of happy faces. *Emotion*, *3*(4), 315–326.

Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., & Nelson, C. A. (2007). An ERP study of emotional face processing in the adult and infant brain. *Child Development, 78*(1), 232–245. doi:10.1111/j.1467-8624.2007.00994.x.An

Leppänen, J. M., & Nelson, C. A. (2012). Early development of fear processing; *Current Directions in Psychological Science*, *21*(3), 200–204.

Lewkowicz, D. J. (2010). The ontogeny of human multisensory object perception: A constructivist account. In J. Kaiser & M. J. Naumer (Eds.), *Multisensory Object Perception in the Primate Brain* (pp. 303–327). New York: Springer New York. doi:10.1007/978-1-4419-5615-6

Lewkowicz, D. J., & Hansen-Tift, A. M. (2012). Infants deploy selective attention to the mouth of a talking face when learning speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(5), 1431–1436. doi:10.1073/pnas.1114783109

Lewkowicz, D. J., Leo, I., & Simion, F. (2010). Intersensory perception at birth: Newborns match nonhuman primate faces and voices. *Infancy*, *15*(1), 46–60. doi:10.1111/j.1532-7078.2009.00005.x

Lewkowicz, D. J., Minar, N. J., Tift, A. H., & Brandon, M. (2015). Perception of the multisensory coherence of fluent autiovisual speech in infancy: Its emergence and the role of experience. *Journal of Experimental Child Psychology*, *130*, 147–162.

Lewkowicz, D. J., & Röder, B. (2012). Development of multisensory processing and the role of early experience. In B. E. Stein (Ed.), *The New Handbook of multisensory processes* (pp. 607–6026). Cambridge: MIT Press.

Li, W., Moallem, I., Paller, K. A., & Gottfried, J. A. (2007). Subliminal smells can guide social preferences. *Psychological Science*, *18*(12), 1044–1049. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.02023.x

Li, W., Zinbarg, R. E., Boehm, S. G., & Paller, K. A. (2008). Neural and behavioral evidence for affective priming from unconsciously perceived emotional facial expressions and the influence of trait anxiety. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(1), 95–107.

Liddell, B. J., Brown, K. J., Kemp, A. H., Barton, M. J., Das, P., Peduto, A., … Williams, L. M. (2005). A direct brainstem-amygdala-cortical "alarm" system for subliminal signals of fear. *NeuroImage*, *24*(1), 235–243. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.08.016

Liu, S., Quinn, P. C., Wheeler, A., Xiao, N., Ge, L., & Lee, K. (2011). Similarity and difference in the processing of same- and other-race faces as revealed by eye tracking in 4- to 9-month-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(1), 180–189. doi:10.1016/j.jecp.2010.06.008

Liu, S., Xiao, W. S., Xiao, N. G., Quinn, P. C., Zhang, Y., Chen, H., … Lee, K. (2015). Development of visual preference for own- versus other-race faces in infancy. *Developmental Psychology*, *51*(4), 500–511. doi:10.1037/a0038835

Lorig, T. S., Mayer, T. S., Moore, F. H., & Warrenburg, S. (1993). Visual event-related potentials during odor labeling. *Chemical Senses*, *18*(4), 379–387. doi:10.1093/chemse/18.4.379

Lorig, T. S., Turner, J. M., Matia, D. C., & Warrenburg, S. (1995). The contingent negative variation in an odor labeling paradigm. *Psychophysiology*, *32*(4), 393–398. doi:10.1111/j.1469-8986.1995.tb01222.x

Ludemann, P. M. (1991). Generalized discrimination of positive facial expressions by seven- and ten-month-old infants. *Child Development*, *62*(1), 55–67.

Ludemann, P. M., & Nelson, C. A. (1988). Categorical representation of facial expressions by 7-month-old infants. *Developmental Psychology*, *24*(4), 492–501. doi:10.1037//0012-1649.24.4.492

Lundqvist, D., Esteves, F., & Ohman, A. (1999). The face of wrath: Critical features for conveying facial threat. *Cognition & Emotion*, *13*(6), 691–711. doi:10.1080/026999399379041

Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N., & Luo, Y. (2010). Three stages of facial expression processing : ERP study with rapid serial visual presentation. *NeuroImage*, *49*(2), 1857–1867. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.09.018

Macchi Cassia, V., Kuefner, D., Westerlund, A., & Nelson, C. A. (2006). A behavioural and ERP investigation of 3-month-olds' face preferences. *Neuropsychologia*, *44*(11), 2113–2125. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.014

Maestripieri, D. (1997). Gestural communication in macaques: usage and meaning of nonvocal signals. *Evolution of communication*, *1*(2), 193-222.

Marlier, L., Schaal, B., & Soussignan, R. (1998). Neonatal responsiveness to the odor of amniotic and lacteal fluids: a test of perinatal chemosensory continuity. *Child Development*, *69*(3), 611–623.

Martinez, A., & Du, S. (2012). A model of the perception of facial expressions of emotion by humans: Research overview and perspectives. *The Journal of Machine Learning Research*, *13*(1), 1589–1608.

Matsunaka, R., & Hiraki, K. (2014). Fearful gaze cueing: gaze direction and facial expression independently influence overt orienting responses in 12-month-olds. *PloS One*, *9*(2), e89567. doi:10.1371/journal.pone.0089567

Mathews, A., Fox, E., Yiend, J., & Calder, A. (2003). The face of fear: Effects of eye gaze and emotion on visual attention. *Visual Cognition*, *10*(7), 823–835. doi:10.1080/13506280344000095

Matsuzawa, J., Matsui, M., Konishi, T., Noguchi, K., Gur, R. C., Bilker, W., & Miyawaki, T. (2001). Age-related volumetric changes of brain gray and white matter in healthy infants and children. *Cerebral Cortex*, *11*, 335-342.

Maurer, D., Grand, R. Le, & Mondloch, C. J. (2002). The many faces of configural processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*(6), 255–260. doi:10.1016/S1364-6613(02)01903-4

Maurer, D., & Salapatek, P. (1976). Developmental changes in the scanning of faces by young infants. *Child Development*, *47*, 523–527.

Maurer, D., & Werker, J. F. (2014). Perceptual narrowing during infancy: A comparison of language and faces. *Developmental Psychobiology*, *56*(2), 154–78. doi:10.1002/dev.21177

McGlone, F., Österbauer, R., Demattè, L., & Spence, C. (2013). The crossmodal influence of odor hedonics on facial attractiveness: Behavioural and fMRI measures. In F. Signorelli & D. Chirchiglia (Eds.), *Functional Brain Mapping and the Endeavor to Understand the Working Brain* (pp. 209–225). Rijeka: InTech.

McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, *264*, 746–748.

Meltzoff, A. (2007). "Like me": A foundation for social cognition. *Developmental Science*, *10*(1), 126–134.

Meltzoff, A. N., & Decety, J. (2003). What imitation tells us about social cognition: A rapprochement between developmental psychology and cognitive neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, *358*, 491–500.

Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, *198*(4312), 75–78. doi:10.1126/science.198.4312.75

Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1997). Explaining facial imitation: A theoretical model. *Early Development and Parenting*, *6*(34), 179–192. doi:10.1002/(SICI)1099-0917(199709/12)6:3/4<179::AID-EDP157>3.3.CO;2-I

Moncrieff, R. W. (1966). *Odour preferences* (Vol.17). London: Leonard Hill.

Mondloch, C. J., Grand, R. Le, & Maurer, D. (2002). Configural face processing develops more slowly than featural face processing. *Perception*, *31*(5), 553–566. doi:10.1068/p3339

Mondloch, C. J., Lewis, T. L., Budreau, D. R., Maurer, D., Dannemiller, J. L., Stephens, B. R., & Kleiner-gathercoal, K. A. (1999). Face perception during early infancy. *Research Report*, *10*(5), 419–422.

Montague, D. P. F., & Walker-Andrews, A. S. (2001). Peekaboo: A new look at infants' perception of emotion expressions. *Developmental Psychology*, *37*(6), 826–838. doi:10.1037//0012-1649.37.6.826

Moody, E. J., McIntosh, D. N., Mann, L. J., & Weisser, K. R. (2007). More than mere mimicry? The influence of emotion on rapid facial reactions to faces. *Emotion*, *7*(2), 447–457.

Morris, J. S., & Dolan, R. J. (2002). Human amygdala responses to fearful eyes. *NeuroImage*, *17*(1), 214–222.

Morris, J. S., Ohman, A., & Dolan, R. J. (1999). A subcortical pathway to the right amygdala mediating "unseen" fear. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *96*, 1680–1685.

Morton, J., & Johnson, M. H. (1991). CONSPEC and CONLERN: A two-process theory of infant face recognition. *Psychological Review*, *98*(2), 164–181.

Moses, L. J., Baldwin, D. A., Rosicky, J. G., & Tidball, G. (2001). Evidence for referential understanding in the emotions domain at twelve and eighteen months. *Child Development*, *72*(3), 718–735. doi:10.1111/1467-8624.00311

Mujica-Parodi, L. R., Strey, H. H., Frederick, B., Savoy, R., Cox, D., Botanov, Y., … Weber, J. (2009). Chemosensory cues to conspecific emotional stress activate amygdala in humans. *PLoS ONE*, *4*(7).

N'Diaye, K., Sander, D., & Vuilleumier, P. (2009). Self-relevance processing in the human amygdala: gaze direction, facial expression, and emotion intensity. *Emotion*, *9*(6), 798–806.

Nahm, F. K. D., Perret, A., Amaral, D., & Albrught, T. (1997). How do monkeys look at faces? *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*(5), 611–623.

Nelson, C. A. (2001). The development and neural bases of face recognition. *Infant and Child Development*, *10*, 3–18.

Nelson, C. A., & De Haan, M. (1996). Neural correlates of infants' visual responsiveness to facial expressions of emotion. *Developmental Psychobiology*, *29*(7), 577–595.

Nelson, C. A., & Dolgin, K. G. (1985). The generalized discrimination of facial expressions by seven-month-old infants. *Child Development*, *56*, 58–61.

Nelson, C. A., Morse, P. A., & Leavitt, L. A. (1979). Recognition of facial expressions by seven-month-old infants. *Child Development*, *50*, 1239–1242.

Neth, D., & Martinez, A. M. (2009). Emotion perception in emotionless face images suggests a norm-based representation. *Journal of Vision*, *9*(1), 1–11.

Neth, D., & Martinez, A. M. (2010). A computational shape-based model of anger and sadness justifies a configural representation of faces. *Vision Research*, *50*(17), 1693–711. doi:10.1016/j.visres.2010.05.024

Neumann, R., & Lozo, L. (2012). Priming the activation of fear and disgust: evidence for semantic processing. *Emotion*, *12*(2), 223–8. doi:10.1037/a0026500

Niedenthal, P. M. (2007). Embodying emotion. *Science*, *316*(5827), 1002–1005.

Niedenthal, P. M., Barsalou, L. W., Winkielman, P., Krauth-Gruber, S., & Ric, F. (2005). Embodiment in attitudes, social perception, and emotion. *Personality and Social Psychology Review*, *9*(3), 184–211.

Niedenthal, P. M., Brauer, M., Halberstadt, J. B., & Innes-Ker, A. H. (2001). When did her smile drop? Facial mimicry and the influences of emotional state on the detection of change in emotional expression. *Cognition Emotion*, *15*(6), 853–864.

Niedenthal, P. M., Halberstadt, J. B., Margolin, J., & Innes-Ker, S. H. (2000). Emotional state and the detection of change in facial expression of emotion. *European Journal of Social Psychology*, *30*(2), 211–222. doi:10.1002/(SICI)1099-0992(200003/04)30:2<211::AID-EJSP988>3.0.CO;2-3

Niedenthal, P. M., Mermillod, M., Maringer, M., & Hess, U. (2010). The Simulation of Smiles (SIMS) model: Embodied simulation and the meaning of facial expression. *The Behavioral and Brain Sciences*, *33*(6), 417–433. doi:10.1017/S0140525X10000865

Oakes, L. M., & Ellis, A. E. (2013). An eye-tracking investigation of developmental changes in infants' exploration of upright and inverted human faces Lisa. *Infancy*, *18*(1), 1–13. doi:10.1111/j.1532-7078.2011.00107.x.An

Oberman, L. M., Winkielman, P., & Ramachandran, V. S. (2007). Face to face: blocking facial mimicry can selectively impair recognition of emotional expressions. *Social Neuroscience*, *2*(3-4), 167–178.

Oster, H. (2007). Baby-FACS: *Facial Action Coding System for infants and young children*. Copyright © Harriet Oster, New York University.

Oster, H., Hegley, D., & Nagel, L. (1992). Adult judgements and fine-grained analysis of infant facial expressions : testing the validity of a priori coding formulas. *Developmental Psychology*, *28*(6), 1115–1131.

Otte, R. A., Donkers, F. C. L., Braeken, M. A. K. A., & Bergh, B. R. H. Van Den. (2015). Brain and Cognition Multimodal processing of emotional information in 9-month-old infants I : Emotional faces and voices. *Brain and Cognition*, *95*, 99–106. doi:10.1016/j.bandc.2014.09.007

Parr, L. a, & Heintz, M. (2009). Facial expression recognition in rhesus monkeys, Macaca mulatta. *Animal Behaviour*, *77*(6), 1507–1513. doi:10.1016/j.anbehav.2009.02.024

Parr, L. a, Waller, B. M., & Heintz, M. (2008). Facial expression categorization by chimpanzees using standardized stimuli. *Emotion*, *8*(2), 216–31. doi:10.1037/1528-3542.8.2.216

Parr, L. A., Waller, B. M., Vick, S. J., & Bard, K. A. (2007). Classifying chimpanzee facial expressions using muscle action. *Emotion*, *7*(1), 172.

Pascalis, O., de Schonen, S., Morton, J., Deruelle, C., & Fabre-Grenet, M. (1995). Mother's face recognition by neonates: A replication and an extension. *Infant Behavior and Development*, *18*(1), 79–85. doi:10.1016/0163-6383(95)90009-8

Pascalis, O., & Kelly, D. J. (2009). The origins of face processing in humans: phylogeny an ontegeny. *Perspectives on Psychological Science*, *4*(2), 200–209.

Pascalis, O., Scott, L. S., Kelly, D. J., Shannon, R. W., Nicholson, E., Coleman, M., & Nelson, C. A. (2005). Plasticity of face processing in infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(14), 5297-5300.

Patterson, M. L., & Werker, J. F. (2003). Two-month-old infants match phonetic information in lips and voice. *Developmental Science*, *6*(2), 191–196. doi:10.1111/1467-7687.00271

Pause, B. M., Ohrt, A., Prehn, A., & Ferstl, R. (2004). Positive emotional priming of facial affect perception in females is diminished by chemosensory anxiety signals. *Chemical Senses*, *29*(9), 797–805. doi:10.1093/chemse/bjh245

Pell, M. D. (2005). Prosody–face interactions in emotional processing as revealed by the facial affect decision task. *Journal of Nonverbal Behavior*, *29*(4), 193–215. doi:10.1007/s10919-005-7720-z

Pelphrey, K. A., Sasson, N. J., Reznick, J. S., Paul, G., Goldman, B. D., & Piven, J. (2002). Visual scanning of faces in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *32*(4), 249–261.

Peltola, M. J., Hietanen, J. K., Forssman, L., & Leppänen, J. M. (2013). The emergence and stability of the attentional bias to fearful faces in infancy. *Infancy*, *18*(6), 905–926. doi:10.1111/infa.12013

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Mäki, S., & Hietanen, J. K. (2009). Emergence of enhanced attention to fearful faces between 5 and 7 months of age. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *4*(2), 134–42. doi:10.1093/scan/nsn046

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Palokangas, T., & Hietanen, J. K. (2008). Fearful faces modulate looking duration and attention disengagement in 7-month-old infants. *Developmental science*, *11*(1), 60-68.

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Vogel-farley, V. K., Hietanen, J. K., & Nelson, C. A. (2010). Fearful faces but not fearful eyes alone delay attention disengagement in 7-month-old infants. *Emotion*, *9*(4), 560–565. doi:10.1037/a0015806.Fearful

Pessoa, L., & Adolphs, R. (2010). Emotion processing and the amygdala: from a "low road" to "many roads" of evaluating biological significance. *Nature Neuroscience*, *11*(11), 773–783. doi:10.1038/nrn2920.Emotion

Peykarjou, S., Pauen, S., & Hoehl, S. (2014). How do 9-month-old infants categorize human and ape faces? A rapid repetition ERP study. *Psychophysiology*, *51*(9), 866-878.

Phillips, A. T., Wellman, H. M., & Spelke, E. S. (2002). Infants' ability to connect gaze and emotional expression to intentional action. *Cognition*, *85*(1), 53–78.

Phillips, M. L., Drevets, W. C., Rauch, S. L., & Lane, R. (2003). Neurobiology of emotion perception I: The neural basis of normal emotion perception. *Biological Psychiatry*, *54*(5), 504–514.

Phillips, M. L., & Heining, M. (2002). Neural correlates of emotion perception from face to taste. In C. Rouby, B. Schaal, D. Dubois, R. Gervais, & A. Holley (Eds.), *Olfaction, taste and cognition* (pp. 196–208). Cambridge: Cambridge University Press.

Ponari, M., Conson, M., D'Amico, N. P., Grossi, D., & Trojano, L. (2012). Mapping correspondence between facial mimicry and emotion recognition in healthy subjects. *Emotion*, (Experiment 1), 1–7. doi:10.1037/a0028588

Pons, F., Lewkowicz, D. J., Soto-faraco, S., & Sebastian-Gallés, M. (2009). Narrowing of intersensory speech perception. *PNAS*, *106*(26), 10598–10602.

Pourtois, G., Dan, E. S., Grandjean, D., Sander, D., & Vuilleumier, P. (2005). Enhanced extrastriate visual response to bandpass spatial frequency filtered fearful faces : Time course and topographic evoked-potentials mapping. *Human Brain Mapping*, *26*, 65–79. doi:10.1002/hbm.20130

Pourtois, G., Sander, D., Andres, M., Grandjean, D., Reveret, L., Olivier, E., & Vuilleumier, P. (2004). Dissociable roles of the human somatosensory and superior temporal cortices for processing social face signals. *European Journal of Neuroscience*, *20*, 3507–3515. doi:10.1111/j.1460-9568.2004.03794.x

Preston, S. D., & de Waal, F. B. M. (2002). Empathy: Its ultimate and proximate bases. *Behavioral and Brain Sciences, 25*, 1-71.

Qureshy, A., Kawashima, R., Imran, M. B., Sugiura, M., Goto, R., Okada, K. E. N., … Fukuda, H. (2000). Functional mapping of human brain in olfactory processing : A PET study. *Journal of Neurophysiology*, *84*(3), 1656–1666.

Reid, V. M., & Striano, T. (2005). Adult gaze influences infant attention and object processing: implications for cognitive neuroscience. *The European Journal of Neuroscience*, *21*(6), 1763–1766. doi:10.1111/j.1460-9568.2005.03986.x

Reid, V. M., Striano, T., Kaufman, J., & Johnson, M. H. (2004). Eye gaze cueing facilitates neural processing of objects in 4-month-old infants. *Neuroreport*, *15*(16), 2553–2555.

Reynolds, G. D., Bahrick, L. E., Lickliter, R., & Guy, M. W. (2014). Neural correlates of intersensory processing in five-month-old infants. *Developmental Psychobiology*, *56*(3), 355–372. doi:10.1002/dev.21104.Neural

Reynolds, G. D., & Richards, J. E. (2005). Familiarization, attention, and recognition memory in infancy: an event-related potential and cortical source localization study. *Developmental Psychology*, *41*(4), 598–615. doi:10.1037/0012-1649.41.4.598

Richard, D., & Orsal, D. (2007). *Neurophysiologie : Organisation et fonctionnement du système nerveux.* (3ème ed.). Paris: Dunod.

Richards, J.E. (2001). Attention in young infants: A developmental psychophysiological perspective. In C.A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (1st ed., pp. 321-338). Cambridge MA: Wisconsin: MIT Press.

Richards, J. E., Reynolds, G. D., & Courage, M. L. (2010). The neural bases of infant attention. *Current Directions in Psychological Science*, *19*(1), 41–46. doi:10.1177/0963721409360003.The

Rigato, S., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2010). The shared signal hypothesis and neural responses to expressions and gaze in infants and adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *5*(1), 88–97. doi:10.1093/scan/nsp037

Rigato, S., Menon, E., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2013). The shared signal hypothesis: effects of emotion-gaze congruency in infant and adult visual preferences. *The British Journal of Developmental Psychology*, *31*(1), 15–29. doi:10.1111/j.2044-835X.2011.02069.x

Rigato, S., Menon, E., Johnson, M. H., & Farroni, T. (2011). The interaction between gaze direction and facial expressions in newborns. *European Journal of Developmental Psychology*, *8*(5), 624–636.

Righart, R., & de Gelder, B. (2008a). Rapid influence of emotional scenes on encoding of facial expressions: An ERP study. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *3*(3), 270–278.

Righart, R., & de Gelder, B. (2008b). Recognition of facial expressions is influenced by emotional scene gist. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *8*(3), 264–272. doi:10.3758/CABN.8.3.264

Riskind, J. H., & Gotay, C. C. (1982). Physical posture: Could it have regulatory or feedback effects on motivation and emotion? *Motivation and Emotion*, *6*(3), 273–298. doi:10.1007/BF00992249

Ritchie, R. G. (1986). Momentary affect and attention allocation. *Motivation and Emotion*, *10*(4), 387–395. doi:10.1007/BF00992111

Robbins, R. a, Nishimura, M., Mondloch, C. J., Lewis, T. L., & Maurer, D. (2010). Deficits in sensitivity to spacing after early visual deprivation in humans: a comparison of human faces, monkey faces, and houses. *Developmental Psychobiology*, *52*(8), 775–81. doi:10.1002/dev.20473

Robinson, C. W., & Sloutsky, V. M. (2010). Development of cross-modal processing. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *1*(1), 135–141. doi:10.1002/wcs.12

Rose, S. a, Jankowski, J. J., & Feldman, J. F. (2008). The inversion effect in infancy: the role of internal and external features. *Infant Behavior & Development*, *31*(3), 470–80. doi:10.1016/j.infbeh.2007.12.015

Rosenblum, L. D., Schmuckler, M. A., & Johnson, J. A. (1997). The McGurk effect in infants. *Perception & Psychophysics*, *59*(3), 347–357.

Rosenstein, D., & Oster, H. (1988). Differential facial response to four basic tastes in newborns. *Child Development, 59*,1555-1568.

Rossion, B., & Jacques, C. (2011). The N170: Understanding the time course of face perception in the human brain. In S. Luck & E. Kappenman (Eds.), *The Oxford handbook of ERP components* (pp 115-142). Oxford, UK: Oxford University Press.

Royet, J. P., Zald, D., Versace, R., Costes, N., Lavenne, F., Koenig, O., & Gervais, R. (2000). Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual, and auditory stimuli: a positron emission tomography study. *The Journal of neuroscience, 20*(20), 7752–7759.

Rubin, C. B., Fagen, J. W., & Carroll, M. H. (1998). Olfactory context and memory retrieval in 3-month-old infants. *Infant Behavior & Development*, *21*(4), 641–658.

Rubin, D., Botanov, Y., Hajcak, G., & Mujica-Parodi, L. R. (2012). Second-hand stress: Inhalation of stress sweat enhances neural response to neutral faces. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *7*(2), 208–212.

Russell, J. A. (2003). Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychological Review*, *110*(1), 145–172. doi:10.1037/0033-295X.110.1.145

Russell, J. A., & Fernández-Dols, J. M. (1997). *The psychology of facial expression*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sai, F. Z. (2005). The role of the mother's voice in developing mother's face preference : Evidence for intermodal perception at birth. *Infant and Child Development*, *14*, 29–50. doi:10.1002/icd.

Sandem, A. I., Janczak, A. M., Salte, R., & Braastad, B. O. (2006). The use of diazepam as a pharmacological validation of eye white as an indicator of emotional state in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 96, 177–183

Sander, D., Grandjean, D., Kaiser, S., Wehrle, T., & Scherer, K. R. (2007). Interaction effects of perceived gaze direction and dynamic facial expression: Evidence for appraisal theories of emotion. *European Journal of Cognitive Psychology*, *19*(3), 470–480. doi:10.1080/09541440600757426

Sann, C., & Streri, A. (2007). Perception of object shape and texture in human newborns : evidence from cross-modal transfer tasks. *Developmental Science*, *10*(3), 399–410. doi:10.1111/j.1467-7687.2007.00593.x

Sato, W., Kochiyama, T., Yoshikawa, S., & Matsumura, M. (2001). Emotional expression boosts early visual processing of the face: ERP recording and its decomposition by independent component analysis. *Neuroreport*, *12*(4), 709–714. doi:10.1097/00001756-200103260-00019

Savic, I. (2002). Imaging of brain activation by odorants in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(4), 455–461. doi:10.1016/S0959-4388(02)00346-X

Schaal, B. (1988). Olfaction in infants and children : developmental and functional perspectives. *Chemical Senses*, *13*(2), 145–190.

Schaal, B. (1997). L'olfaction : développement de la fonction et fonctions au cours du développement. *Enfance*, *50*(1), 5–20. doi:10.3406/enfan.1997.3041

Schaal, B. (2012). Emerging chemosensory preferences: Another playground for the innate-acquired dichotomy in human cognition. In G. M. Zucco, R. S. Herz, & B. Schaal (Eds.), *Olfactory Cognition: From perception and memory to environmental odours and neuroscience* (Vol. 85, pp. 237–268). Amsterdam: John Benjamins Publishing Company. doi:10.1075/aicr.85

Schaal, B., Coureaud, G., Doucet, S., Delaunay-El Allam, M., Moncomble, A.-S., Montigny, D., … Holley, A. (2009). Mammary olfactory signalization in females and odor processing in neonates: Ways evolved by rabbits and humans. *Behavioural Brain Research*, *200*(2), 346–358. doi:10.1016/j.bbr.2009.02.008

Schaal, B., Doucet, S., Hertling, E., Sagot, P., & Soussignan, R. (2006). Human breast areolae as scent organs : Morphological data and possible involvement in maternal-neonatal coadaptation. *Developmental Psychobiology*, *48*, 100–110. doi:10.1002/dev.20122

Schaal, B., & Durand, K. (2012). The role of olfaction in human multisensory development. In A. J. Bremmer, D. Lewkowocz, & S. Charles (Eds.), *Multisensory Development* (pp. 29–62). Oxford: Oxford University Press.

Schaal, B., Marlier, L., & Soussignan, R. (2000). Human foetuses learn odours from their pregnant mother's diet. *Chemical Senses*, *25*(6), 729–737.

Schmid, P. C., & Schmid Mast, M. (2010). Mood effects on emotion recognition. *Motivation and Emotion*, *34*(3), 288–292. doi:10.1007/s11031-010-9170-0

Schmidt, H., & Beauchamp, G. K. (1989). Sex differences in responsiveness to odors in 9-month-old infants. Chemical Senses, 14, 744.

Schmidt, K. L., & Cohn, J. F. (2001). Human facial expressions as adaptations: Evolutionary questions in facial expression research. *American Journal of Physical Anthropology*, *S33*, 3–24. doi:10.1002/ajpa.20001

Schrammel, F., Pannasch, S., Graupner, S.-T., Mojzisch, A., & Velichkovsky, B. M. (2009). Virtual friend or threat? The effects of facial expression and gaze interaction on psychophysiological responses and emotional experience. *Psychophysiology*, *46*(5), 922–931.

Schupp, H. T., Öhman, A., Junghöfer, M., Weike, A. I., Stockburger, J., & Hamm, A. O. (2004). The facilitated processing of threatening faces : An ERP analysis. *Emotion*, *4*(2), 189–200. doi:10.1037/1528-3542.4.2.189

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*, *14*(13), 1–16. doi:10.1167/14.13.14.doi

Schwartz, G. M., Izard, C. E., & Ansul, S. E. (1985). The 5-Month-Old's Ability to Discriminate Facial Expressions of Emotion. *Infant Behavior and Development*, *8*(1), 65–77.

Schwarzer, G., & Zauner, N. (2003). Face processing in 8-month-old infants: evidence for configural and analytical processing. *Vision Research*, *43*(26), 2783–2793.

Schyns, P., Bonnar, L., & Gosselin, F. (2002). Show me the features! Understanding recognition from the use of visual information. *Psychological Science*, *13*(5), 402–409.

Schyns, P. G., Petro, L. S., & Smith, M. L. (2007). Report dynamics of visual information integration in the brain for categorizing facial expressions. *Current Biology*, *17*, 1580–1585. doi:10.1016/j.cub.2007.08.048

Schyns, P. G., Petro, L. S., & Smith, M. L. (2009). Transmission of facial expressions of emotion co-evolved with their efficient decoding in the brain: Behavioral and brain evidence. *PloS One*, *4*(5), e5625. doi:10.1371/journal.pone.0005625

Scott, L. S., & Monesson, A. (2009). The origin of biases in face perception. *Psychological Science*, *20*(6), 676-680.

Seigneuric, A., Durand, K., Jiang, T., Baudouin, J.-Y., & Schaal, B. (2010). The nose tells it to the eyes: crossmodal associations between olfaction and vision. *Perception*, *39*(11), 1541–1554.

Seo, H.-S., Roidl, E., Müller, F., & Negoias, S. (2010). Odors enhance visual attention to congruent objects. *Appetite*, *54*(3), 544–9. doi:10.1016/j.appet.2010.02.011

Serrano, J., Iglesias, J., & Loeches, A. (1992). Visual discrimination and recognition of facial expressions of anger, fear, and surprise in 4- to 6-month-old infants. *Developmental Psychobiology*, *25*(6), 411–425.

Serrano, J. M., Iglesias, J., & Loeches, A. (1995). Infants' responses to adult static facial expressions. *Infant Behavior and Development*, *18*(4), 477–482. doi:10.1016/0163-6383(95)90036-5

Seubert, J., Kellermann, T., Loughead, J., Boers, F., Brensinger, C., Schneider, F., & Habel, U. (2010). Processing of disgusted faces is facilitated by odor primes: a functional MRI study. *NeuroImage*, *53*(2), 746–756. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.07.012

Seubert, J., Loughead, J., Kellermann, T., Boers, F., Brensinger, C. M., & Habel, U. (2010). Multisensory integration of emotionally valenced olfactory–visual information in patients with schizophrenia and healthy controls. *Journal of Psychiatry Neuroscience*, *35*(3), 185–194.

Shasteen, J. R., Sasson, N. J., & Pinkham, A. E. (2014). Eye tracking the face in the crowd task: Why are angry faces found more quickly? *PLoS ONE*, *9*(4).

Simion, F., Leo, I., Turati, C., Valenza, E., & Dalla Barba, B. (2007). How face specialization emerges in the first months of life. *Progress in Brain Research*, *164*, 169–185.

Simion, F., Macchi Cassia, V., & Turati, C. (2001). The origins of face perception : Specific versus non-specific. *Infant and Child Development*, *10*, 59–65.

Smith, C. A. (1989). Dimensions of appraisal and physiological response in emotion. *Journal of personality and social psychology*, *56*(3), 339.

Smith, M. L., Cottrell, G. W., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions. *Psychological Science*, *16*, 184–189.

Smith, E., Weinberg, A., Moran, T., & Hajcak, G. (2013). Electrocortical responses to NIMSTIM facial expressions of emotion. *International Journal of Psychophysiology*, *88*(1), 17–25. doi:10.1016/j.ijpsycho.2012.12.004

Sobel, N., Prabhakaran, V., Hartley, C. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., Sullivan, E. V, & Gabrieli, J. D. (1999). Blind smell: brain activation induced by an undetected air-borne chemical. *Brain*, *122*(2), 209–217. doi:10.1093/brain/122.2.209

Sorce, J. F., Emde, R. N., Campos, J. J., & Klinnert, M. D. (1985). Maternal emotional signaling: Its effect on the visual cliff behavior of 1-year-olds. *Developmental Psychology*, *21*(1), 195–200. doi:10.1037/0012-1649.21.1.195

Sotocinal, S. G., Sorge, R. E., Zaloum, A., Tuttle, A. H., Martin, L. J., Wieskopf, J. S., ... & Mogil, J. S. (2011). The Rat Grimace Scale: a partially automated method for quantifying pain in the laboratory rat via facial expressions. *Molecular pain*, *7*(1), 55.

Soussignan, R. (2002). Duchenne smile, emotional experience, and autonomic reactivity: A test of the facial feedback hypothesis. *Emotion*, *2*(1), 52–74. doi:10.1037//1528-3542.2.1.52

Soussignan, R., Chadwick, M., Philip, L., Conty, L., Dezecache, G., & Grèzes, J. (2013). Self-relevance appraisal of gaze direction and dynamic facial expressions: effects on facial electromyographic and autonomic reactions. *Emotion*, *13*(2), 330–7. doi:10.1037/a0029892

Soussignan, R., Courtial, A., Canet, P., Danon-Apter, G., & Nadel, J. (2011). Human newborns match tongue protrusion of disembodied human and robotic mouths. *Developmental Science*, *14*(2), 385–394. doi:10.1111/j.1467-7687.2010.00984.x

Soussignan, R. & Schaal, B. (1996). Children's facial responsiveness to odors: Influences of hedonic valence of odor, gender, age and social presence. *Developmental Psychology*, *32*, 367-379.

Soussignan, R., & Schaal, B. (2001). Les systèmes émotionnels chez le nouveau-né humain : invariance et malléabilité des réponses aux odeurs. *Enfance*, *53*(3), 236–246.

Soussignan, R., Schaal, B., Boulanger, V., Garcia, S., & Jiang, T. (2015). Emotional communication in the context of joint attention for food stimuli: effects on attentional and affective processing. *Biological Psychology*, *104*, 173–83. doi:10.1016/j.biopsycho.2014.12.006

Soussignan, R., Schaal, B., & Marlier, L. (1999). Olfactory alliesthesia in human neonates: prandial state and stimulus familiarity modulate facial and autonomic responses to milk odors. *Developmental Psychobiology*, *35*(1), 3–14.

Soussignan, R., Schaal, B., Marlier, L., & Jiang, T. (1997). Facial and autonomic responses to biological and artificial olfactory stimuli in human neonates: Re-examining early hedonic discrimination of odors. *Physiology and Behavior*, *62*(4), 745–758.

Spelt, D. K. (1948). The conditioning of the human fetus in utero. *Journal of Experimental Psychology*, *38*(3), 338–346.

Spezio, M. L., Adolphs, R., Hurley, R. S. E., & Piven, J. (2007). Analysis of face gaze in autism using "Bubbles". *Neuropsychologia*, *45*(1), 144–51. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.027

Steinberg, C., Dobel, C., Schupp, H. T., Kissler, J., Elling, L., Pantev, C., & Junghöfer, M. (2012). Rapid and highly resolving: affective evaluation of olfactorily conditioned faces. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(1), 17–27.

Steiner, J. E. (1979). Human facial expressions in response to taste and smell stimulation. *Advances in Child Development and Behavior*, *13*, 257–295.

Stenberg, G. (2003). Effects of maternal inattentiveness on infant social referencing. *Infant and Child Development*, *12*(5), 399–419.

Stevenson, M. B., Roach, M. A., Ver Hoeve, J. N., & Leavitt, L. A. (1990). Feeding : In the dialogue of infant preterm and term Infants. *Infant Behavior & Development*, *13*(1), 51–70.

Streri, A. (2012). Crossmodal interactions in the human newborn : New answers to Molyneux's question. In A. J. Bremner, D. J. Lewkowicz, & C. Spence (Eds.), *Multisensory Development* (pp. 88–111). Oxford: Oxford university press.

Streri, A., & Gentaz, E. (2003). Cross-modal recognition of shape from hand to eyes in human newborns. *Somatosensry & Motor Research*, *20*(1), 13–18. doi:10.1080/0899022031000083799

Streri, A., & Milhet, S. (1988). Equivalences intermodales de la forme des objets entre la vision et le toucher chez les bébés de 2 mois. *L'année Psychologique*, *88*(3), 329–341.

Striano, T., Brennan, P. A., & Vanman, E. J. (2002). Maternal depressive symptoms and 6-month-old infants' sensitivity to facial expressions. *Infancy*, *3*(1), 115–126. doi:10.1207/15250000252828271

Striano, T., Kopp, F., Grossmann, T., & Reid, V. M. (2006). Eye contact influences neural processing of emotional expressions in 4-month-old infants. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *1*(2), 87–94. doi:10.1093/scan/nsl008

Striano, T., & Reid, V. M. (2006). Social cognition in the first year. *Trends in Cognitive Science*, *10*(10), 471-476.

Striano, T., & Rochat, P. (2000). Emergence of selective social referencing in infancy. *Infancy*, *1*(2), 253–264.

Striano, T., & Vaish, A. (2006). Seven- to 9-month-old infants use facial expressions to interpret others' actions. *British Journal of Developmental Psychology*, *24*(4), 753–760.

Striano, T., Vaish, A., & Benigno, J. P. (2006). The meaning of infants' looks: Information seeking and comfort seeking? *British Journal of Developmental Psychology*, *24*(3), 615–630.

Sugden, N., Miller, A., Rutten, C., & Moulson, M. (2015, juin). Sum faces to learn: How infants' quantity of natural, daily exposure to faces predicts learning. Communication présentée au 45e congrès de la Jean Piaget Society, Toronto, Ontario, Canada.

Sullivan, R. M., Taborsky-barba, S., Mendoza, R., Itano, A., Leon, M., Cotman, C. W., … Lott, I. (1991). Olfactory classical conditioning in neonates. *Pediatrics*, *87*(4), 511–518.

Suslow, T., Konrad, C., Kugel, H., Rumstadt, D., Zwitserlood, P., Schöning, S., … Dannlowski, U. (2010). Automatic mood-congruent amygdala responses to masked facial expressions in major depression. Biological. *Biological Psychiatry*, *67*(2), 155–160.

Susskind, J. M., & Anderson, A. K. (2008). Facial expression form and function. *Communicative & Integrative Biology*, *1*(2), 148–149. doi:10.1038/nn.2138.148

Susskind, J. M., Lee, D. H., Cusi, A., Feiman, R., Grabski, W., & Anderson, A. K. (2008). Expressing fear enhances sensory acquisition. *Nature Neuroscience*, *11*(7), 843–850.

Sweeny, T. D., Grabowecky, M., Suzuki, S., & Paller, K. A. (2009). Long-lasting effects of subliminal affective priming from facial expressions. *Consciousness and Cognition*, *18*(4), 929–938. doi:10.1016/j.concog.2009.07.011

Symons, L. A., Hains, S. M., & Muir, D. W. (1998). Look at me: Five-month-old infants' sensitivity to very small deviations in eye-gaze during social interactions. *Infant Behavior and Development*, *21*(3), 531–536. doi:10.1016/S0163-6383(98)90026-1

Termine, N. T., & Izard, C. E. (1988). Infants' responses to their mothers' expressions of joy and sadness. *Developmental Psychology*, *24*(2), 223–229. doi:10.1037/0012-1649.24.2.223

Todrank, J., Byrnes, D., Wrzesniewski, A., & Rozin, P. (1995). Odors can change preferences for people in photographs: A cross-modal evaluative conditioning study with olfactory USs and visual CSs. *Learning and Motivation*, *26*(2), 116–140. doi:10.1016/0023-9690(95)90001-2

Tottenham, N., Tanaka, J. W., Leon, A. C., McCarry, T., Nurse, M., Hare, T. A., & Nelson, C.A. (2009). The NimStim set of facial expressions: judgments from untrained research participants. Psychiatry research, 168, 242-249.

Turati, C., Macchi Cassia, V., Simion, F., & Leo, I. (2006). Newborns' face recognition: Role of inner and outer facial features. *Child Development*, *77*(2), 297–311. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00871.x

Turati, C., Simion, F., Milani, I., & Umiltà, C. (2002). Newborns' preference for faces: What is crucial? *Developmental Psychology*, *38*(6), 875–882. doi:10.1037//0012-1649.38.6.875

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), 454–61. doi:10.1006/nimg.2001.0979

Utama, N. P., Takemoto, A., Koike, Y., & Nakamura, K. (2009). Phased processing of facial emotion : An ERP study. *Neuroscience Research*, *62*, 30–40. doi:10.1016/j.neures.2009.01.009

Vaillant-Molina, M., Bahrick, L. E., & Flom, R. (2013). Young infants match facial and vocal emotional expressions of other infants. *Infancy*, *18*(S1), E97–E111. doi:10.1111/infa.12017.Young

Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are created equal: the negativity bias in social-emotional development. *Psychological Bulletin*, *134*(3), 383–403. doi:10.1037/0033-2909.134.3.383

Valenza, E., Simion, F., Cassia, V. M., & Umiltà, C. (1996). Face preference at birth. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*(4), 892–903.

Vanderwert, R. E., Westerlund, A., Montoya, L., McCormick, S. a, Miguel, H. O., & Nelson, C. A. (2014). Looking to the eyes influences the processing of emotion on face-sensitive event-related potentials in 7-month-old infants. *Developmental Neurobiology*, *75*(10), 1154-1163. doi:10.1002/dneu.22204

Vernet, M., Baudouin, J.-Y., & Franck, N. (2008). Categorical perception of facial emotion in schizophrenia. *Cognitive Neuropsychiatry*, 13 (1), 59-73.

Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-In: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, *26*(3), 280-306.

Vick, S. J., Waller, B. M., Parr, L. A., Pasqualini, M. C. S., & Bard, K. A. (2007). A cross-species comparison of facial morphology and movement in humans and chimpanzees using the facial action coding system (FACS).*Journal of Nonverbal Behavior*, *31*(1), 1-20.

Vinter, A. (1986). The role of movement in eliciting early imitations. *Child Development*, *57*, 66–71.

Vogel, M., Monesson, A., & Scott, L. S. (2012). Building biases in infancy: The influence of race on face and voice emotion matching. *Developmental Science*, *15*(3), 359–72. doi:10.1111/j.1467-7687.2012.01138.x

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*, 829–841.

Wada, Y., Inada, Y., Yang, J., Kunieda, S., Masuda, T., Kimura, A., … Yamaguchi, M. K. (2012). Infant visual preference for fruit enhanced by congruent in-season odor. *Appetite, 58*(3), 1070–1075. doi:10.1016/j.appet.2012.02.002

Wagner, S., Issanchou, S., Chabanet, C., Lange, C., Schaal, B., & Monnery-Patris, S. (2014). Liking the odour, liking the food. Toddlers' liking of strongly flavoured foods correlates with liking of their odour. *Appetite, 81*, 60-66.

Wagner, S., Issanchou, S., Chabanet, C., Marlier, L., Schaal, B., & Monnery-Patris, S. (2013). Infants' hedonic responsiveness to food odours: a longitudinal study during and after weaning (8, 12 and 22 months). *Flavour*,*2*(1), 19.

Walker, A. S. (1982). Intermodal perception of expressive behaviors by human infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *33*(3), 514–535.

Walker-Andrews, A. S. (1986). Intermodal perception of expressive behaviors: Relation of eye and voice? *Developmental Psychology*, *22*(3), 373–377.

Walker-Andrews. A. S. (1988). Infants' perception of the affordances of expressive behaviors. *Advances in Infancy Research, 5*, 173–221.

Walker-Andrews, A. S. (1997). Infants' perception of expressive behaviors: differentiation of multimodal information. *Psychological Bulletin*, *121*(3), 437–456.

Walker-Andrews, A. S., & Lennon, E. (1991). Infants' discrimination of vocal expressions: Contributions of auditory and visual information. *Infant Behavior and Development*, *14*(2), 131–142.

Walla, P. (2008). Olfaction and its dynamic influence on word and face processing: cross-modal integration. *Progress in Neurobiology*, *84*(2), 192–209. doi:10.1016/j.pneurobio.2007.10.005

Walla, P., & Deecke, L. (2010). Odours influence visually induced emotion: Behavior and neuroimaging. *Sensors*, *10*(9):8185-97 doi:10.3390/s100908185

Walla, P., Mayer, D., Deecke, L., & Lang, W. (2005). How chemical information processing interferes with face processing: a magnetoencephalographic study. *NeuroImage*, *24*(1), 111–7. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.09.030

Waller, B. M., & Dunbar, R. I. (2005). Differential behavioural effects of silent bared teeth display and relaxed open mouth display in chimpanzees (Pantroglodytes). *Ethology*, *111*(2), 129-142.

Whalen, P. J., Kagan, J., Cook, R. G., Davis, F. C., Kim, H., Polis, S., … Johnstone, T. (2004). Human amygdala responsivity to masked fearful eye whites. *Science, 306*(5704), 2061. doi:10.1126/science.1103617

Whalen, P. J., & Kleck, R. E. (2008). The shape of faces (to come). *Nature Neuroscience*, *11*(7), 739–740. doi:10.1038/nn0708-739

Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J. P., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, *40*(3), 655–64. doi:10.1016/S0896-6273(03)00679-2

Wilcox, T., Stubbs, J. a, Wheeler, L., & Alexander, G. M. (2013). Infants' scanning of dynamic faces during the first year. *Infant Behavior & Development*, *36*(4), 513–6. doi:10.1016/j.infbeh.2013.05.001

Williams, L. M., Palmer, D., Liddell, B. J., Song, L., & Gordon, E. (2006). The "when" and "where' of perceiving signals of threat versus non-threat. *NeuroImage*, *31*, 458–467. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.12.009

Wiss, V. (2012). *Identifying facial expressions associated with positive emotional states in dogs* (Mémoire de maîtrise inédit). Swedish University of Agricultural Sciences, Skara.

Xiao, W. S., Xiao, N. G., Quinn, P. C., Anzures, G., & Lee, K. (2013). Development of face scanning for own- and other-race faces in infancy. *International Journal of Behavioral Development*, *37*(2), 100–105. doi:10.1177/0165025412467584

Young-Browne, G., Rosenfeld, H. M., & Horowitz, F. D. (1977). Infant discrimination of facial expressions. *Child Development*, *48*(2), 555–562. doi:10.2307/1128653

Yrttiaho, S., Forssman, L., Kaatiala, J., & Leppänen, J. M. (2014). Developmental precursors of social brain networks: the emergence of attentional and cortical sensitivity to facial expressions in 5 to 7 months old infants. *PloS One*, *9*(6), e100811. doi:10.1371/journal.pone.0100811

Zald, D. H., & Pardo, J. V. (1997). Emotion, olfaction, and the human amygdala: amygdala activation during aversive olfactory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *94*(8), 4119–4124.

Zazzo, R. (1957). Le problème de l'imitation chez le nouveau-né. *Enfance*, *10*(2), 135-142.

Zernecke, R., Haegler, K., Kleemann, A. M., Albrecht, J., Frank, T., Linn, J., … Wiesmann, M. (2011). Effects of male anxiety chemosignals on the evaluation of happy facial expressions. *Journal of Psychophysiology*, *25*(3):116–123. doi:10.1027/0269-8803/a000047

Zhou, W., & Chen, D. (2009). Fear-related chemosignals modulate recognition of fear in ambiguous facial expressions. *Psychological Science*, *20*(2), 177–183. doi:10.1111/j.1467-9280.2009.02263.x

Zucco, G., Paolini, M., & Schaal, B. (2009). Unconscious odour conditioning 25 years later: Revisiting and extending "Kirk-Smith, Van Toller and Dodd." *Learning and Motivation*, *40*(4), 364–375.

Annexes

ANNEXE 1 :
ARTICLE SOUMIS AUPRES DE *JOURNAL OF EXPERIMENTAL CHILD PSYCHOLOGY*

When do babies become emotional screeners? Visual exploration of emotional facial expressions in 3, 7 and 12 month-old infants.

Nicolas Dollion[a], Robert Soussignan[a,b], Karine Durand[a], Benoist Schaal[a],

& Jean-Yves Baudouin[a,c]

[a] Developmental Ethology and Cognitive Psychology Group, Centre for Smell, Taste and Food Science, UMR 6265 CNRS – UMR 1324 INRA – Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

[b] Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France

[c] Institut Universitaire de France, Paris, France

Corresponding authors: ND (dollionnicolas@gmail.com), and JYB (Jean-Yves.Baudouin@u-bourgogne.fr)

Corresponding address: Equipe d'Ethologie développementale et de psychologie cognitive, Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, 9E boulevard Jeanne d'Arc, 21000 Dijon, France

Abstract

The first year of life is critical in the development of social skills abilities, notably concerning the processing of facial expressions. Among the literature about this topic, numerous studies have investigated infants' discrimination and categorization of facial expressions, and have delineated different key-steps in infant's socio-emotional development. However, little is known about infants' visual exploratory strategies of facial expressions and their developmental paths. Resorting on the tracking of eye movements, this study aims to investigate those issues by collecting the oculometric parameters in 3- , 7- and 12-month-old infants while they were exposed to a dynamic avatar face displaying basic emotions (anger, disgust, fear, sadness, happiness and neutrality). First, results further confirmed the presence of a progressive reallocation of attention from the external features toward internal features (notably the mouth and nose areas) during the first half of the first year. Second, 7- and 12-month-old infants differentially explored the distinctive features of the facial expressions, focusing more their attention toward the relevant internal features; while 3-month-olds' visual exploration was unaffected by the expression. It appears thus that infants' exploratory strategies evolved along the first year, in particular between 3 and 7 months, from a pattern that does not integrate variations in informative features, to a pattern guided by emotionally-relevant facial actions. This particular focus on the distinctive features is interpreted as a potential contributor to infants' socio-emotional development, as it may lead to an improvement in their ability to process facial expressions.

Keywords: Infant, facial expression, Eye-tracking, visual exploration, facial features, social development, emotional development.

1. Introduction

As a highly social species, humans have evolved a large set of communication signals allowing them to beneficially manage the intense flow of information exchanges that characterize their large-group lifestyle. Among different means of non-verbal communication, facial expressiveness is privileged in transmitting others' emotional states and interactive intentions. By using this relatively direct access to others' emotional information, adult humans are apt at regulating and anticipating interactions with social partners or objects in the environment. From an adaptive point of view, it is obviously crucial that this ability is acquired as early as possible during development.

The first year of life is a critical period in the development of social skills, namely for the ability to process facial expressions. From birth, infants are already strongly attracted by faces and face-like patterns (Kleiner & Banks, 1987; Morton & Johnson, 1991). This early attraction for faces is the foundation for later acquisition of visual skills pertaining to faces, as the early attentional advantage for faces will enhance the development of learning of, and expertise in, face processing (Morton & Johnson, 1991; Nelson, 2001). Indeed, infants' ability to process *facial expressions* gradually develops along the first year. Newborns may already discriminate between some facial expressions (Farroni, Menon, Rigato & Johnson, 2007; Field et al., 1982, 1983). Nonetheless, it is only from the age of 3 months that infants' ability to discriminate facial expressions has been clearly established and repeatedly demonstrated. By that age, infants discriminate happy from frowning faces, and are more attracted by happiness than by other facial expressions (Barrera & Maurer, 1981; Haviland & Lelwica, 1987; Young-Browne, Rosenfeld & Horowitz, 1977). This early attraction to happy faces is maintained along following months (LaBarbera, Izard, Vietze & Parisi, 1976; Montague & Walker-Andrews, 2001). Studies using event-related potentials (ERPs) on 3 month-old infants further confirmed those results by showing enhanced components that reflect specifically the

integration of a face stimuli, and larger amplitude on a component reflecting the intensity of attentional allocation (Rigato, Farroni & Johnson, 2010). Thereafter, between 3 and 7 months, infants' discriminatory abilities progressively broaden, with the appearance of first abilities to discriminate among negative facial expressions (Schwartz, Izard & Ansul, 1985; Yrttiaho, Forssman, Kaatiala & Leppänen, 2014). It is also during this period that face-related categorical abilities appear, as infants become able to recognize the expressive equivalence of varying identities expressing happiness (Bornstein & Arterberry, 2003; Serrano, Iglesias & Loeches, 1992, 1995). After 7 months, infants' categorical abilities are not anymore limited to happy expressions. Their discriminatory abilities extend then to some negative facial expressions, especially fear (Kestenbaun & Nelson, 1990; Ludemann, 1991; Ludemann & Nelson, 1988; Nelson & Dolgin, 1985; Nelson, Morse & Leavitt, 1979), and expressions are distinguished along reliable emotion-category boundaries (Kotsoni, de Haan & Johnson, 2001). This progression in infants' abilities is further corroborated for *brain processing* as measured by ERPs (e.g., Peltota, Leppänen, Mäki, & Hietanen, 2009; Yrttiaho et al., 2014).

This improvement in emotional processing also coincides with the advent of the negativity bias: infants do no longer manifest a preference for positive stimuli, but more and more strongly attend to negative facial expressions (e.g., Leppänen & Nelson, 2012; Peltola, Hietanen, Forssman & Leppänen, 2013). Such modifications into infants' dynamics of preferences for facial expressions have been related to changes in parent's interaction modes with their infants (i.e., increase in facial/vocal negative expressions) (Biringen, Emde, Campos & Appelbaum, 1995; Campos, Kermoian & Zumbahlen, 1992). It is also at about 7 months of age that the first evidence of social referencing is noted. When facing an ambiguous situation, infants do then gaze to an adult's face to extract information from facial expressions in an attempt to cope with this ambiguity (Striano & Rochat, 2000; Striano, Vaish, & Benigno, 2006).

By the age of 12 months, typical infants manifest both fine-grained categorization of all basic facial expressions as well as behavioral responses adjusted to the adult's emotional expressions in various experimental paradigms: the visual-cliff paradigm (Sorce, Emde, Campos & Klinnert, 1985), the stranger encounter (Feinman & Lewis, 1983) or the exposure to an unknown/ambiguous object (Carver & Vaccaro, 2007; Gunnar & Store, 1984). Despite most of those studies have relied on audio-visual transmission of emotions (*i.e.*, simultaneous vocal and facial expression), some of them confirmed that facial expressions only sufficed to trigger adjusted responses in 1-year-olds (Klinnert, 1984; Sorce et al., 1985). Thus, along the first year of life, infants go across three major steps in the development of their social skills pertaining to the processing of facial expressions: 1) 3 month-old infants are able to discriminate some facial expressions, 2) then, around 7 months, they show evidence of categorical perception of most facial expressions and adaptive behaviors, and 3) when they reach 12 months, they can recognize all basic facial expressions of emotion and adapt their behavior accordingly. After their first year, infants continue refining their categorization abilities regarding facial expressiveness, until reaching an adult level at around 11-12 years (Durand, Gallay, Seigneuric, Robichon & Baudouin, 2007).

The early development of abilities to discriminate and categorize different facial expressions relies on infants' aptitude to access specifically distinctive facial features using specific exploratory strategies. Indeed, as different facial expressions involve only few overlapping areas in faces, their distinction depends on the visual exploration of those specific non-recovering parts and on the extrapolation of related differences by the brain (Smith, Cottrell, Gosselin & Schyns, 2005). Numerous adult studies confirm this hypothesis in showing that, depending on the facial expression, certain facial features attract more attention than others: the eyes' area receives more fixations when processing a sad, scarred or angry

face; while the mouth area receives more fixations in happy or disgust faces (e.g., Adolphs et al., 2005; Malcolm, Lanyon, Fugard & Barton, 2008; Schurgin et al., 2014).

In infants, a progressive access to the internal features of faces is reported during the first months of life. At birth, despite their ability to reach the different internal features, infants prominently rely on external features (*i.e.* face contours, hair, accessories…) (e.g., Bartrip, Morton & de Schonen, 2001; Turati, Macchi-Cassia & Simion, 2006). It is not until 2-3 months, that infants begin to preferentially engage attention toward the internal features with a focus on the eyes' area (Hainline, 1978; Haith, Bargman, & Moore, 1977; Hunnius & Geuze, 2004; Maurer & Salapatek, 1976). Later, infants continue to increase the time spent exploring internal facial features, and notably the mouth area, until reaching 3-4 months old, age at which they equally explore the eyes' and mouth areas (Wilcox, Stubbs, Wheeler & Alexander, 2013). At the same age, infants also begin to differ in their scanning pattern when exploring a face as compared to abstract visual stimuli (Hunnius, & Geuze, 2004). With this progressive access to the internal features and the ability to shift attention between them, infants become able to process both relations and distances between the different internal features, and thus to perform configural processing on faces (Cohen & Cashon, 2001). It has been demonstrated that infant as young as 4 months are already able to rely on configural processing when dealing with faces (Gallay, Baudouin, Durand, Lemoine, & Lécuyer, 2006). Nonetheless, it is not until 7 months that this type of processing has been observed in infants for the categorization of facial expressions (Kestenbaum & Nelson, 1990).

The ontogeny of those exploratory strategies of facial expressions processing is crucial, specifically the ability to focus on internal features. Disturbances in the strategies applied during the visual exploration of faces and emotional expressions are indeed reported in pathologies associated with deficits in facial expression recognition, such as schizophrenia or autism (Baudouin & Franck, 2008; Chambon, Baudouin & Franck, 2006; Jones & Klin,

2013; Pelphrey et al., 2002). Furthermore, it has been hypothesized that infant's selective attention toward specific facial features mediates and facilitate learning *on* faces, like lip-reading (Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012).

Currently, most studies on the development of infants' processing of facial expressions focus on their ability to discriminate and categorize facial expressions, and resort to visual preference and habituation paradigms. Although these approaches have proven pertinent, they leave many issues unclear. First, the visual strategies infants deploy when seeing an emotionally-expressive face is still uncertain; specifically, the features in facial expressions that elicit infants' differential focusing and discrimination between expressions remain poorly understood. Second, the developmental reshaping of those exploratory strategies has received little investigation. The purpose of the present study is thus to further our knowledge on these issues. Three, 7 and 12 month-old infants were exposed to a dynamic (female or male) avatar face displaying basic emotions (*i.e.* anger, disgust, fear, happiness, sadness) or remaining neutral. As noted above, these ages constitute major steps in the development of infants' expertise in processing facial expressions, and are thus favorable time-points to assess changes in face-related visual exploratory strategies. Infants' visual strategies were quantified through the automatic tracking of their eye movements.

The tracking of eye movements is particularly suitable to investigate the above issues as it allows measuring the exact amount of time an individual spends exploring each part of a visual scene. But only a few studies applied it to infants in this context and they reported contradictory findings. Amso, Fitzgerald, Davidow, Gilhooly & Tottenham (2010) found a positive correlation between the time infants spent fixating the eyes' area and their ability to discriminate happy from fearful faces in infants aged 6-11 month-old. Some other reports described extensive exploration of the mouth area and avoidance of the eyes' area in threatening faces (*i.e.*, fear or anger) (Hoehl, 2014), while others found no effect of the

displayed expression on infants' visual exploration (Hunnius, de Wit, Vrins & Von Hofsten, 2011; Peltota et al., 2009). Several methodological differences between these studies certainly explain such discrepancies (*i.e.,* the nature stimuli, the experimental protocol, the size and content of areas of interest…), which result in the current unclarity of different issues. In the present study, we therefore opted to go a step further in investigating: 1) the relative importance of facial features infants use to process facial expressions, and 2) how the infants' processing of facial features changes along development, reflecting cognitive/behavioral sophistication and acquisition of expertise in facial processing (e.g., Lewkowicz & Hanen-Tift, 2012).

Finally, numerous studies using ERPs (e.g., Hoel & Striano, 2008, 2010a; 2010b; Rigato et al., 2010) and some behavioral studies on social referencing (Hernstein & Campos, 2004; Moses, Baldwin, Rosicky, & Tidball, 2001) demonstrate an early sensitivity of infants to gaze orientation when processing facial expressions. Even newborns' processing of faces is influenced by gaze orientation (Farroni, Csibra, Simion & Johnson, 2002; Guellaï & Streri, 2011). Thus, knowing this potential importance of gaze on infants' processing of faces and facial expressions, we also manipulated the avatars' gaze to assess whether it influences infant visual exploration of emotional expressions. We expected that, as previously described in the literature, the congruency between the gaze orientation of the target face and the emotional expression of it (i.e., approach oriented expression and direct gaze; avoidance oriented expression and averted gaze) will elicit a stronger interest in infants, and thus a stronger exploration of the expressive face, especially on the distinctive feature(s).

2. Methods

2.1. Participants

A total sample of 161 infants was studied. Among them, 36 were 3 month-old (24 girls/12 boys), 66 were 7 month-old (32/34) and 59 were 12 month-old (27/32). Only infants whose gaze was detected during at least 30% of the whole experimental session were considered for analyses. An additional 82 infants were studied but not included into the final, because of one of the following exclusion criteria: preterm birth (n=2), fussiness during the experiment (n=13), inattentiveness (n=4), regurgitation (n=1) or technical issues with the eye movement-tracking system [difficulty in finding (n=26) or calibrating gaze (n=33), or gaze loss during the experiment (n=3)]. The average age of the remaining infants in each group was 92.3 days (SD = 2.96 days) for 3 month-olds, 214.8 days (SD = 2.96 days) for the 7-month-olds, and 365.8 days (SD = 3.01 days) for the 12-month-olds.

Families were recruited through postal letters and a follow-up phone call. During this phone call, parents were informed about the aim and procedure of the experiment. A fully detailed description of the experimental material and procedure was given to them when they came to the baby-laboratory of the Centre des Sciences du Goût, right before the experiment. All parents gave their written consent to let their infant participate. One or both parents were present during the experiment, and were allowed to discontinue the experiment in case of infant distress. All testing was run according to the Declaration of Helsinki for experimentation with human participants (*British Medical Journal*, 1991; 302: 1194).

2.2. Materials

2.2.1. Stimuli

We used short movie clips depicting two different 3D avatar faces (a male or a female) displaying five basic emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness) and a neutral expression, with either direct or averted gaze (*i.e.*, 15° toward left or right). Those dynamic avatars were generated with the Poser 9 software (Smith Micro Software, Watsonville, CA, USA). Each movie clip began with the avatar posing a neutral facial expression. When expressive, the avatar progressively reached an expressivity peak (apex) until 500 ms and then remained at maximal expressivity for the next 1500 ms, while its gaze remained fixed during the whole sequence. For the movie clips depicting neutral facial expression, the avatar remained unexpressive during the whole 2-s sequence. Each one of those 2-s video clip was mounted into 6-s sequences, in which the expression was repeated three times.

The different facial expressions were obtained by manipulating different groups of polygons on a 3D mesh representing the facial structure of the avatar's face. Each of these groups of polygons was comparable to the Action Units (AU) described in the Facial Action Coding System (FACS, Ekman & Friesen, 1978). Thus, specific groups of polygons were manipulated by a certified FACS coder (R.S.) to create prototypic facial expressions: *viz*., AUs 4 + 24 for anger, AUs 9 for disgust, AUs 1 + 2 + 4 + 5 + 20 for fear, AUs 6 + 12 + 25, and AUs 1 + 4 + 15 for sadness. Modification of gaze direction was performed by angular deviation of the iris structure using a computational displacement of 15° to either side (left/right), relatively to the axis of the head. The validity of those stimuli was guaranteed not only by the fact that our manipulations of AUs were performed according to the description of prototypical facial expressions in the FACS (Ekman & Friesen, 1978), but also through pretests conducted on groups of adults participants (see Soussignan et al., 2013).

The movie clips were 1025 pixels width and 1050 pixels length, which corresponded to 28.9 cm width and 29.6 cm length on the monitor, and were mounted on a black background.

2.2.2. Apparatus and behavior recording

Movie clips were displayed on a 1680 x 1050 screen using the ExperimentCenter software (version 3.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany), designed for the SMI eye movement-tracking system (RED250, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany). During the experiment, two-dimensional recording of infants' both eyes were performed using iVewX Software (version 2.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany), with a sampling rate set at 250 Hz. Eye-movement data were analyzed off-line on both eyes using BeGaze Software (version 3.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany). Finally, infants' behaviors during the experiment were monitored using a video camera (Handycam, Sony) positioned centrally above the screen at an approximate distance of 66 cm from the infant to assess a posteriori whether infants met inclusion criteria (see below) during the experimental session.

2.3. Procedure

2.3.1 Experimental setting

The experiment took place in the baby-lab, a dedicated room where visual, acoustical and thermal ambience was held as constant as possible. On arrival, parent(s) and infant were put at ease in receiving a fully detailed description of the experimental session and material, while the experimenter kept having warm and playful interactions with the infant. Once at

ease, the infant was comfortably installed in a baby car-seat facing a screen with the Eye movement-tracking system mounted on it. From his seat, the infant was at an approximate distance of 60 cm from the eye movement-tracking system. Parents were asked to seat on a chair out of the reach of their infant's gaze (*i.e.,* chair situated 1.5 m behind infant's seat) and to remain as immobile and silent as possible through the experiment. Before the experiment, the eye movement-tracking system's position was adjusted to optimize gaze detection. Each infant passed the calibration and the experiment itself.

2.3.2 Calibration

A moving, noisy cartoon character was presented on the screen. It first appeared in the center of the screen. Once the infant stared at it, the experimenter manually triggered the displacement of the figure to an another location on the screen and the character remained in this new position until the experimenter triggered again its displacement once the child stared at it; and then up to 5 different positions on the screen (i.e., center and four corners). If the participant's eyes were not found for at least one position or if the precision of gaze detection was not satisfying (*i.e*. calibration spatial precision for *x* and y axes inferior or close to 1°), the calibration procedure was run again. Only infants whose gaze was correctly detected on the five calibration points were retained for further analyses.

2.3.3. Test phase

During this phase, infants were consecutively exposed to 12 different trials, corresponding to the same avatar (*i.e.,* male or female) displaying five different emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness) or remaining neutral. Infants saw each facial expression twice: once with an averted (*i.e*., 3 trials with gaze toward the right and 3 with

gaze toward the left) and once with a direct gaze (*i.e.*, 6 trials with direct gaze). Each trial corresponds to the exposure to one of the 6-s sequences in which the avatar repeated 3 times the same facial expression. During the experiment the different trials were randomly presented, with an inter-stimulus interval of 3 s during which a blue screen was displayed. The avatars' sex and orientation of averted gaze were counterbalanced between individuals.

The experimenter sat at a recording computer while the infant was performing the task to check proper recording of infant's gaze and to follow responses to the stimuli. If during the test phase, the infant manifested some signs of discomfort, the experimenter was allowed to provide the infant with some reassuring utterances (*i.e.* "Everything is alright", "We are here baby", "Don't Worry"), but only during the inter-stimuli period. If never it turned out that those words were ineffective and infant get fussier, the experiment was stopped. The exact same procedure was applied for the three age groups.

2.5. Data Analyses

Among the final sample of infants, the mean spatial precision of calibration was about 1± 0.61° and 1.15± 0.71° for the 3-month-olds, 0.60± 0.40° and 0.80± 0.40° for the 7-month-olds, and about 0.70± 0.37° and 0.88± 0.38° for the 12-month-olds, for the *x* axis and *y* axis, respectively. Oculometric parameters were collected and analyzed on both eyes.

To investigate the influence of the avatar's facial expressions on infants' visual exploration of faces, we first computed density maps which directly represent the distribution of visual exploration of the different facial areas. Those maps were created by computing, for each pixel, the time infants gazed in a surrounding 43-pixel diameter (43 pixels representing a 1°-visual angle in our experimental setting). The different mean fixation times for each pixel were then translated into color codes to visually represent them, and superimposed on a neutral avatar face. Such density maps have been created for each facial expression at each of the three age of interest and for each avatar. An illustration averaging the visual exploration of the three age groups for the female avatar is displayed in figure 1. Note that no reliable differences were observed between the two avatars.

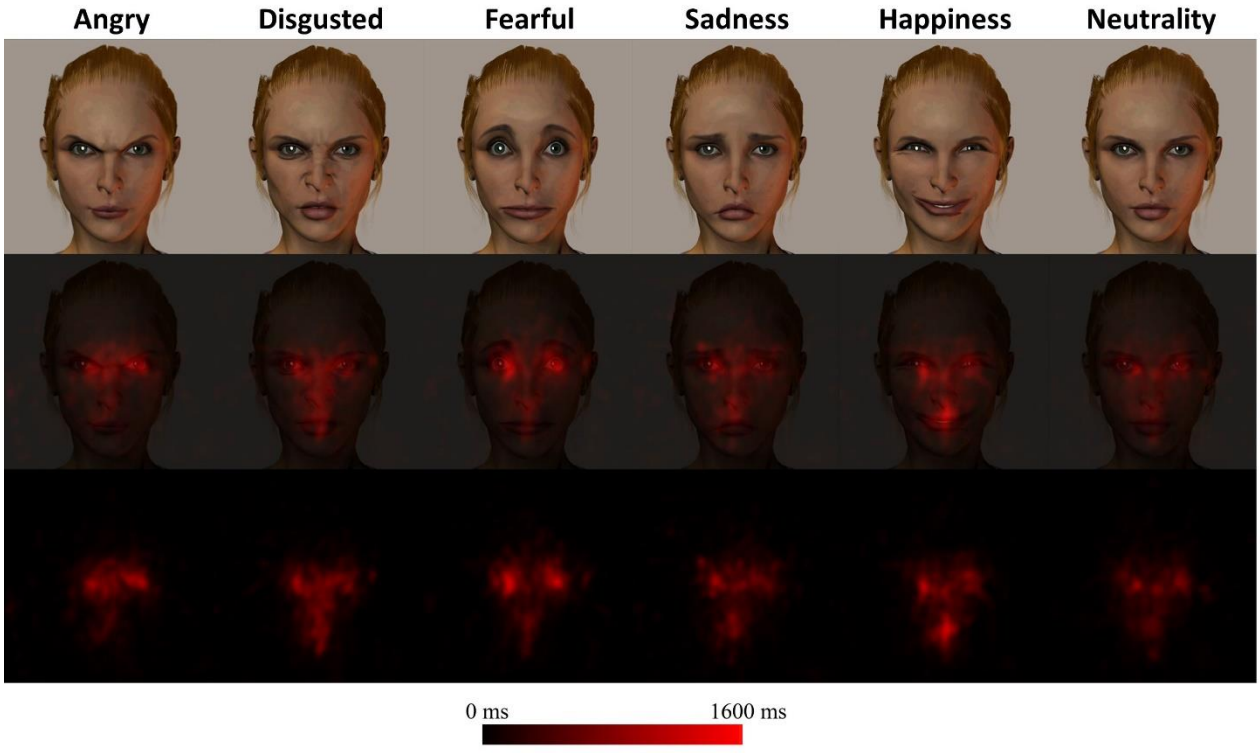


Figure 1: Density maps representing the mean time (in ms) infants spent looking in the surrounding area of each pixel according to the avatar's expression. The figure below is the average exploration of the female avatar by infants from the three age groups.

To analyze the data, different areas of interest (AOIs) were defined to compute the amount of time infants spent fixating different locations on the face according to their age, the displayed facial expression, and the avatar's gaze toward the infant's eyes. These AOIs were defined based on two criteria: (i) the regions that were the most gazed at by infant (according to the different exploration maps; see figure 1), and (ii) regions containing AUs that are relevant to facial processing. Since our material involved dynamic features, AOIs were defined so that they include the features while they moved. In this way seven AOIs were defined including the Right Eye, the Left Eye, the Upper Nose, the Lower Nose, the Mouth, the Between Eyebrows and the External Features area (see figure 2). Then, based on oculometric data, the time infants' spent fixating inside each AOIs was extracted and computed for each facial expression.

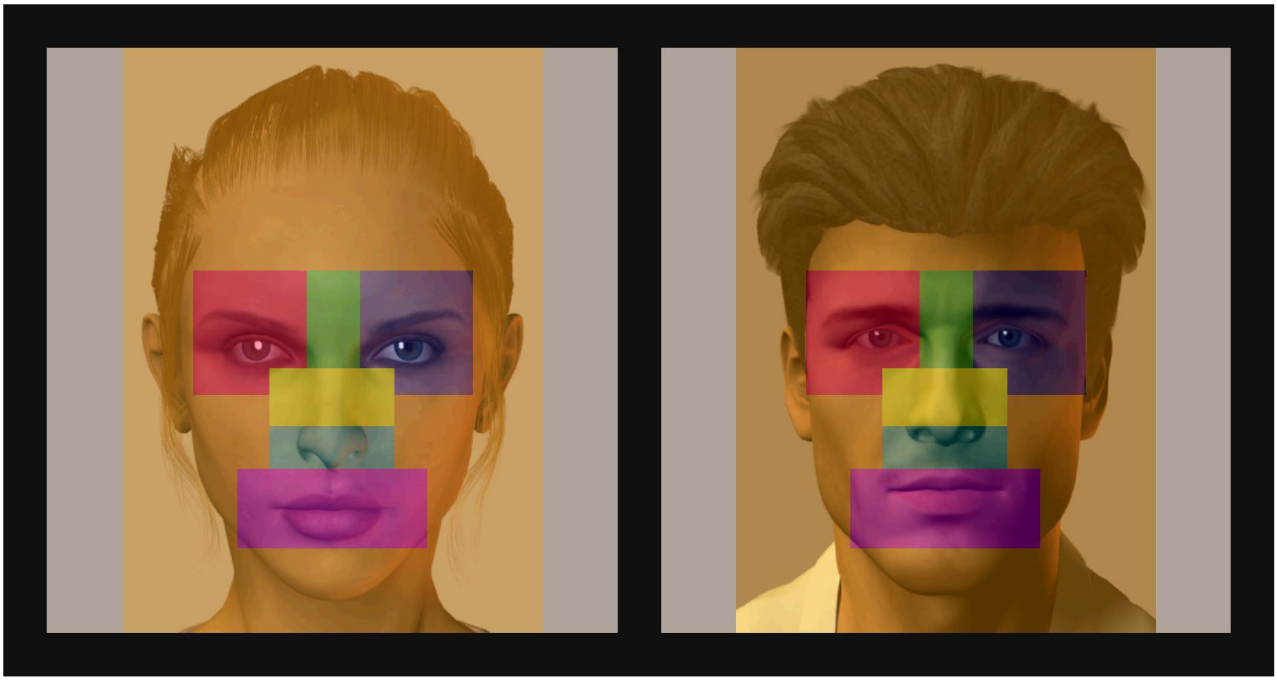


Figure 2: Illustration of the different areas of interest (AOIs) used during the experiment: Left Eye area in red, Right Eye area in dark blue, Mouth area in pink, Upper Nose area in yellow, Lower Nose area in light blue, Between Eyebrows area in green and External Traits area in orange.

Infants' visual exploratory behavior was analyzed using repeated-measures analyses of variance (ANOVAs) with the Age (3, 7 and 12 months) as between-subjects factor, and the AOI (Right Eye, Left Eye, Mouth, Nose Top, Nose Bottom, Between Eyebrows and External Features), the avatar's facial Expression (Anger, Disgust, Fear, Happiness, Neutral or Sadness) and the avatar's Gaze (Direct or Averted) as within-subjects factors. For the main effects and interactions, a Greenhouse-Geisser correction was applied. Post-hoc tests were run using Tukey HSD tests.

3. Results

The ANOVA revealed no effect of Gaze, either alone or in interaction, on duration of looking (all Fs<1.22). The main effect of Expression on looking duration was significant [$F(5,790)= 6.49$, $\varepsilon=.98$, $p<.0001$, $\eta p^2=.04$], but did not interact with Age [F<1]. Post-hoc Tukey's tests indicated that infants looked longer at any face displaying dynamic emotional expressions (from 939 to 1022 ms) than at the static neutral faces (840 ms, all p*s*<.05).

The main effect of AOI was also significant [$F(6,948)= 23.5$,$\varepsilon=.61$, $p<.0001$, $\eta p^2=.13$]. The AOI factor additionally yielded a significant interaction with Age [$F(12,948)=5.60$, $\varepsilon= .61$, $p<.0001$, $\eta p^2=.07$]. This interaction is illustrated in figure 3. Further analyses evidenced a main effect of Age on looking duration for AOIs corresponding to features at the bottom or external parts of the face [mouth: $F(2,158)=7.48$, $p<.001$, $\eta p^2=.09$; nose top: $F(2,158)=4.43$, $p<.05$, $\eta p^2=.05$; nose bottom: $F(2,158)=6.85$, $p<.01$, $\eta p^2=.08$; external features: $F(2,158)=21.24$, $p<.0001$, $\eta p^2=.21$], but not for features in the region of the eyes [right eye, left eye, and between eyebrows; all F*s*<1]. Post-hoc Tukey's tests revealed that 7- and 12-month-olds looked longer at the mouth and lower nose than 3-month-olds did (all p*s*<.05). Seven-month-olds – but not 12-montholds – also looked longer at the upper nose

than 3-month-olds (p<.01 and p=.0932, respectively). On the contrary, 3 month-old infants looked longer at external features than both 7 and 12 month-old infants (both p*s*<.0001). The two oldest age groups never significantly differed.

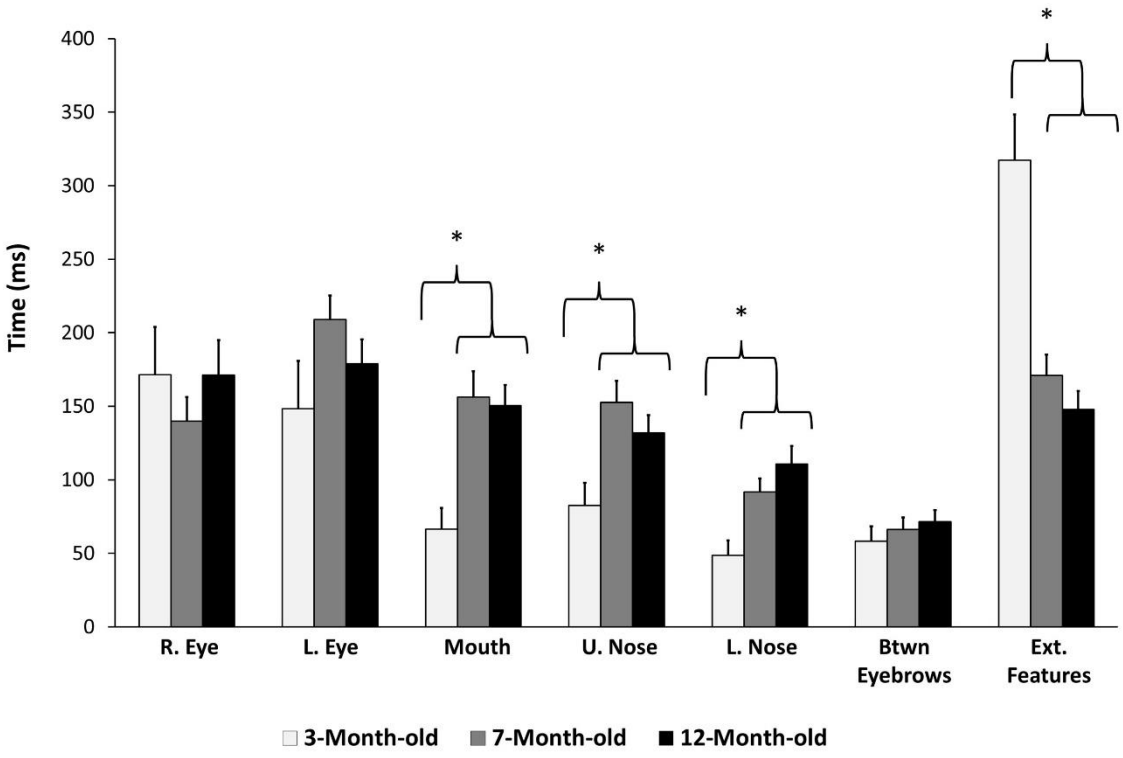


Figure 3: Mean time (in ms) infants spent exploring the different areas of the face according to their age (error bars correspond to standard errors). Significant differences between age groups are indicated with *.

Thus, the main AOIs receiving visual fixations within dynamic expressive faces changed in growing infants, with a shift from external features to lower internal features between 3 and 7 months, although the weight of the eyes' region remained stable. However, this shift was not independent from the information conveyed by the faces as they varied according to the emotions that were actually expressed: the interaction between Age, AOI, and Expression was also significant ($F(60,4740)=2.38$, $\varepsilon= .62$, $p<.0001$, $\eta p^2=.03$). Planned comparisons of looking duration between the 3-month-olds and both older groups were run, for each expression within each AOI, to further investigate this interaction. The results are summarized in figure 4. Grey areas indicate the expressions for which the main effect of Age

observed overall (i.e., 7- and 12-month-olds > 3- month-olds) was significant [lowest *F* value: F(1,158)=4.12, *p*<.05; highest *F* value: F(1,158)=17.55, *p*<.0001]. As can be seen in figure 4, older infants did not increase their looking time to the lower features for all expressions, but mainly/only when it was relevant for this expression; that is when the AOI included an informative AU. This was true for the mouth in happy faces and the upper nose in disgust faces. This was also true for the left eye in fearful faces, despite the absence of overall effect of age; older infants looked more at this area only when it was emotionally relevant. This conclusion was further reinforced by significant interactions between Age and Expression on looking duration directed to the left eye [F(10,790)=3.16, ε= .89, *p*<.001, ηp^2=.04], the mouth [F(10,790)=2.89, ε= .75, *p*<.01, ηp^2=.04], and lower nose [F(10,790)=1.96, ε= .83, *p*<.05, ηp^2=.02], but not for upper nose [F(10,790)=1.52].

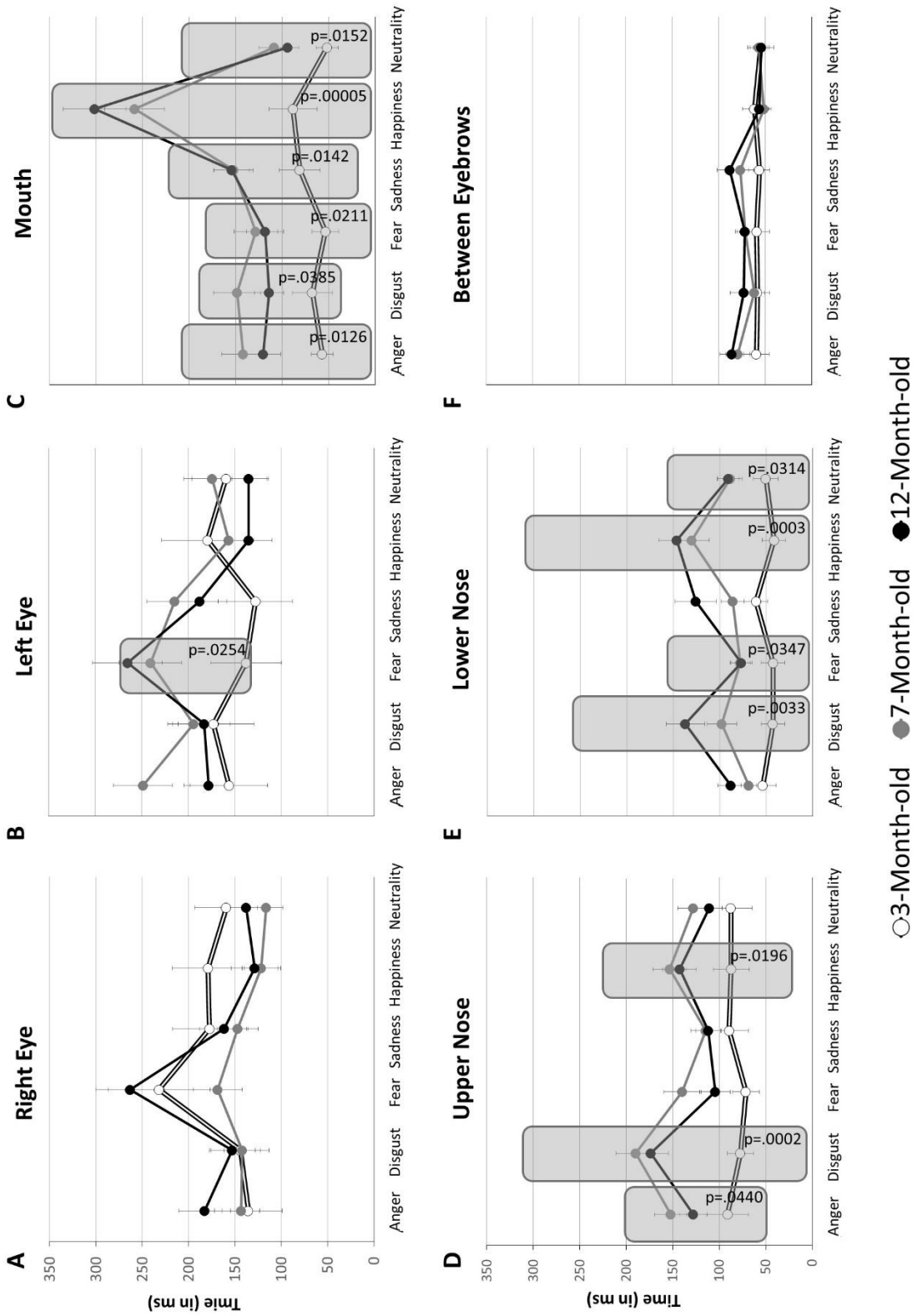


Figure 4: Mean time (in ms) infants spent exploring the different AOIs of the face (A= Right Eye, B= Left Eye, C= Mouth, D= Upper Nose, E= Lower Nose, F= Between Eyebrows) according to their age and to the avatar's facial expression (error bars correspond to standard errors). Grey areas correspond to significant Age effects.

Thus, the way infants explored facial expressions changed between 3 and 7 months. By growing, infants increasingly looked at relevant AUs in expressive faces, suggesting a development of their ability to attend to relevant facial features. To test for this assumption further, separate ANOVAs were performed for each age group with the AOI (Right Eye, Left Eye, Mouth, Nose Top, Nose Bottom, Between Eyebrows and External Features) and Expression (Anger, Disgust, Fear, Happiness, Neutral or Sadness) as within-subjects factors. Since it had no effect, either alone or in interaction, in the previous analyses, the Gaze factor (Direct or Averted) was not further considered.

At ***3 months***, the visual exploratory pattern of the avatar's face was not modulated by facial expression, as the interaction between Expression and AOI was not significant [$F(30,1050)= 1.15$]. Note that the main effect of expression was also not significant ($F<1$).

At ***7 months***, on the contrary, the main effect of expression was significant [$F(5,325)=3.94$, $\varepsilon= .94$, $p<.01$, $\eta p^2=.06$]. Post-hoc Tukey's tests revealed that it was due to longer looking time for happiness (1036 ms), fear (1011 ms), and disgust (1007 ms) faces than for neutral faces (844 ms, all p*s*<.05), with a similar trend for anger (980 ms, p=.0577) and sadness (978 ms, p=.0626). Moreover, the exploratory pattern varied with facial expression, as the interaction between Expression and AOI factors reached significance [$F(30,1950)=4.24$, $\varepsilon= .51$, $p<.0001$, $\eta p^2=.06$)]. Further analyses indicated that the effect of expression was significant for the left eye [$F(5,325)=4.26$, $\varepsilon= .81$, $p<.01$, $\eta p^2=.06$], the mouth [$F(5,325)=8.39$, $\varepsilon= .77$, $p<.0001$, $\eta p^2=.11$], the upper nose [$F(5,325)=4.47$, $\varepsilon= .86$, $p=.001$, $\eta p^2=.06$], and the lower nose [$F(5,325)=3.65$, $\varepsilon= .68$, $p=.01$, $\eta p^2=.05$], but not for the right eye [$F(5,325)=1.58$], the between eyebrows [$F(5,325)=1.75$], and the external features [$F(5,325)=1.15$]. Post-hoc Tukey's tests showed that 7-month-olds gazed more to the left eye for anger and fear than for happiness (both p*s*≤.01), and for anger than for neutrality (p<.05). They also gazed more to the mouth for happiness than for any other expression (all p*s*<.0001),

to the upper nose for disgust than for fear, sadness and neutrality (all p*s*<.05), and to the lower nose for happiness than for anger and fear (both p*s*<.05).

At ***12 months***, the pattern looked similar to that of 7-month-old infants, with some differences, however. The main effect of expression was significant [F(5,290)=4.57, ε= .94, *p*<.001, ηp^2=.07]. This effect resulted from longer looking times to happiness (1055 ms), fear (1019 ms), and sadness (991 ms) than to neutrality (811 ms, all p*s*<.05 after post-hoc Tukey's tests), with no difference for anger (931 ms) and disgust (959 ms). The exploratory pattern also varied according to the displayed facial expression as indicated by the interaction between the Expression and the AOI factors [F(30,1740)=9.71, ε= .51, *p*<.0001, ηp^2=.14]. The effect of expression on looking time turned out to be significant toward the right eye [F(5,290)=9.08, ε= .84, *p*<.0001, ηp^2=.14], the left eye [F(5,290)=6.92, ε= .81, *p*<.0001, ηp^2=.11], the mouth [F(5,290)=19.88, ε= .64, *p*<.0001, ηp^2=.26], the upper nose [F(5,290)=4.40, ε= .89, *p*=.001, ηp^2=.07], the lower nose [F(5,290)=4.99, ε= .74, *p*=.001, ηp^2=.08], the between eyebrows [F(5,290)=2.51, ε= .84, *p*<.05, ηp^2=.04], and the external features [F(5,290)=4.61, ε= .90, *p*<.01, ηp^2=.07]. After post-hoc Tukey's tests, 12-month-olds were observed to gaze more to both the right and the left eye for fear than for any other expression (all p*s*<.05). They also gazed more: to the mouth in happy faces than in any other expression (all p*s*<.0001), to the upper nose in disgust faces than in fearful, sad and neutral faces (all p*s*<.01), and to the lower nose in happy than in angry, fearful, and neutral faces (all p*s*<.05), and in disgust than in fearful faces (p<.05). Finally, infants gazed more to the external features when the avatar was neutral rather than expressing disgust or fear (both p*s*<.01). No significant difference emerged for the between eyebrows area after post-hoc tests, the effect of expression resulting from a weak tendency to longer fixate this AOI in sad and angry faces than in neutral and happy faces (p*s* between .0836 and .1830).

4. Discussion

The present study aimed to investigate the issue of whether infants specifically focus on emotionally relevant features of faces at different ages during the first year. To this end, the patterns of visual exploration of emotionally expressive faces of avatars were collected on infants at three key-ages in the development of infants' expertise in facial expression processing (3, 7 and 12 month-old). Our data confirmed that infants' exploratory strategies altered from a pattern that does not integrate variations in informative features on faces to a pattern guided by emotionally-relevant facial actions. Indeed, while the avatars' facial expressions had no effect on 3-month-olds' visual exploration, 7- and 12-month-olds differentially explored distinctive features depending on the facially-displayed emotion. More precisely, 7-month-olds attended to the features that were informative about the emotion conveyed by facial actions, specifically focusing on features altered by the distinctive and representative AUs of the expression. In this way, they explored more the eyes when the avatar displayed fear or anger, the upper nose area when it expressed disgust, and the mouth when it expressed happiness. The only differences between the two oldest groups were that 7-month-olds focused more on the left eye when the avatar displayed anger, while the 12-month-olds did not; and that 7-month-olds focused more on the lower nose only when the avatar displayed happiness, while 12-month-olds did so both when the avatar displayed happiness and disgust.

The pattern of face exploration after age 7 months

Thus, our results provide evidence that from 7 months infants are able to specifically reach distinctive facial features according to the emotion they have to process. Infants spent more time exploring the eyes' area when facing an angry or fearful face, as the eyes support

visual components that are typical and highly distinctive of those expressions (i.e., eye widening and brows frowning). The eyes' area was significantly less explored when the face displayed happiness, displacing the infants' interest to the mouth area (i.e., mouth stretching and teeth showing for some stimuli). The upper nose area attracted more infants' attention when the face expressed disgust, meaning that infants focused on the wrinkles around the nose which are distinctive elements of this expression. Finally, infants spent more time focusing on the lower nose area when the avatar displayed happiness (and also disgust for 12-month-olds). This gaze focus on an area playing a limited role in emotional expression (except for disgust) appears counterintuitive, but it might indicate that infants target an intermediate area between several features of interest for the processing of happy faces (*i.e*. smiling, cheek raising, bunching/bagging of the skin bellow the eyes). Similarly, when exploring the avatars' expression of sadness, the infants did not search more frequently for any specific facial feature. It is known from other studies that this expression relies more on holistic processing integrating both upper and lower facial features (i.e., eyebrows and mouth) (Durand et al., 2007). In sum, the specific facial features explored by infants after the age of 7 months were similar to those described in the adult literature (Adolphs et al., 2005; Kret, Stekelenburg, Roelofs, & de Gelder, 2013; Lundqvist, Esteces & Öhman, 1999; Malcolm et al., 2008; Schurgin et al., 2014; Smith et al., 2005). Overall, the differential patterns of exploration recorded in the present experiment show that infants' visual exploratory strategies engage the facial area sustaining AUs which are representative of, and specific to, the facial expressions they are exposed to (Ekman & Friesen, 1978).

The pattern of face exploration at age 3 months

The absence of effect of facial expressions in the 3-month-olds was unexpected, as several studies report a preference for happy faces over frowning faces in infants by this age (Barrera & Maurer, 1981; Young-Browne et al., 1977). A first explanation of this discrepancy may be related to methodological aspects (e.g., avatars vs realistic pictures, dynamic vs. static expressions, numbers of expressions, experimental procedures). Note, however, that our findings did not indicate that infants don't discriminate happy faces; rather, they suggest that they did it without a thorough exploration. A hypothesis that might account for this result is that the processing of expressions in 3 month-old infants resorts more on subcortical (*i.e.* magnocellular) pathways than on thalamo-cortical pathways. It has indeed been clearly established that, by 3 months, infants' visual exploration of faces focuses predominantly on the eyes' area (Hainline, 1978; Haith et al., 1977; Hunnius & Geuze, 2004; Maurer & Salapatek, 1976), lower face areas attracting their attention later (Wilcox et al., 2013). It is thus highly plausible that their processing of the lower AUs relies on peripheral visual processing (subtended by the magnocellular pathways). In this way, 3 month-olds may detect, process, prefer and respond to happy faces without direct gaze at the mouth. The same is true for other facial actions, out of the region of the eyes. On the other side, the fact that 7- and 12-month-olds engage in distinctive exploratory patterns according to the facial expression of the avatar is in agreement with the bursting socio-emotional development during the second half of the first year (for a review see Vaish, Grossman & Woodward, 2008). Indeed, as reviewed in Introduction, previous studies have repeatedly demonstrated that, compared to the 3-month-olds, 7- and 12 month-old infants have clearly improved discriminatory and categorical abilities regarding faces, and they have become able to reliably adapt their behavior according to the displayed facial expression (e.g., Klinnert, 1984; Sorce et al., 1985).

Those differences between the 3-month-olds and the older infants might originate from multiple factors. One of them is brain maturation, including the development of neural connections involved in voluntary control over attention between the 3rd and 6th months (Colombo, 2001; Richards, Reynolds & Courage, 2010). From the age of 6 months, infants can engage, disengage and displace their attention from a locus to another, even inside a single object, and exert volitional control over which information of interest is under the focus of their attention (Colombo, 2001). In the same time, another factor is experience-dependent coding of facial expressions. Indeed, infants' repeated expositions to the different types of facial expressions might contribute to the development of their expertise in the processing of emotional expressions. The appearance of this improvement between the 3rd and 7th months might be explained either by an increase in the rate of exposure to negative expressions during this period or by a cumulative effect of repeated exposures to the different expressions and their consequences (see Biringen et al., 1995; Campos et al., 1992). Studies on infants of depressed mothers put forward the crucial role of experience with expressive faces, those infants being less efficient to habituate to and to discriminate happy faces. This impairment in the processing of happy faces has been attributed to their more restricted experience with this expression (Bornstein, Arteberry, Mash & Manian, 2011; Hernandez-Reif, Field, Diego, Vera & Pickens, 2006). The role of experience was also demonstrated on the exploration of facial features. For example, studies on the other-race effect have repeatedly shown that infants progressively develop specific visual exploratory strategies (*i.e.* more focus on some internal features and more shifts between some of them) for the processing of faces from their own ethnic group (Liu et al., 2010, 2015; Xiao, Xiao, Quinn, Anzures, & Lee, 2012). Experience-related changes of exploratory strategies were also described by Lewkowicz and Hansen-Tift (2012) who reported a pattern of more gazing to the eyes than to the mouth of a talking face in 4-month-old infants, with a shift of focus to the mouth at 8 months, and then a recovery of

attention to the eyes from 12 months. They interpreted this behavioral shift in terms of a progressive access to redundant audiovisual speech cues allowing infants to acquire and refine speech perception and production abilities.

Relative weight of the facial features in processing facial emotions

About the relative weight of the different internal features of faces, our results indicate that infants spent most of their time focusing on the eyes' area, followed by the mouth area, then the upper nose area, and finally the between-eyebrows and lower nose areas. Whatever the infants' age, the eyes' area (left eye + left eye + between eyebrows) represented between 42.7% (for 3-month-olds) to 44.1% (for 12-month-olds) of the looking time, confirming the preponderant attention to the eyes reported in previous studies (e.g., Gallay et al., 2006; Hunnius & Geuze, 2004; Oakes & Ellis, 2013; Wilcox et al., 2013). At the same time, the 3 month-old infants looked twice as long toward the external features of the avatars' faces than the older infants (35.2% of their looking time *vs*. 17.5 and 15.4%, respectively), while they payed two times less attention to central and lower features (mouth and nose; 22.1% of the looking time *vs*. 40.4 and 40.6%, respectively). Overall, our results are in line with previous studies reporting a high exploration of the eyes' area in infants as young as 2-3 months, and an increased focus on other internal features in older infants.

The fact that infants of different ages do not engage their attention the same way toward the different internal features has also been previously observed (Haith et al., 1977; Hunnius & Geuze, 2004; Oakes & Ellis, 2013; Wilcox et al., 2013). Our results highlight that between 3 and 7 month of age, infants progressively reallocate the time spent exploring the external facial features toward internal features situated on the lower part of the face (*i.e.* the mouth and nose areas), while maintaining their interest for the eyes. The same kind of

attentional reallocation from external features toward the internal features has already been evoked by Hunnius and Geuze (2004) in their longitudinal study of infants aged from 6 to 26 weeks (see also Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012). This attentional reallocation from external traits toward the nose and the mouth could be of prime importance in the species-specific development of infants' ability to process facial expressions.

Some aspects of our results suggest that the development of facial expression abilities does not only consist in changes in feature-based processing (*i.e.*, gaze orientation to specific relevant features), but also in the development of exploratory strategies devoted to configural processing. Previous studies have hypothesized that the shift of attentional focus between major facial features might reflect the extraction of spatial relations among internal features of the face (*i.e.*, second order relations) and thus support configural processing (e.g., Gallay et al., 2006; Xiao et al., 2013). Furthermore, different studies have highlighted the role of central fixations (i.e., at the level of eyes or on the nose) in the extraction of holistic information (De Heering, Rossion, Turati, & Simion, 2008; Hsiao & Cottrell, 2008; Schwarzer, Huber, & Dümmler, 2005). Accordingly, the visual engagement of older infants toward the mouth and nose areas highlighted in the present study may indicate that 7- and 12-month-olds rely on configural processing in a different way than did the 3-month-olds. The enhanced allocation of gazes to the central part of the avatars' face (*i.e.*, nose area) may index the extraction of holistic information that captures the different facial characteristics in a single sight. At age 3 months, if infants perform a holistic processing, it would rely on fixations to the eyes. With advancing age and the progressive reliance on lower facial features, infants' gaze focus might move lower, to then include information from the mouth and thus to integrate both upper and lower features in a single sight. This last hypothesis allows to account for the augmentation of looking time toward the nose from age 3 to 7 months, even if this region does not appear strongly informative about the expression (which was the case for most expressions presented

here, *i.e*. for happiness, anger, fear, sadness). This early access to configural information might be a strong contributor to set on infants' expertise in face and facial expression processing emerging by the second half of the first year, supplying a holistic code that will guide further explorations of the relevant features.

Concerning the effect of facial expressions on the infants' processing of faces, our results highlight that, globally, infants looked longer at the avatar when it was expressive rather than unexpressive, and they tended to look longer to it when it expressed happiness rather than anger. One hypothesis that might account for the more extensive exploration of the avatars' expressive faces is that infants were simply more attracted by dynamic faces, since our neutral faces were static. However, complementary analyses indicate that only the 7 and 12month-old infants showed a stronger attraction for expressive faces. Thus, knowing the sensitivity of young infants to low level information like movement, the fact that the effect was not observed on the 3 month-old group argues against the hypothesis that the effect is due to low level characteristics of the stimuli, such as movement. Similarly, the attraction of attention toward specific features for older infants – like the eyes in fearful faces or the mouth in happy faces – cannot be explained by low level characteristics of the stimuli, since it does not occur at 3 months of age. Instead, our results suggest that the infants have acquired sensitivity to the meaning of these characteristics in faces.

The impact of being gazed on infants' processing of faces

Numerous studies interested into social referencing in young infants have shown that young infants are able to integrate and use both the facial expression and the gaze orientation of an expressor to adapt their behavior when confronted with a novel object or context (Hertenstein & Campos, 2004; Klinnert, 1984; Moses et al., 2001). Furthermore, studies using

ERPs highlighted that infants' Nc amplitude was modulated according to the expressor's emotion and gaze orientation (e.g., Hoehl et al., 2008; Hoehl & Striano, 2008), even in infants as young as 3 months (Hoehl et al., 2008).

In contrast, in the present study, the gaze orientation of the avatar's face did not affect the infants' visual exploration of it. To our knowledge, most of the studies using ERP and all studies in social referencing reporting a combined effect of the expressor's gaze and emotion on infants' responses presented an expressor that could either or not *look to an object*. The absence of concurrent object in our experimental design may have created a particular situation that has not encouraged the coupling between the gaze orientation and the displayed expression. Finally, the design used here – several expressions that followed one another in quite rapid sequences and the multiple alternations between the different gaze orientations– may have minimized any effect of gaze[1].

Conclusion

This study demonstrates that across development, infants progressively establish and refine their visual exploratory strategies. Specifically, our results highlight that along the first year (and particularly between 3 and 7 month of age) infants' visual strategies alter from a stage where exploration is unaffected by the emotional expression of the face, to a stage where exploration implies to reach face areas maximizing the informative content of facial expressions (Calvo & Nummenmaa, 2008; Smith et al., 2005). This particular focus on the most distinctive and representative features of facial expressions might be an important contributor to infant's socio-emotional development. First, an attentional scope directed on the most discriminant features of expressions may strongly improve infants' ability to discriminate and categorize different facial expressions, and thus improve their socio-

emotional skills. Second, this selective attentional focus will further lead to refine and attune the infants' representations of the different facial expressions, as those representations will increasingly emphasize the most characteristic and distinctive features of those expressions. Thus, integrating these distinct representations will in turn also contribute to improve the infants' own processing of facial expressions. Finally, another benefit from this focalization on the specific features of facial expressions is that it may allow infants to extract and bind the contextual multisensory cues that are concurrent to the expression (as suggested by Lewkowicz, 2010; Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012). These authors hypothesized, in their study on infant audiovisual processing of talking faces, that the infants' focalization on the mouth of talking faces strongly contributes to the acquisition of speech processing, as it allows the perception and binding of the redundant audio-visual cues. We may accordingly hypothesize that the infants' attentional focus on specific features of facial expressions might contribute to set on their expertise in the processing of emotional faces. The binding between expressions and their surrounding multisensory context might additionally contribute to assign a signal value to facial expressions, and thus to their access to the emotional content of facial expressions. Future studies should examine further this topic by investigating whether, how, and when during early development infants' visual exploration of expressive faces is affected by surrounding cues.

Footnote

[1] Some aspects of the data suggest however that gaze may have influenced the infants' exploration of some facial expressions, despite the lack of interactions involving this factor. To explore this possibility, we ran an ANOVA similar to the one reported above, but with the Expression factor reduced to three expressions – anger, happiness, and fear. The analysis was further restricted to the eyes' area which involves significant AUs for these three emotional expressions. These three expressions were selected because the same material, used with adults, showed the elicitation of different facial reactions in the perceiver according to the direction of the expressor's gaze (Soussignan et al., 2013). This analysis revealed a significant interaction between Age, Expression, and Gaze [$F(4,316)=3.54$, $\varepsilon=.98$, $p<.01$, $\eta p2=.04$]. Post-hoc Tukey's tests ($p<.05$) indicated that the effect of Gaze reached significance only in 12 month-olds and for avatars' faces expressing anger: infants looked less at the eyes of angry faces when the gaze was directed to them (149 ms vs. 212 ms). Thus, it cannot be excluded that a design limited to some expressions would attest for the earlier emergence of gaze orientation effects on facial emotion processing.

References

Adolphs, R., Gosselin, F., Buchanan, T. W., Tranel, D., Schyns, P., & Damasio, A. R. (2005). A mechanism for impaired fear recognition after amygdala damage. *Nature*, *433*(7021), 68–72.

Amso, D., Fitzgerald, M., Davidow, J., Gilhooly, T., & Tottenham, N. (2010). Visual exploration strategies and the development of infants' facial emotion discrimination. *Frontiers in Psychology*, *1*(180), 1-7.

Barrera, M. E., & Maurer, D. (1981). The perception of facial expressions by the three-month-old. *Child Development*, *52*(1), 203–206.

Bartrip, J., Morton, J., & de Schonen, S. (2001). Responses to mother's face in 3-week to 5-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*, *19*(2), 219–232.

Baudouin, J.-Y., & Franck, N. (2008). Facial emotion recognition in schizophrenia. In J. B. Teiford (Ed.), *Social Perception: 21st Century Issues and Challenges*. New-York : Nova Science Publishers Inc.

Biringen, Z., Emde, R., Campos, J., & Appelbaum, M. (1995). Affective reorganization in the infant, the mother, and the dyad: the role of upright locomotion and its timing. *Child Development*, *66*, 499–514.

Bornstein, M. H., & Arterberry, M. E. (2003). Recognition, discrimination and categorization of smiling by 5-month-old infants. *Developmental Science*, *6*(5), 585–599.

Bornstein, M. H., Arterberry, M. E., Mash, C., & Manian, N. (2011). Discrimination of facial expression by 5-month-old infants of nondepressed and clinically depressed mothers. *Infant Behavior & Development*, *34*(1), 100–6.

Calvo, M. G., & Nummenmaa, L. (2008). Detection of emotional faces: salient physical features guide effective visual search. *Journal of Experimental Psychology - General*, *137*(3), 471–494.

Campos, J. J., Kennoian, R., & Zumbahlen, M. R. (1992). Socioemotional transformations in the family system following infant crawling onset. *New Directions for Child Development*, *1992*(55), 25–40.

Carver, L. J., & Vaccaro, B. G. (2007). 12-month-old infants allocate increased neural resources to stimuli associated with negative adult emotion. *Developmental Psychology*, *43*(1), 54–69.

Chambon, V., Baudouin, J.-Y., & Franck, N. (2006). The role of configural information in facial emotion recognition in schizophrenia. *Neuropsychologia*, *44*(12), 2437–44.

Cohen, L. B., & Cashon, C. H. (2001). Do 7-month-old infants process independent features or facial configurations? *Infant and Child Development*, *10*(1-2), 83–92.

Colombo, J. (2001). The development of visual attention in infancy. *Annual Review of Psychology*, *52*, 337–367.

De Heering, A., Rossion, B., Turati, C., & Simion, F. (2008). Holistic face processing can be independent of gaze behavior: Evidence from the face composite effect. *Journal of Neuropsychology*, 2, 183-195.

Durand, K., Gallay, M., Seigneuric, A., Robichon, F., & Baudouin, J.-Y. (2007). The development of facial emotion recognition: the role of configural information. *Journal of Experimental Child Psychology*, *97*(1), 14–27.

Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial Action Coding System: A technic for the measurement of facial movement*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.

Farroni, T., Csibra, G., Simion, F., & Johnson, M. H. (2002). Eye contact detection in humans from birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(14), 9602–9605.

Farroni, T., Menon, E., Rigato, S., & Johnson, M. H. (2007). The perception of facial expressions in newborns. *European Journal of Developmental Psychology*, *4*(1), 2–13.

Feinman, S., & Lewis, M. (1983). Social referencing at ten months: a second-order effect on infants' responses to strangers. *Child Development*, *54*(4), 878–887.

Field, T. M., Woodson, R., Cohen, D., Greenberg, R., Garcia, R., & Collins, K. (1983). Discrimination and imitation of facial expressions by term and preterm neonates. *Infant Behavior Development*, *6*(4), 485–489.

Field, T., Woodson, R., Greenberg, R., & Cohen, D. (1982). Discrimination and imitation of facial expressions by neonates. *Science*, *218*(8), 179–181.

Fox, E., & Damjanovic, L. (2007). The eyes are sufficient to produce a threat superiority effect. *Emotion*, *6*(3), 534–539.

Gallay, M., Baudouin, J.Y., Durand, K., Lemoine, C., & Lécuyer, R. (2006). Qualitative differences in the exploration of upright and upside-down faces in four-month-old infants: an eye-movement study. *Child Development*, *77*(4), 984–996.

Guellaï, B., & Streri, A. (2011). Cues for early social skills: Direct gaze modulates newborns' recognition of talking faces. *PLoS ONE*, *6*(4), e18610.

Gunnar, M. R., & Stone, C. (1984). The effects of positive maternal affect on infant responses to pleasant, ambiguous, and fear-provoking toys. *Child Development*, *55*(4), 1231-1236.

Hailine, L. (1978). Developmental changes in visual scanning of face and nonface patterns by infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *25*, 90–115.

Haith, M., Bergman, T., & Moore, M. (1977). Eye contact and face scanning in early infancy. *Science*, *198*, 853–855.

Haviland, J. M., & Lelwica, M. (1987). The induced affect response: 10-week-old infants' responses to three emotion expressions. *Developmental Psychology*, *23*(1), 97–104.

Hernandez-Reif, M., Field, T., Diego, M., Vera, Y., & Pickens, J. (2006). Happy faces are habituated more slowly by infants of depressed mothers. *Infant Behavior & Development*, *29*(1), 131–5.

Hertenstein, M. J., & Campos, J. J. (2004). The retention effects of an adult's emotional displays on infant behavior. *Child Development*, *75*(2), 595–613.

Hoehl, S. (2014). Emotion processing in infancy. In K. H. Lagattuta (Ed.), *Children and Emotion: New Insights into Developmental Affective Sciences* (pp. 1–12). Basel: Karger.

Hoehl, S., & Striano, T. (2008). Neural processing of eye gaze and threat-related emotional facial expressions in infancy. *Child Development*, *79*(6), 1752–60.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010a). Infants' neural processing of positive emotion and eye gaze. *Social Neuroscience*, *5*(1), 30–39.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010b). The development of emotional face and eye gaze processing. *Developmental Science*, *13*(6), 813–25.

Hoehl, S., Wiese, L., & Striano, T. (2008). Young infants' neural processing of objects is affected by eye gaze direction and emotional expression. *PloS One*, *3*(6), e2389.

Hsiao, J. H., & Cottrell, G. W. (2008). Two fixations suffice in face recognition. *Psychological Science*, 19, 998-1006.

Hunnius, S., & Geuze, R. H. (2004). Developmental changes in visual scanning of dynamic faces and abstract stimuli in infants: A Longitudinal Study. *Infancy*, *6*(2), 231–255.

Hunnius, S., de Wit, T. C. J., Vrins, S., & von Hofsten, C. (2011). Facing threat: infants' and adults' visual scanning of faces with neutral, happy, sad, angry, and fearful emotional expressions. *Cognition & Emotion*, *25*(2), 193–205.

Jones, W., & Klin, A. (2013). Attention to eyes is present but in decline in 2-6-month-old infants later diagnosed with autism. *Nature*, *504*(7480), 427–31.

Kestenbaum, R., & Nelson, C. A. (1990). The recognition and categorization of upright and inverted emotional expressions by 7-month-old infants. *Infant Behavior and Development*, *13*(4), 497–511.

Kleiner, K., & Banks, M. (1987). Stimulus energy does not account for 2-Month-olds' face preferences. *Journal of Experimental Psychology*, *13*(4), 594–600.

Klinnert, M. D. (1984). The regulation of infant behavior by maternal facial expression. *Infant Behavior and Development*, *7*(4), 447–465.

Kotsoni, E., De Haan, M., & Johnson, M. H. (2001). Categorical perception of facial expressions by 7-month-old infants. *Perception*, *30*(9), 1115–1125.

Kret, M. E., Stekelenburg, J. J., Roelofs, K., & de Gelder, B. (2013). Perception of face and body expressions using electromyography, pupillometry and gaze measures. *Frontiers in Psychology*, *4*(28), 1-12.

LaBarbera, J., Izard, C., Vietze, P., & Parisi, S. (1976). Four- and Six-month-old infants' visual responses to joy, anger, and neutral expressions. *Child Development*, *47*, 535–538.

Leppänen, J. M., & Nelson, C. A. (2012). Early development of fear processing; *Current Directions in Psychological Science*, *21*(3), 200–204.

Lewkowicz, D. J. (2010). The Ontogeny of Human Multisensory Object Perception: A Constructivist Account. In J. Kaiser & M. J. Naumer (Eds.), *Multisensory Object Perception in the Primate Brain* (pp. 303–327). New York, NY: Springer New York.

Lewkowicz, D. J., & Hansen-Tift, A. M. (2012). Infants deploy selective attention to the mouth of a talking face when learning speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(5), 1431–6.

Liu, S., Quinn, P. C., Wheeler, A., Xiao, N., Ge, L., & Lee, K. (2011). Similarity and difference in the processing of same- and other-race faces as revealed by eye tracking in 4- to 9-month-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(1), 180–9.

Liu, S., Xiao, W. S., Xiao, N. G., Quinn, P. C., Zhang, Y., Chen, H., Ge, L., Pascalis, O., & Lee, K. (2015). Development of visual preference for own- versus other-race faces in infancy. *Developmental Psychology*, *51*(4), 500–11.

Ludemann, P. M. (1991). Generalized discrimination of positive facial expressions by seven- and ten-month-old infants. *Child Development*, *62*(1), 55–67.

Ludemann, P. M., & Nelson, C. A. (1988). Categorical representation of facial expressions by 7-month-old infants. *Developmental Psychology*, *24*(4), 492–501.

Lundqvist, D., Esteves, F., & Ohman, A. (1999). The face of wrath: Critical features for conveying facial threat. *Cognition & Emotion*, *13*(6), 691–711.

Malcolm, G. L., Lanyon, L. J., Fugard, A. J. B., & Barton, J. J. S. (2008). Scan patterns during the processing of facial expression versus identity : An exploration of task-driven and stimulus-driven effects. *Journal of Vision*, *8*(8), 1–9.

Maurer, D., & Salapatek, P. (1976). Developmental changes in the scanning of faces by young infants. *Child Development*, *47*, 523–527.

Montague, D. P. F., & Walker-Andrews, A. S. (2001). Peekaboo: A new look at infants' perception of emotion expressions. *Developmental Psychology*, *37*(6), 826–838.

Morton, J., & Johnson, M. H. (1991). CONSPEC and CONLERN: A two-process theory of infant face recognition. *Psychological Review*, *98*(2), 164–181.

Moses, L. J., Baldwin, D. A., Rosicky, J. G., & Tidball, G. (2001). Evidence for referential understanding in the emotions domain at twelve and eighteen months. *Child Development*, *72*(3), 718–735.

Nelson, C. A. (2001). The development and neural bases of face recognition. *Infant and Child Development*, *10*, 3–18.

Nelson, C. A., & Dolgin, K. G. (1985). The Generalized discrimination of facial expressions by seven-month-old infants. *Child Development*, 56, 58–61.

Nelson, C. A., Morse, P. A., & Leavitt, L. A. (1979). Recognition of facial expressions by seven-month-old infants. *Child Development*, *50*, 1239–1242.

Oakes, L. M., & Ellis, A. E. (2013). An eye-tracking investigation of developmental changes in infants' exploration of upright and inverted human faces. *Infancy*, *18*(1), 1–13.

Pelphrey, K. A., Sasson, N. J., Reznick, J. S., Paul, G., Goldman, B. D., & Piven, J. (2002). Visual scanning of faces in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *32*(4), 249–261.

Peltola, M. J., Hietanen, J. K., Forssman, L., & Leppänen, J. M. (2013). The emergence and stability of the attentional bias to fearful faces in infancy. *Infancy*, *18*(6), 905–926.

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Mäki, S., & Hietanen, J. K. (2009). Emergence of enhanced attention to fearful faces between 5 and 7 months of age. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *4*(2), 134–42.

Richards, J. E., Reynolds, G. D., & Courage, M. L. (2010). The neural bases of infant attention. *Current Directions in Psychological Science*, *19*(1), 41–46.

Rigato, S., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2010). The shared signal hypothesis and neural responses to expressions and gaze in infants and adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *5*(1), 88–97.

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*, *14*(13), 1–16.

Schwartz, G. M., Izard, C. E., & Ansul, S. E. (1985). The 5-month-old's ability to discriminate facial expressions of emotion. *Infant Behavior and Development*, *8*(1), 65–77.

Schwarzer, G., Huber, O., & Dümmler, T. (2005). Gaze behavior in analytical and holistic face processing. *Memory & Cognition*, 33, 344–354.

Serrano, J., Iglesias, J., & Loeches, A. (1992). Visual discrimination and recognition of facial expressions of anger, fear, and surprise in 4- to 6-month-old infants. *Developmental Psychobiology*, *25*(6), 411–425.

Serrano, J. M., Iglesias, J., & Loeches, A. (1995). Infants' responses to adult static facial expressions. *Infant Behavior and Development*, *18*(4), 477–482.

Smith, M. L., Cottrell, G. W., Gosselin, F., & Schyns, P. G. (2005). Transmitting and decoding facial expressions. *Psychological Science*, *16*, 184–189.

Sorce, J. F., Emde, R. N., Campos, J. J., & Klinnert, M. D. (1985). Maternal emotional signaling: Its effect on the visual cliff behavior of 1-year-olds. *Developmental Psychology*, *21*(1), 195–200.

Soussignan, R. Chadwick, M., Leonor, P., Conty, L., Dezecache, G., & Grèzes, J., (2013). Self-relevance appraisal of gaze direction and dynamic facial expressions: Effects on facial electromyographic and autonomic reactions. *Emotion*. 13, 330-337.

Striano, T., & Rochat, P. (2000). Emergence of Selective Social Referencing in Infancy. *Infancy*, *1*(2), 253–264.

Striano, T., Vaish, A., & Benigno, J. P. (2006). The meaning of infants' looks: Information seeking and comfort seeking? *British Journal of Developmental Psychology*, *24*(3), 615–630.

Turati, C., Macchi Cassia, V., Simion, F., & Leo, I. (2006). Newborns' face recognition: Role of inner and outer facial features. *Child Development*, *77*(2), 297-311.

Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are created equal: the negativity bias in social-emotional development. *Psychological Bulletin*, *134*(3), 383–403.

Wilcox, T., Stubbs, J. a, Wheeler, L., & Alexander, G. M. (2013). Infants' scanning of dynamic faces during the first year. *Infant Behavior & Development*, *36*(4), 513–6.

Xiao, W. S., Xiao, N. G., Quinn, P. C., Anzures, G., & Lee, K. (2013). Development of face scanning for own- and other-race faces in infancy. *International Journal of Behavioral Development*, *37*(2), 100–105.

Young-Browne, G., Rosenfeld, H. M., & Horowitz, F. D. (1977). Infant discrimination of facial expressions. *Child Development*, *48*(2), 555–562.

Yrttiaho, S., Forssman, L., Kaatiala, J., & Leppänen, J. M. (2014). Developmental precursors of social brain networks: the emergence of attentional and cortical sensitivity to facial expressions in 5 to 7 months old infants. *PLoS One*, *9*(6), e100811.

Acknowledgements

The authors thank the parents and infants who agreed to take part in the study, Sylviane Martin for recruiting participating families, Cedric Serrano and Michel Tavan for technical assistance, and Justine Jarrige and Ornella Godard for their help in carrying out the experiments. This work was financially supported by the Centre National de la Recherche Scientifique, Paris; the French National Agency for Research (project SELFREADEMO, EMCO, 2011), Paris; the Regional Council of Burgundy (PARI grant), Dijon; the Ministry of Research and Education, Paris (PhD grant to ND); the Institut Universitaire de France, Paris (to JYB).

ANNEXE 2 :
ARTICLE SOUMIS AUPRES DE *DEVELOPMENTAL PSYCHOLOGY*

Running head: DEVELOPMENT OF EMOTIONAL MIMICRY IN INFANTS

Do 3-12 Month-Old Infants Mimic Facial Expressions? A Study of Emotional Development using Eye Movement Tracking and Fine-Grained Coding of Facial Movements

Robert Soussignan[a], Nicolas Dollion[a], Benoist Schaal[a], Karine Durand[a], Nadja Reissland[b], Jean-Yves Baudouin[a]

[a]Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, CNRS-Université de Bourgogne, Dijon, France.

[b]Department of Psychology, University of Durham, Durham, United Kingdom

Corresponding concerning this article should be addressed to Robert Soussignan, Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, UMR 6265 CNRS-INRA-Université de Bourgogne, 9[E] boulevard Jeanne d'Arc, 21000 Dijon, France.
E-mail : robert.soussignan@u-bourgogne.fr; robert.soussignan@numericable.fr

Abstract

The ability to recognize and adaptively respond to signals from facial expressions plays an important role in socioemotional development. Although this skill develops from early to late infancy, it is not clear how infants respond to specific emotional cues of unfamiliar faces, whether their facial displays are modulated by contextual cues (e.g., gaze direction) and are constrained by developmental changes in the ability to discriminate emotions. We therefore examined, using the Baby FACS and eye-movement tracking, facial displays and visual exploration in 3-, 7-, and 12-month-old infants while exposed to dynamic facial expressions (joy, anger, disgust, fear, and sadness) of humanoid virtual characters with either direct or static averted gaze direction. Seven- and 12-month-old infants, but not the 3-month-olds, spent more time looking at areas of the face using muscle actions involved in distinct emotional expressions. They also responded by matching the valence of avatars' expressions. However, no matching of specific facial actions indexing each negative emotion was detected. Joy and fear faces were explored for longer and induced fewer gaze aversion than neutral and anger faces in the 7- and 12-month-olds. Furthermore, 12-month-olds responded more differentially than the 7-month-olds to negative expressions with direct gaze. The results suggest that valence-based emotional mimicry emerges in infancy during a period where the decoding of others' expressions undergoes developmental tuning and becomes increasingly sensitive to social signal value of emotions. Our data support the view that experience-expectant and experience-dependent mechanisms are likely at work for both discrimination and responsiveness to others' emotional expressions during the last half of the first year.

Keywords: Infant, development, emotion, facial expressions, gaze direction, mimicry.

Introduction

The ability to spontaneously and unintentionally reproduce the behavior of conspecifics, variously termed matching behavior, imitation or mimicry, is rooted in the neonatal period. This phenomena has been demonstrated for facial and manual gestures including tongue, lip, mouth and finger movements (Anisfeld, 1996; Meltzoff & Moore, 1977, 1983; Nagy, Pal & Orvos, 2014; Reissland, 1988; Soussignan, Courtial, Canet, Danon-Apter & Nadel, 2011). In contrast, neonatal mimicry for emotional displays is uncertain because the few existing studies have not only provided mixed findings but have also suggested potential differences between motor mimicry and of emotional mimicry (Field, Woodson, Greenberg & Cohen, 1982; Kaitz, Meschulach-Sarfaty, & Auerbach, 1988). In particular, the findings of Kaitz et al (1988) do not support Field et al.'s conclusion that newborns can reproduce modeled facial expressions of happiness, surprise or sadness when a well controlled procedure was used to replicate their findings. Nevertheless, infants were able to reproduce facial movements when dynamic tongue protrusion was the modeled action. These results suggest that despite limited visual acuity, newborns can process, probably via a subcortical pathway (Johnson, 2005), features such as a dynamically presented tongue protrusion allowing them to accurately match perception with action. This is in contrast to findings that infants under 2 months of age have a poor ability to process the internal features of faces (Bushnell, 1979; Maurer & Salapatek, 1976), as well as facial emotional displays, which as communicative tools are typically embedded in an interactive context that emerges later. It is indeed only around 2-3 months that infants begin to be sensitive to positive facial displays during exchanges by responding contingently in face to face engagement (Bertin & Sriano, 2006; Bigelow & DeCoste, 2003; Messinger & Fogel, 2007; Rochat, 1999; Soussignan, Nadel, Canet, & Gerardin, 2006). Kaitz et al.'s data suggest that the origin of emotional mimicry differs from that of motor mimicry and involves a distinct underlying

mechanism in infants. Such hypothesis is supported by the fact that emotional displays, and not non emotional acts, are adaptive communicative signals providing information about individual's states of mind, dispositions and behavioral intentions that have probably co-evolved with recipients' behavioral responses (Dezecache, Jacob & Grèzes, 2015; Fridlund, 1994; Hess & Fisher, 2013; Scott-Phillips, 2008). Furthermore, although both motor and emotional mimicries are thought to promote social cohesion to the service of affiliation (Chartrand & Bargh, 1999; Fisher & Manstead, 2008), emotional mimicry provides more salient signals which can lead to emotional contagion and affective empathy (Decety & Svetlova, 2012; Hatfield, Cacioppo & Rapson, 1994).

To date, the developmental course and the underlying mechanism of emotional mimicry in infancy remain poorly understood because, to our knowledge, there are no infant studies during the first year of life using both highly controlled facial stimuli and a precise measurement of facial movements of both the expresser and the observer. In the classical paradigm, pictures or movies of facial expressions of a signaler are presented and the receiver's rapid reactivity of specific facial muscles is recorded through electromyography (EMG) or through an anatomically-based coding system (i.e., the Facial Action Coding System, FACS, Ekman & Friesen, 1978) (Dimberg &Thunberg, 1998; Sato & Yoshikawa, 2007; Schrammel, Pannasch, Graupner, Mojzisch, & Velichkovsk, 2009; Soussignan et al., 2013). Given that mimicry is modulated by a number of social cognitive factors in adults (Chartrand & van Baaren, 2009; Hess & Fisher, 2013), infancy is a period where spontaneous facial expressions are more likely to be shown in a face-to-face communication paradigm.

Previous studies conducted during the first year of life are mainly based on multimodal, visual and vocal emotional signals, during naturalistic, face-to-face adult-infant interactions. The studies were designed to investigate the developmental differentiation of facial expressions. Although this research has generated controversial findings, it may be

relevant to the issue of the developmental course of emotional mimicry and its potential underlying mechanisms.The controversy arises because of various contradictory theories of emotional development including gradual differentiation, dynamical systems or functionalist perspectives (Barrett & Campos, 1987; Camras & Fatani, 2010, Camras & Shutter, 2010; Soussignan & Schaal, 2005; Sroufe, 1995) and differential emotion theory (DET) (Ackerman, Abe, & Izard; Izard & Malatesta, 1987). Proponents of the DET argue that facial expressions emerge without precursors, are morphologically stable during early infancy and reflect discrete emotions. Based on the assumptions of the DET, the Maximally Discriminative Facial Movement Coding System (MAX; Izard, 1979) has been developed to derive templates from adult prototypes to identify infants' facial expressions and infer their corresponding emotions. While some studies reported direct matching and morphological stability for some MAX-specified facial expressions (joy, anger, sadness, interest, surprise) over the first 9 months (Haviland & Lelwica, 1987; Izard et al., 1995; Termine & Izard, 1988), other studies did not confirm that infants simple mirrored adult expressions (D'Entremont, & Muir, 1999; Montague & Walker-Andrews, 2001). Futhermore, studies conducted in various social and non social settings provides little evidence that the MAX-specified negative expressions reflect discrete emotions and suggest that infants may be responding to the meaning or valence of each expression (Bennett, Bendersky, & Lewis, 2005; Camras & Shutter, 2010; Camras et al., 2007; Oster, Hegley, & Nagel, 1992). However, naturalistic studies conducted in face-to-face adult-infant interactions are limited because they do not focus on the sender's facial signals and have not tested whether infants' facial responsiveness is constrained by their ability to decode the sender's facial expressions.

In sum, we currently have little understanding of how infants respond to facial expressions, whether they mimic facial displays and whether their facial displays develop from early to later infancy as a function of the infants'ability to discriminate and recognize

emotions. Furthermore, we do not know whether their facial displays are modulated by contextual social cues such as other's gaze direction. Gaze direction is crucial because perceivers use it to infer another person's focus of interest and when combined with the sender's emotional expressions may convey information about communicative intentions and future behavior (Emery, 2000; Meltzoff & Brooks, 2007; Soussignan et al., 2013).

Thus, the purpose of the current study is to test whether infants match their facial movements to observed emotional expressions (emotional mimicry); whether these responses are modulated by gaze direction as well as by developmental differences in the ability to discriminate emotional expressions; and if so to clarify the underlying mechanisms accounting for interpersonal emotional matching from early to late infancy. In order to examine these questions, we firstly tested whether 3, 7 and 12 month-old infants show differentiated and congruent facial responses (measured with the Baby FACS) by watching avatars (virtual human like-characters) displaying dynamic facial expressions of five basic emotions (joy, sadness, anger, fear, disgust, see Figure 1). Avatars were used because in a number of previous studies infants' facial expressions to positive and negative mother–infant interactions (Haviland & Lelwica, 1987; Izard et al., 1995; Termine & Izard, 1988) were based on both the familiarity of the partner and the nature of emotional signals of the sender. Thus, in order to control for whether infants perceive and respond to invariants in facial expressions related to human emotional templates and changes in gaze direction, in the present study, we used "human" avatars' facial expressions. Secondly, we investigated, using eye-movement tracking, infants' visual exploration of the avatars' expressive faces in order to test whether developmental changes in the ability to discriminate emotional expressions are a prerequisite to respond differentially and congruently to human facial expressions.

Based on theoretical frameworks of mimicry, we make the following predictions. First, from the classical model of mimicry, namely the matched motor hypothesis suggesting

a perception-behavior link (Chartrand & Bargh, 1999; Preston & de Waal, 2002), perceiving another person's behavior automatically activates our own motor representation of that behavior, through the so-called mirror neuron system (Rizzolatti, Fabbri-Destro & Cattaneo, 2009). Following this model, infants are expected to perceive and mirror distinct facial expressions. Thus, they should display differentiated and congruent facial movements representing basic emotions, with gaze direction and developmental cognitive changes having a limited impact. This selective facial matching should be accompanied by a distinct pattern of visual exploration of facial expressions as measured by direct observation and eye-movement tracking of infants' gaze behavior on the sender's face.

Second, from a cognitive appraisal perspective, observing an emotional expression may elicit either congruent (i.e., emotional mimicry) or incongruent (i.e., emotional reaction) behavior. From this perspective, contextual information (e.g., gaze direction, body orientation, body posture), the observer's emotional state, the observer-sender relationship and other factors (e.g., liking, affiliative intent, in-group member, gender) are powerful moderators (Grèzes et al., 2013; Hess & Fisher, 2013; Likowski, Mühlberger, Seibt, Pauli, & Weyers 2008; Moody, McIntosh, Mann, & Weisser, 2007; Schrammel et al., 2009; Soussignan et al., 2013; Soussignan, Schaal, Boulanger, Garcia, & Jiang, 2015; Van der Schalk et al., 2011). In particular, as an alternative to the matched motor hypothesis, a contextualized view of emotional mimicry has been recently proposed according to which emotional mimicry would not be merely based on the direct reproduction of isolated and objective features of the sender (e.g., facial muscle actions), but on the appraisal of the meaning of emotion signals conveying intentions in a specific context for regulating the relation with the sender (Hess & Fisher, 2013, 2014). It has been argued that the mimicked display reflects sharing of the valence of expressions and of the emotional perspective of the

other person, rather than reacting to the sender, and promotes affiliation goals between both partners engaged in dyadic exchanges (Hess & Fisher, 2013).

Prior studies manipulating the interaction between emotion and gaze in avatars' facial expressions have examined facial EMG in adults (Schrammel et al., 2009; Soussignan et al., 2013). Results with adult participants provided little evidence for a motor matching hypothesis; rather the findings support the appraisal theory which suggests that the self-relevance of a sender's cues, namely gaze direction, and the senders' characteristics, namely gender, accounted for interpersonal matching of facial displays. More specifically, rapid facial responses (RFRs) of specific muscles indexing differentiated emotions were potentiated by mutual eye contact when participants viewed approach-oriented emotional expressions such as happy and angry faces. These findings suggest that the communicative function of facial expressions is to signal to a receiver either an intent to share positive feelings and to affiliate (joy face) or a threat and hostility (anger face) when the gaze is directed to the viewer rather averted (see also Sander, Grandjean, Kaiser, Wehrle, & Scherer, 2007). On the other hand, RFRs occurred only to fear expressions with averted gaze (Soussignan et al., 2013), a result in line with behavioral and fMRI studies (N'Diaye, Sander, & Vuilleumier, 2009; Hess, Adams, & Kleck, 2007; Sander et al., 2007) suggesting that fearful faces with averted gaze may signal to a receiver the location of a potential source of danger in the shared environment.

Based on appraisal theories, we therefore investigate whether infants evaluate the self-relevance of facial expressions as a function of the significance of contextual cues (i.e., gaze direction) as well as developmental cognitive changes (i.e., improvement in their ability to process gaze and to discriminate and categorize facial expressions). An improvement in the decoding of emotional expressions has been consistently reported during the second half of the first year, with a negative bias in emotional processing (Grossmann, Striano, & Friederici, 2007; Peltola, Hietanen, Forssman, & Leppänen, 2013; Peltola, Leppänen, Mäki, & Hietanen,

2009; Vaish, Grossmann &Woodward, 2008). Indeed, while 2-3 month-olds are sensitive to joy faces of a partner establishing an eye contact (Hains & Muir, 1996) and discriminate between smiling and frowning expressions (Barrera & Maurer, 1981), it is only from 3 to 7 months that infants behaviorally and neurally discriminate between negative facial expressions of basic emotions (de Haan & Nelson, 1998; Hoehl & Striano, 2008; Hoehl, Wiese, & Striano, 2008; Leppänen, Moulson, Vogel-Farley, & Nelson, 2007; Ludemann & Nelson, 1988; Serrano, Iglesias, & Loeches,1992; Young-Browne, Rosenfeld, & Horowitz, 1977). This is demonstrated by the fact that infants show attention biases toward fearful faces between 5 and 7 months of age (Peltola et al., 2009) and that their ability to categorize negative expressions emerges later (7 months) than that of positive expressions (5 months) (Bornstein & Arterberry, 2003; Kestenbaun & Nelson, 1990; Kotsoni, de Haan & Johnson, 2001; Ludemann & Nelson, 1988; Nelson & Dolgin, 1985). From 8 to 12 months, with the onset of locomotion infants become more capable of goal attainment which fosters a negative bias in emotional expressiveness. For instance, there is an increase in infants' anger responses to events when being frustrated and attentiveness to negative facial signals coincides with the onset of fear responses following self-produced locomotion (e.g., fear of heights, wariness toward strangers) (Campos, Kermoian & Zumbahlen, 1992). Infants also exhibit increased ability to respond to negative emotional messages of adults' facial expressions in ambiguous or novel situations as illustrated by the social referencing phenomenon (Campos & Sternberg, 1981; Carver & Vaccaro, 2007; Sorce, Emde, Campos, & Klinnert, 1985). Finally this increased ability to decode facial expressions around 7 months becomes contextualized when they attend more to joy and anger faces when mutual eye contact is present rather than when the sender shows emotions with averted gaze (Hoehl & Striano, 2008; Rigato, Farroni, & Johnson, 2011; Striano, Kopp, Grossmann, & Reid, 2006). This suggests that infants might

process social gaze cues related to approach-oriented emotions similarly to adults do (Rigato, Menon, Farroni, Johnson, 2011).

In summary, in the present study, we examine whether 7- and 12-month-olds display a greater differentiation in both facial displays, using the Baby FACS (Oster, 2007), and visual exploration, using eye-movement tracking, to emotional expressions of a virtual character compared to the 3-month-old babies' expressions. We also investigate whether infants match the valence of avatars'facial expressions rather than the specific expressive movement as hypothesized by a valence-based account (Hess & Fisher, 2013) and by emotion research suggesting an apparent lack of discrete facial expressions in infants despite their ability to perceive and respond to discrete emotional expressions (Camras et al., 2007; Camras & Shutter, 2010; Hoehl & Striano, 2010a). Developmental changes in the pattern of infants' visual exploration of facial displays were hypothesized on the basis of previous studies: the 7- and 12-month-olds are expected to focus more strongly than the 3-month-olds on the most relevant facial muscle movements when perceiving distinct emotional expressions. A change in the negativity bias is also hypothesized, in that 3-month-olds should reveal more congruent facial reactions for joy than for negative expressions, while the reverse pattern should be observed in the 7- and 12-month-olds. Finally, based on the literature reporting an increased ability to process gaze cues for approach-oriented emotions in the second half of the first year, we investigated whether 7- and 12-month-olds responded more to anger expressions when shown with direct gaze than with averted gaze as compared to 3-month-old infants.

Methods

Participants

Families were recruited through postal letters and a follow-up phone call. During this phone call, parents were informed of the general goal and procedure of the experiment. The

fully detailed description of the experimental material and procedure was given to them when they came to the baby-laboratory of the *Centre des Sciences du Goût*.

Two hundred and thirty two full-term infants participated, consisting of three groups of 3-, 7-, and 12-month-olds (n = 95, 69, and 68, rerspectively). A high attrition rate was present in this study. One hundred and twenty nine infants were eliminated because: (1) they were fussy (*n* = 24), cried (*n* = 35), were inattentive (*n* = 36) or distracted by the parent (*n* = 2) during the test; (2) of technical and video recording problems (*n* = 23), and (3) other problems (noise, vomit, hand in the mouth: *n* = 9). The final sample comprised 104 infants consisting of 36 3-month-old (age: *M* =3.07 months, *SD* = 3.26 days; 18 females and 18 males), 35 7-month-old (age: *M* =7.15 months, *SD* = 3.19 days; 18 females and 17 males) and 33 12-month-old infants (age: *M* =12.21 months, *SD* = 2.90 days; 17 females and 16 males). All infants weighed at birth greater than 2150 g, had 1- and 5-min Apgar scores greater than 7, and were healthy at the time of testing. For the whole sample, the parents did not report history of neurological problems or developmental diseases.

All parents gave their written consent to let their infant participate. One or both parents were present during the experiment, and were allowed to discontinue the experiment in case of infant non-compliance. All testing was run according to the Declaration of Helsinki for experimentation with human participants (*British Medical Journal*, 1991; 302: 1194).

Facial Stimuli

We used virtual characters that are highly-controlled, realistic stimuli. Movies depicting avatars (1 male, 1 female) were created using Poser 9 software (Smith Micro, Watsonville, CA). Dynamic facial expressions of five emotions (joy, anger, fear, disgust and sadness) were obtained by manipulating polygon groups on a 3D-mesh that made up the avatars' facial structure. The polygon groups were comparable to the action units (AUs) as described in the FACS (Ekman, Friesen, & Hager, 2002). A certified FACS coder (RS)

manipulated AUs corresponding to prototypical facial expressions by using the following codes (Ekman & Friesen, 1978): AUs 6+12+25 for joy, 4+24 for anger, 9 for disgust, 1+4+15 for sadness, and 1+2+4+5+20 for fear. Neutral faces of avatars were used as control stimuli. Avatars had either a static direct or a static averted gaze. Gaze direction was created by angular deviation of the iris structure relative to the axis of the head, using a computational displacement of 15° to either side (left/right) to generate counterbalanced conditions. Each movie clip lasted 2 s with the rise time of high-intensity expression (apex) occurring at 500 ms and then followed by a 1500 ms static facial expression. These movie clips were mounted on a black background and had a resolution of 488 × 500 pixels corresponding to 28.9 cm width and 29.6 cm length once displayed on the monitor.

Pretests conducted with adult judges confirmed that the facial expressions of emotion (neutral, joy, anger, disgust, fear, and sadness) were accurately decoded and that gaze direction (straight, averted) was accurately detected regardless of the type of emotion (Soussignan et al., 2013).

For each male or female avatar, a trial comprised the same 2-s sequence repeated three times. Thirty-six videoclips of 6 s were created so that all conditions were counterbalanced in a 6 × 3 × 2-factorial design [facial expression (neutral, joy, anger, disgust, fear, sadness) × gaze direction (direct, averted toward the left or right) × sex of the avatar (male or female)].

Procedure

The experiment took place in the baby-lab, a dedicated room which visual, acoustical and thermal ambience was held as constant as possible. On arrival, parent(s) and infant were put at ease in receiving a fully detailed description of the experimental session and material, while an experimenter played with the infant. When the infant appeared relaxed, s/he was comfortably secured in a baby car-seat, in a semi-reclining position.

The facial stimuli were presented on a 22-inch monitor, with a resolution of 1680 x 1050 pixels, equipped with an eye-movement tracking system (RED250, SensoMotoric Instruments GmbH, Teltow, Germany) mounted just below it. To record the infants' face, an additional video camera (Handycam, Sony) was mounted on the top of the monitor. The infant's face was positioned facing the screen of the eye- movement tracking system at a distance of about 60 ± 10 cm and a video camera at a distance of about 65 ± 10 cm. Before starting the experiment, parents were asked to stand silent and immobile during testing behind the infant at an approximate distance of 1.5 m. They were told that they could talk reassuringly to their child and take him/her out of the chair if s/he became restless. Each infant was required to pass two experimental steps: the calibration and the test. The experimenter was seated behind the infant looking at the control monitor and providing the stimuli during the calibration phase, as well as checking infant's behaviors and state during the test.

Calibration. A moving and noisy cartoon figure was presented on the screen. When the infant started to look at it, the experimenter manually triggered the move of the figure to another position on the screen and let it remain in that position until the infant fixated it again, and then up to 5 locations covering the whole surface of the screen (center and 4 corners close to the screen borders). If the eye-movement tracking system failed to detect the infant's eyes for one or more of these locations, the calibration procedure was repeated. If after three calibration trials the system could not find the infant's eyes, the experiment was started.

Testing. Before testing, the experimenter started the video recording of infants' face. Each infant was consecutively exposed to the movies of the same female or male avatar for 12 trials (6 facial expressions x 2 gaze directions) using the ExperimentCenter software (version 3.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany) designed for the SMI eye movement tracking system. During each trial, the same 2-s animated sequence was repeated three times.

Each trial was separated from each other by a blue noiseless screen for 3 s. Figure 1 shows an example of one trial with the female avatar expressing joy. The order of trials was randomized across participants, while the presentation side of the gaze direction on the screen (left or right) and the gender of avatar were counterbalanced across participants.

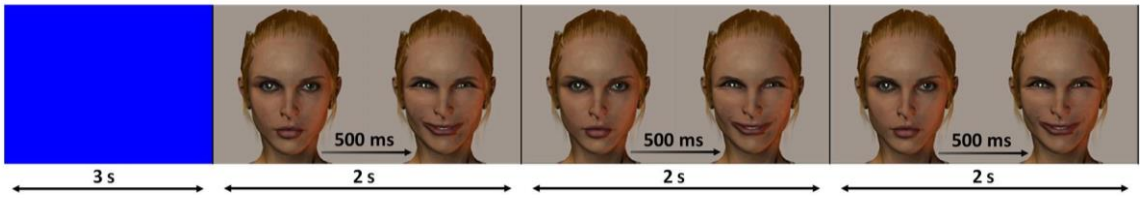


Figure 1. Scheme of a 9-s trial of a facial stimulus presented to the infants. Following a blue noiseless screen for 3 s, the same 2-s sequence was repeated three times (e.g., neutral face, joy face, anger face, disgust face, fear face, sad face). For each dynamic facial expression of emotion, the apex occurs at 500 ms and was followed by a 1500 ms static facial expression.

Behavior Recording

The infants' behavior was recorded by two means. First, their eye movements were followed for each eye with a sampling rate set at 250 Hz by using the SMI eye-movement tracking system during the presentation of the trials displaying the facial expressions of the avatar. Eye-movement data were extracted off line on both eyes using the BeGaze Software (version 3.4, SensoMotoricInstruments GmbH, Teltow, Germany). Second, the infants' facial responses to the avatars' facial expressions were recorded using the video camera. These video recordings were analyzed offline, using Baby FACS, in order to score infants' facial responses contingent to the presentation of the avatars' emotional expressions.

Data Analysis

Baby FACS. Two trained and certified FACS coders analyzed the infants' facial behavior using the Baby FACS (Oster, 2007), a comprehensive, anatomically based system for coding facial expressions in infants and young children. Each AU is designated by a

numeric code and scored on the basis of precise criteria of transitory and subtle changes in the shape and location of facial features. The first coder (RS) who scored all the videoclips was blind to the order of presentation of facial stimuli. The second coder (NR) who was unaware of the hypotheses/aims of the study and of the nature of stimuli viewed independently a sample of 42 videotaped segments representing the facial responses of 42 infants (14 3-month-olds, 14 7-month-olds, 14 12-month-olds; 7 females per group).

For each trial, a 3-s baseline period (a blue screen) and a 6-s stimulus period were produced. Infant's facial behavior was coded during the stimulus period immediately after the end of the blue signal following infant's gaze directed toward the screen. The infants' facial responses were analyzed frame by frame during the 6-s sequence of each trial.

To code facial mimicry in response to a facial expression, we considered whether infants reproduced partial of full-blown facial expressions displayed by the avatars by coding the apex of each visible facial movement. Thus, infant's lip corner pulling (AU 12) associated or not with cheek raising (AU 6) was used as the index of a matching response to the avatar's expression of joy (AUs 6 + 12 + 25); for the avatar's anger expression (AUs 4 + 24), infant's brow lowering (AU 4) or lip pressing (AU 24) were used as indices of matching; for the avatar's expression of sadness (AUs 1 + 4 + 15), infant's brow raising and brow pulled together (AUs 1 + 4) or lip corner depressing (AU 15) were used as indices of matching; for the avatar's expression of fear (AUs 1 + 2 + 4 + 5 + 20), partial (AUs 1, 2, 1 + 2, 1 + 2 + 4) or complete eyebrow raising with upper lid raising (AUs 1 + 2 + 4 + 5) accompanied or not by lip stretching (AU 20) were used as indices of matching; finally, for the avatar's expression of disgust, infants' nose wrinkling (AU 9) was used as an index of matching.

Although investigators may differ in terms of what type of facial action is a component of a negative emotion, we defined an index of negatively-valenced facial expressions on the basis of studies conducted in infants and children (e.g., Camras et al.,

2007; Rosenstein & Oster, 1988; Soussignan & Schaal, 1996; Soussignan et al., 2009). The following negative AUs were coded: 4 (brows lowered), 1 + 4 (inner portions of brows raised and pulled together), 3 + 4 (brows knotted and knitted), 1 + 2 + 4 (entire brows raised), 9 (nose wrinkled), 10 (upper lip raised), 11 (nasolabial furrow deepened), 14 (lip corners tightened), 15 (lip corners pulled down); 17 (chin raised), 20 (lip stretched), and 23/24 (modulated mouth movements such as lip pressed/tightened).

We calculated the percentage of infants displaying facial matching for the previously defined AUs and the percentage of infants displaying positive and negative facial expressions. Interobserver agreement was defined as the number of AUs on which both coders agreed multiplied by 2 and then divided by the total number of AUs scored by both coders (Ekman & Friesen, 1978). The percentage of agreement for the total number of AUs was 86 %. The inter-rater agreements for the positive (AUs 6+12, AU 12) and the negative facial expressions were 82% and 89 %, respectively.

Visual attention and gaze aversion. From the videoclips, we also analyzed the infants' percentage of looking time towards the screen and the frequency of gaze aversion displayed by infants. Gaze aversion was defined as infants' gazes away from the screen after a visual contact with the facial stimulus. The frequency of gaze aversion was defined as the number of occurrences of gaze away from the screen within a trial (range: 0-4).

Interobserver reliability was assessed between the main coder and a second coder who was also blind to the order of stimuli presentation and who independently scored 10% of videoclips. Interobserver reliabilities using Pearson r correlation were 0.75 for the frequency of gaze aversion and 0.94 for the percentage of looking time.

Eye-movement tracking analysis. From the 104 infants whose facial behavior, visual attention and gaze aversion were analyzed, 23 were not considered for eye-movement tracking analyses because the tracking system was unable to detect their gaze (n=7), because

unsufficient precision of gaze calibration (i.e., superior to 2.5° on one of both axis) (n = 14) or because of unsufficient duration of infants' gaze detection (i.e., less than a third of the experiment duration) (n = 2). Thus, the remaining groups of 3-, 7-, and 12-month old infants comprised 17, 34, and 30 participants, respectively.

To analyse infants'eye movements, seven Areas of Interest (AOIs) were defined, including Left Eye, Right Eye, Between Eyebrows, Nose Top, Nose Bottom, Mouth and External Traits. Figure 2 illustrates these different AOIs on the avatars' faces. Those AOIs were based on the areas attracting the most infants' attention (based on preliminary analyses) and areas containing AUs that are relevant in the processing of facial expressions.



Figure 2. The different areas of interest (AOIs) used during the experiment: Left Eye area in red, Right Eye area in dark blue, Mouth area in pink, Nose Top area in yellow, Nose Bottom area in light blue, Between Eyebrows area in green and External Traits area in orange

Statistical Analyses

Facial behavior, visual attention and gaze aversion. Cochran's Q tests were conducted within each age group to examine whether infants displayed specific AUs matched to the emotional expressions, and differentially responded as a function of gaze direction.

According to the significance of Cochran test, McNemar tests were used to compare each pair of facial stimuli. Further, Chi-square tests were performed to examine the effects of age and gender on the proportion of infants displaying specific AUs matched to each avatar's emotional expression. Cochran and Chi-square tests were also carried out on the percentage of infants displaying positive and negative facial expressions.

An age (3, 7, 12) x emotion (neutral, joy, anger, disgust, fear, sadness) x gaze (direct, averted) repeated-measures analysis of variance (ANOVA) was conducted on the infants' percentage of looking time and on the frequency of infants' gaze aversion. Gender as a between subject factor was not included in the ANOVA because preliminary analyses did not reveal significant effects. Tukey's HSD tests were conducted as post-hoc tests when significant F-tests were detected.

Eye-movement tracking data. Based on the oculometric data, the mean time (in ms) that infants spent to explore the avatar's face was analyzed using repeated-measures ANOVAs with infants' age (3, 7 and 12 months) as a between-subjects factor, and the AOI (right eye, left eye, mouth, nose top, nose bottom, between eyebrows and external features), the avatar's emotion (neutral, joy, anger, disgust, fear, or sadness) and the avatar's gaze (direct or averted) as within-subjects factors. Gender as a between subject factor was not included because preliminary analyses did not reveal significant effects. Post-hoc tests were run using Tukey HSD tests, with the exception of the interactions between the Age and AOI factors which were explored using univariate tests of significance for planned comparison.

Results

Facial Behavior

Joy face (AUs 6 + 12 + 25). A higher percentage of 3 month-old infants displayed AU 12 (44.67%) to the avatars' joy face with direct gaze than to the avatars' neutral and negative

emotional expressions, $Q(11) = 33.89$, $p < .001$; Mc Nemar test, all $p < .05$. More infants also displayed AU 12 to the avatars' joy face with averted gaze (25%) than to the avatars' anger face with direct gaze (5.5%). The percentage of 7-month-olds exhibiting AU 12 was also affected by the nature of avatars' facial expressions, Q (11) = 19.5, p = .05. However, the McNemar tests provided only marginal significance of a higher percentage of infants displaying AU 12 to the avatars' joy face with direct (14.3%) or averted (14.3%) gaze than to the avatars' fear (0%) and sad (0%) faces with averted gaze (p = 0.06). A higher percentage of 12-month-old infants displayed AU 12 to the avatars' joy face (direct gaze: 27.3%; averted gaze: 33.33%) compared to other emotional expressions, Q (11) = 34.46, $p < .0001$. Specifically, more infants showed AU 12 when exposed to the avatars' joy face with direct or averted gaze than to their neutral face (direct gaze 6.06%; averted gaze: 9.09%, $p < .05$), their anger face with direct gaze ($p < .05$), their disgust face with averted gaze ($p < .05$), and their fear face with averted gaze ($p < .005$). Avatars' joy face with averted gaze was also positively discriminated from sad faces (direct gaze 6.06%; averted gaze: 9.09%, $p < .05$).

Finally, an effect of age on the percentage of infants displaying AU 12 while exposed to the avatars' joy face with direct gaze was detected, χ^2 (2, N = 104) = 6.62, p =.03, indicating that the 3-month-olds displayed more AU 12 than the 7 month-olds, χ^2 (2, N = 104) = 6.57, p =.03. These findings are presented in Figure 3. No gender effect was found

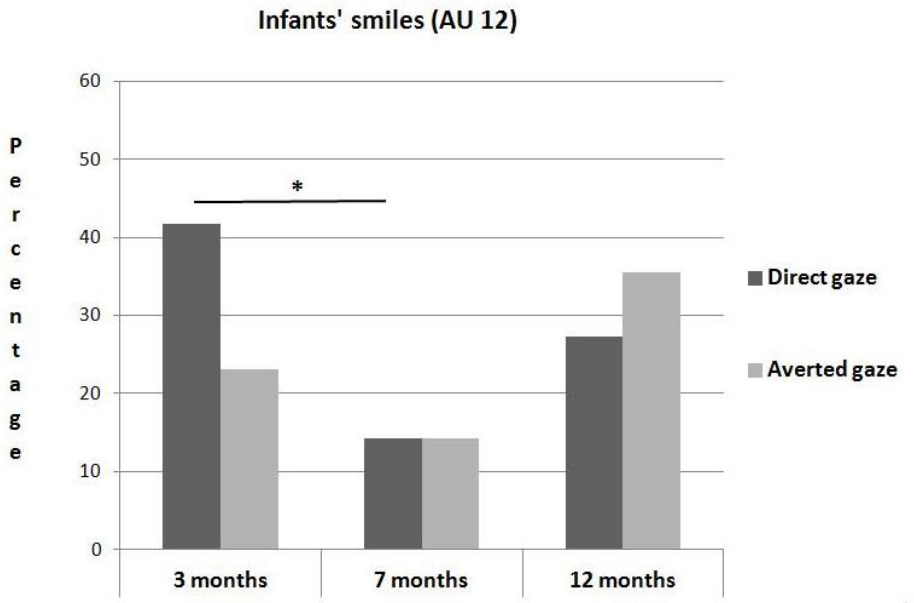


Figure 3. Percentage of infants who smiled to the presentation of the avatars' joy face as a function of infants' age and the avatars' gaze direction. AU 12: lip corner raising, * $p < .05$.

Anger face (AUs 4 + 24). In 3- and -12-month-olds, the percentages of infants displaying AUs 4/24 were not affected by the nature of emotional expressions, Cochran tests, all $p > .05$. Although a significant effect was detected in the 7-month-olds, Q (11) = 25.08, p =.009, no motor matching effect was found. Indeed, more infants showed AUs 4/24 in response to the avatars' sad face with averted gaze (22.85%) than to the neutral (direct gaze: 5.55%, p = .03; averted gaze: 0%, p = 0.008) and joy faces (direct gaze: 2.86%, p = .04; averted gaze: 0%, p = 0.008). A higher percentage of infants also displayed AUs 4/24 to the avatars' sad face with averted gaze than to the avatars' disgust (2.86%, p = .04) and sad faces with direct gaze (2.86%, p = .04). No effects of age and gender were found in infants in response to the avatars' anger faces ($p > .05$, Chi-square test).

Disgust face (AU 9). The percentages of infants displaying AU 9 did not change significantly as a function of the avatars' emotional expressions and gaze direction within each age group (all $p > .05$). Effects of age and gender also failed to reach significance in response to avatars' disgust faces ($p > .05$, Chi-square test).

Fear face (AUs 1 + 2 + 4 + 5 + 20). In 3- and 12-month-olds, the percentages of infants displaying AU components of the avatars' fear expression were not altered by the nature of facial expressions (all $p > .05$). A significant effect was detected in the 7-month-olds, Q (11) = 23. 91, p =.01. However, there was no motor matching effect, as the infants displayed more components of fear expressions to anger (22.85%) and sad (22.85%) faces with averted gaze than to joy (0%) and disgust (2.86%) faces with direct gaze (all $p < .05$). No effects of age or gender were found in infants' response to the avatars' fear face ($p > .05$, Chi-square test).

Sad faces (AUs 1 + 4 + 15). In 3-, 7-, and 12-month-olds, the percentages of infants displaying AUs of sad face (1 + 4, 15) to the avatars' sad face did not significantly differ from the other facial expressions (all $p > .05$, Cochran Test), and the effects of age and gender were no significant (chi-square test).

Negative facial displays. The percentages of 3 month-old infants displaying negative AUs did not significantly change as a function of the avatars' facial expressions, Q (11) = 13.15, p = 0.28. As can be seen from Figure 4, this finding reflects the lack of clear valence differentiation between the avatars' negative emotional expressions and (a) the avatars' neutral faces, or (b) the avatars' joy face with averted gaze. In contrast, significant effects were found in both 7-month-olds, Q (11) = 32.40, p = 0.001, and 12-month-olds, Q (11) = 23.61, p = 0.01, in the percentage of infants displaying negative AUs as a function of the nature of avatars' facial expressions. In 7-month-olds, a higher proportion of infants showed negative AUs to the avatars' sad face with averted gaze than to the joy, anger, and disgust faces regardless of gaze direction (all $p < .05$). They also exhibited more negative facial displays to the avatars' sad face with averted gaze than to the neutral, fear, and sad faces with direct gaze (all $p < .05$). Further, 7 month-old infants displayed more negative AUs to the avatars' fear face with averted gaze than to the avatars' joy faces ($p < .01$), and more negative

AUs to the avatars' anger faces than to the avatars' joy face with averted gaze ($p < .05$). It can be noted that the 12-month-olds revealed a somewhat more differentiated pattern of facial responsiveness than the 7-month-olds (see Figure 4). They displayed more negative AUs to the avatars' anger face with direct gaze than (a) to the avatars' neutral faces (all $p < .05$), and (b) to the avatars' joy face with direct gaze (p=.02). Further, avatars' disgust and fear faces with direct gaze and avatars' sad face with averted gaze induced more negative facial expressions in 12-month-olds than avatars' neutral and joy faces with direct gaze (all $p < .05$).

The Chi-square tests revealed infants' age effect in response to the avatars' neutral face with direct gaze, χ^2 (2, N=104) = 6.58, p =.037. A higher percentage of 3 month-old infants (33.33%) displayed negative facial expressions than 12 month-old infants (9%), χ^2 (1, N=69) = 5.95, p =.01, when exposed to neutral faces with direct gaze. Three-month-old infants also displayed more negative AUs to the joy face with averted gaze (27.8%) than the 7 month-olds (5.7%), χ^2 (1, N=71) = 6.15, p =.013.

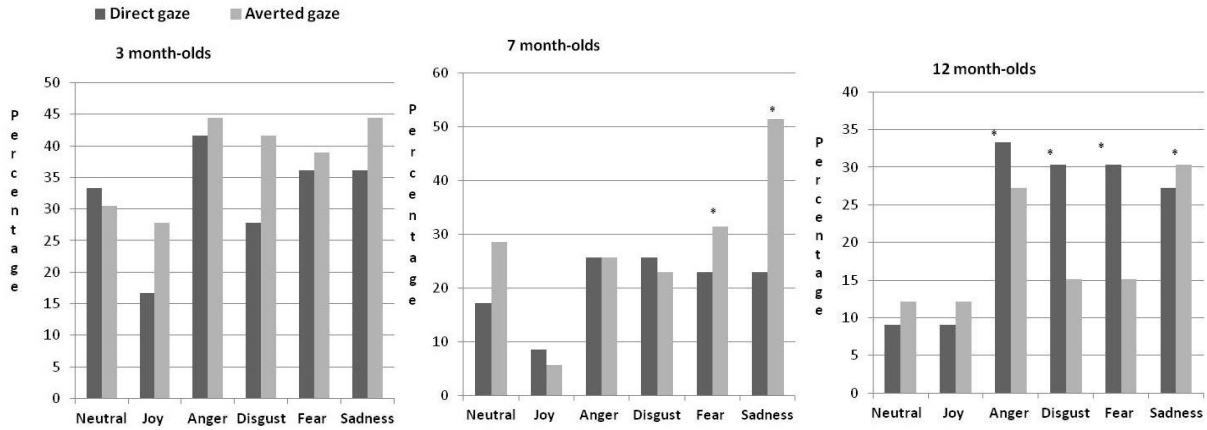


Figure 4. Percentages of infants displaying negative facial expressions as a function of infants' age and the avatars' emotional expressions and gaze direction. * $p < .05$.

To sum up, the findings revealed developmental changes in facial responsiveness to the perception of basic emotional expressions of avatars suggesting a progressive valence differentiation between the avatars' non negative faces (neutral and joy faces) and the avatars'

negative faces (anger, disgust, fear and sadness) from 3 to 12 months of age, with the oldest infants being more sensitive to the anger, disgust and fear faces with direct gaze.

Visual Attention

The age x emotion x gaze ANOVA conducted on the percentage of looking time revealed a main effect of emotion, $F(5, 505)=9.83$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.089$, and a marginal age x gaze interaction, $F(2, 101)=2.93$, $p = .058$, $\eta_p^2 = 0.05$. Infants looked longer at the avatars' joy faces (M = 92.47%, SD = 11.1) than at the avatars' neutral (M = 83.50%, SD = 14.61), anger (M = 84.75%, SD =16.47), disgust (M = 87.60%, SD = 13.52) and sad faces (M = 87.71%, SD = 13.33) (all $p < .05$, Tukey test). Further, infants displayed longer durations of visual attention to the avatars' fear face (M = 90.21%, SD = 13.65) than to the avatars' neutral and anger faces (all $p < .01$, Tukey test).

Emotion x gaze ANOVAs were carried out within each infants' age group. No significant main effect of emotion was found in 3-month-olds, $F(5, 175) = 1.43$, $p =.215$, $\eta_p^2 = 0.039$. However, a gaze effect was detected in 3-month-olds, $F(1, 35) = 7.51$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.177$, revealing that they look for longer duration at the avatar with direct gaze (M = 91.12%, SD = 20.97) than at the avatar with averted gaze (M = 87.88%, SD = 26.11). In contrast, a main effect of emotion was evidenced in both 7-month-olds, $F(5, 170) = 4.32$, $p =.001$, $\eta_p^2 = 0.113$, and 12-month-olds, $F(5, 160) = 5.49$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 =146$. As shown in Figure 5, these latter findings reflect the fact that 7- and 12-month-old infants looked longer at the avatars' joy and fear faces than at the avatars' neutral and anger faces (all $p < .05$, Tukey test).

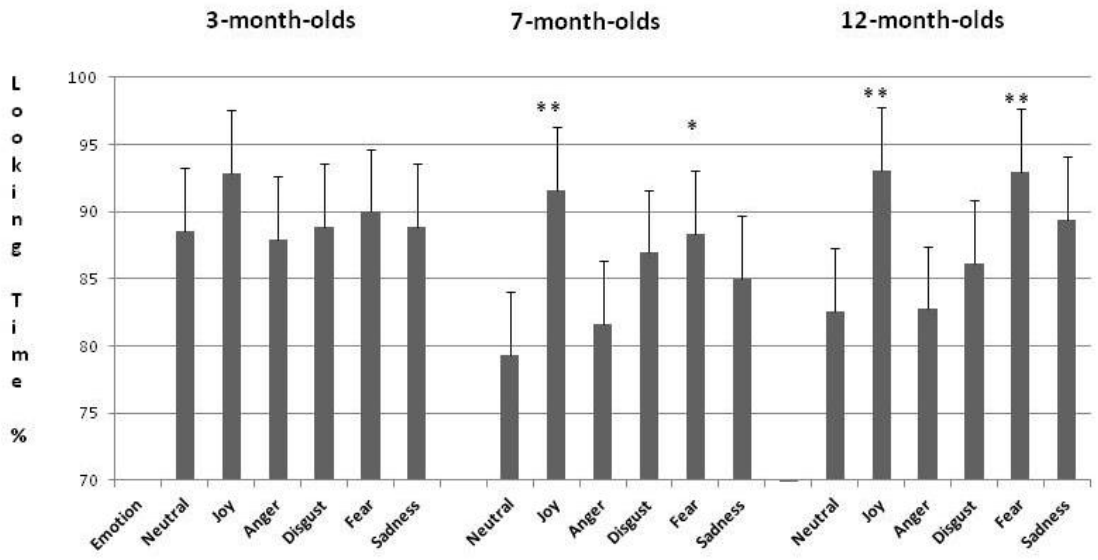


Figure 5. Percentage of looking time in infants exposed to the avatars' emotional expressions. * $p < .05$, ** $p < .01$.

Gaze Aversion

The age x emotion x gaze ANOVA conducted on the frequency of infants' gaze aversion revealed a main effect of emotion, $F(5,505) = 9.17$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.083$. Infants displayed a higher frequency of gaze aversion for the avatars' neutral ($M = 0.164$, $SD = 0.106$), anger ($M = 0.142$, $SD = 0.121$), disgust ($M = 0.13$, $SD = 0.129$) and sad ($M = 0.135$, $SD = 0.123$) faces than for the avatars' joy face ($M = 0.088$, $SD = 0.098$) (all $p < .01$, Tukey test). A higher frequency of gaze aversion was also found for neutral than fear faces ($p < .001$, Tukey test). Further, a higher frequency of gaze aversion was found for anger than fear faces ($p = .05$).

Emotion x gaze ANOVAs were carried out on the frequency of gaze aversion for each age group. There was no significant main effect of emotion in 3-month-olds, $F(5, 175) = 1.27$, $p = .275$, $\eta_p^2 = 0.035$. In contrast, a main effect of emotion was found in both 7-month-olds, $F(5, 170) = 7.37$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.178$, and 12-month-olds, $F(5, 160) = 3.73$, $p < 0.01$, η_p^2 =146. As can be seen in figure 6, 7- and 12-month-olds displayed a higher frequency of gaze

aversion for the avatars' neutral than for the avatars' joy and fear faces (all $p < .01$, Tukey test). Further, 7-month-olds exhibited a higher frequency of gaze aversion for the avatars' sad than joy faces ($p < .01$, Tukey test).

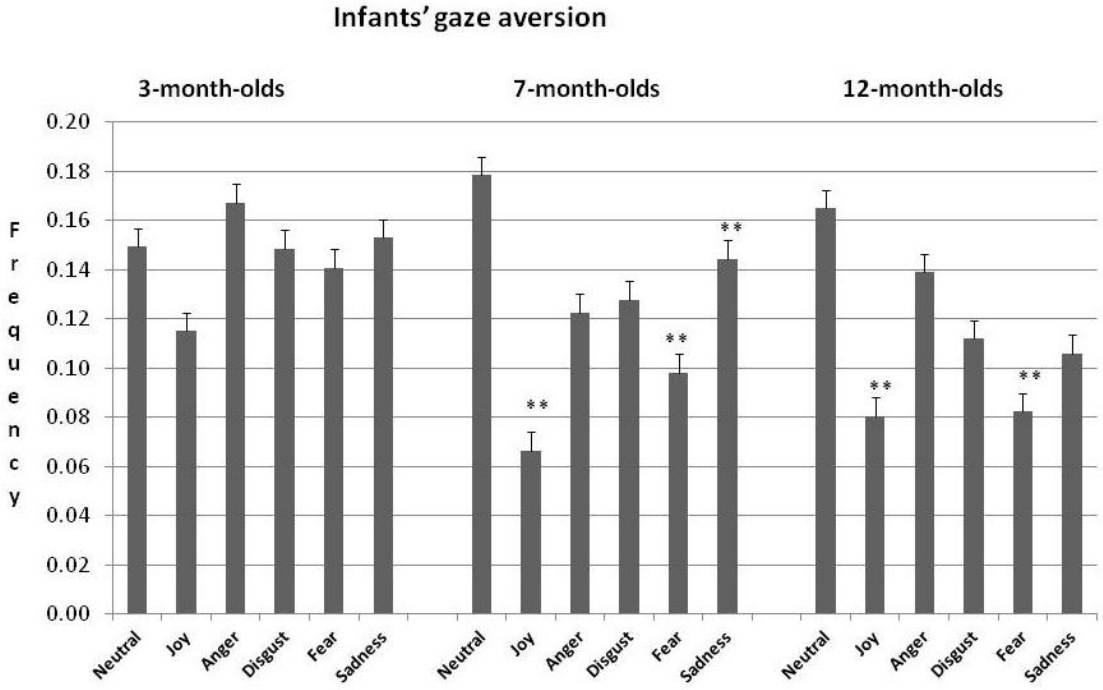


Figure 6. Frequency of gaze aversion in infants in response to the avatars' facial expressions of emotion. ** $p < .01$.

Eye Movements

The age x AOI x emotion x gaze ANOVA conducted on the infants' looking time to the facial stimuli revealed significant main effects of the AOI, $F(6, 468) = 10.02$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.114$, and emotion factors, $F(5, 390) = 5.34$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.06$. Further, significant interactions were found between AOI and age, $F(12, 468) = 2.97$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.07$, AOI and emotion ($F(30, 2340) = 5.16$, $p < .00001$, $\eta_p^2 = 0.06$, and age, emotion and AOI, $F(60, 2340) = 1.57$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.038$. Infants spent more time looking at the avatars' joy ($p < .001$) and fear ($p = .002$) faces than at the avatars' anger face. The joy, fear, disgust and sadness faces were more often looked at than the neutral face (all $p < .05$). The 3-way interaction reflects the fact that the effect of emotion was found only for the 7- and 12-

month-olds as a function of the avatars' face components. In contrast to the 3-month-olds, the 7 month-olds discriminated between facial features of distinct emotional expressions. As Figure 7 illustrates, the 7-month-olds spent more time looking at the area of the eyes of the fear and sad faces than at the area of the eyes of the neutral and joy faces (p <.05). The area of the eyes was also longer looked at in the anger face than in joy, disgust and neutral faces (p <.05). Finally, the area of the eyes was longer looked at in the anger than in the disgust faces (p < .05). For the nose area, infants looked longer at it in the disgust face than in the neutral and sad faces (p <.001). For the mouth area, infants looked longer at it in the joy face than in any other facial stimuli (p < .001). The 12-month-olds also discriminated between distinct facial components among the avatars' emotional expressions. As can be seen in Figure 7, infants looked longer at the area of the eyes in the avatars'fear face and at the mouth area in the avatars'joy face compared to the other facial stimuli (all p < .001). Infants also looked more at the mouth area in the sad face than in the other facial stimuli (p <.05). Finally, the nose area was longer looked at in the disgust face than in the anger face (p <.05).

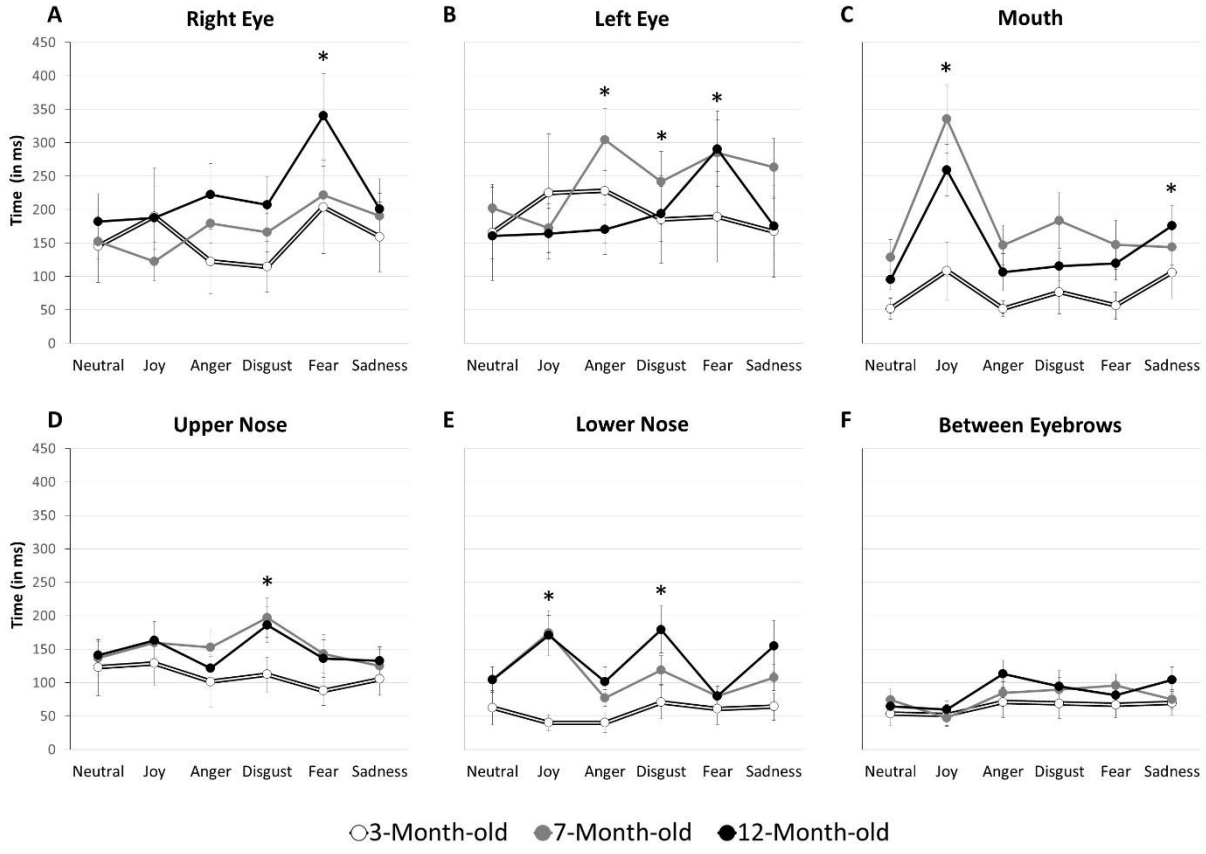


*Figure 7***.** Mean time (ms) infants spent exploring the different internal areas of the face (A= Right Eye, B= Left Eye, C= Mouth, D= Nose Top, E= Nose Bottom, F= Between Eyebrows) according to their age and to the avatar's facial expression (error bars correspond to standard errors). *p < .05.

Discussion

The aim of this study was to investigate facial expressivity and visual exploration in 3-, 7-, and 12-month-old infants exposed to emotional expressions of human avatars in order to test whether infants mimic facial expressions as a function of both their age and the avatar's gaze direction. Furthermore, we aimed to examine potential developmental mechanisms underlying emotional mimicry. To address these issues, we analyzed facial discrimination abilities and responsiveness in infants using two fine-grained measurement systems (Baby FACS and eye-movement tracking). To our knowledge, this is the first research to use such methods to investigate the development of both emotional perception and emotional production in 3-12 month old infants. Although we did not find evidence of motor matching between the avatars' facial expressions and infants' facial actions, we did find changes in

visual exploration and facial responses from early to late infancy in relation to the avatars' positive or negative expressive faces. This suggests that as children mature a progressive differentiation of emotionally-valenced discrimination and responsiveness is evident.

Contrarily to the matched motor hypothesis, facial displays of the infants did not provide evidence that 3, 7 and 12 month-old infants selectively match AUs corresponding to the typical facial markers of distinct basic emotions. Only the avatars' joy face resulted in a significant increase in infants' smiling faces, as measured by AU 12, whereas the avatars' negative expressions (anger, disgust, fear and sadness) produced unspecific responses without evidence of matching effect as a function of both gaze direction of the avatar and age of the infant. Thus, our results do not support the classic view of facial mimicry that suggests that specific facial movements of emotions are automatically mimicked when someone perceives the facial expressions of another person. These findings are consistent with naturalistic studies during face-to-face interactions in 4 and 5 month-old infants showing that their responses did not mirror the facial and vocal expressions of adults (D'Entremont & Muir, 1999; Montague & Walker-Andrews, 2001). This lack of specificity in interpersonal matching of facial actions might reflect either a lack of differentiation of facial components into discrete emotional expressions during the first year of life (Camras & Shutter, 2010), or a lack of a specific neural mechanism of automatic facial matching in humans allowing a spontaneous reproduction of emotional actions based merely on the perception of the objective features of a facial display (Hess & Fisher, 2013). Indeed, although the issue remains to be clarified, it has been argued that the existing EMG literature in adults does not provide robust evidence that specific facial movements are mimicked (Hess & Fisher, 2013). As an alternative to the matched motor hypothesis, Hess & Fisher (2013) proposed that emotional mimicry is not an exact copy of objective facial features, but a valence-based congruency resulting from the interpretation of intentions of others signaled by facial displays.

Furthermore, we hypothesized developmental changes from 3 to 12 months of age. Our findings highlight ontogenetic changes in the way infants "read" the avatars' expressions and respond to them. Specifically, the eye-movement tracking analysis revealed that 3-month-olds did not differentially look at the distinct features of the avatar's face (eye, nose, mouth) according to the emotion expression they had to process. This suggests that the youngest infants did not attend to and discriminate the various facial AUs involved in distinct emotional expressions. This pattern of undifferentiated attentional processing in the 3-month-olds was accompanied by a lack of infants'matching for negative AUs. Indeed, although a number of 3 month-old infants responded negatively to the avatars' negative facial expressions, they also showed negative faces to the avatars' neutral and joy faces with averted gaze. Hence our results suggest that 3 month-old infants do not clearly differentiate between emotional valence of facial expressions. This is, at least in part, corroborated by habituation studies in 3-month-olds who when exposed to static facial expressions showed either some discrimination between joy and anger faces (Barrera & Maurer, 1985) or no evidence of discrimination between joy and sad faces (Browne, Rosenfeld, & Horowitz, 1977). It is not clear, however, whether these previous findings reflect the effect of specific emotional cues to which infants were exposed, or the lack of a differential visual exploration and responsivity in 3-month-olds for various negative facial expressions. The present data in a well controlled design suggest that the ability of fine-tuned processing of emotional expressions in 3-month-olds appears not yet to be firmly established and emerges later in development. Further, differences in procedures (visual exploration vs. habituation) and stimuli (static vs dynamic; range of facial expressions) most probably contributed to explain different results in studies.

In contrast, the 7- and 12-month-old infants showed a differential pattern of visual exploration of the avatars' face components representing distinct emotional expressions. Both 7- and 12-month-olds spent more time looking at the eye, nose, and mouth areas that recruited

muscle actions involved in fear (AUs 1+2+4+5), disgust (AU 9), and joy faces (AU 12), respectively. This developmental change does not simply reflect the 7 and 12 month-old infants' interest for motion as it is known that younger infants are sensitive to low level perceptual cues such as facial movement (Vinter, 1986). Furthermore, 12-month-olds, but not 7-month-olds, were more visually attracted to the avatars' mouth area which recruited lip depressing (AU15) in the sad face, while the 7-month-olds explored more the eye area (AUs 1+4) when the avatar displayed sadness. This latter finding might reflect an increase in self-regulated control of attention in the oldest infants and refinement in the discrimination of actions in the mouth area between sad and joy faces (lip depressing *vs*. lip corner pulling), even if studies based on preferential looking have shown that 7-month-olds can discriminate among joy and sad faces (e.g., Soken & Pick, 1999). This developmental change in attentional and discriminative processing might be attributable to the maturation of frontal and various associative cortex structures which undergo major structural and functional changes at the end of the first year of life (Chugani & Phelps, 1986; Matsuzawa et al., 2001; Richards, 2001), but also to the fact that infants are increasingly exposed to a greater variety of negative facial expressions from parents as they start to move independently (Campos et al., 1992; Vaish et al., 2008).

Interestingly, the Baby FACS analysis also revealed that 12-month-old infants displayed a more complex pattern of facial responses than the 7-month-olds, as their negative facial displays discriminated between a number of the emotional avatars' faces, specifically anger, disgust, fear, sad faces were differentiated from neutral and joy faces. Taken both the data from the eye-movement tracking and Baby FACS analyses, we show changes from 3 to 7 months and from 7 to 12 months, possibly reflecting both an improvement in the ability to identify negative expressions and a greater sensitivity and responsiveness to the emotional value of others' expressive faces.

Do these developmental changes in infants' facial responsiveness reflect the emergence and differentiation of emotional mimicry based on the appraisal of valence congruency, or rather a global distress response due to the avoidance of avatars' negative expressions signaling potentially aversive situations? A valence-based mimicry hypothesis would imply that the observer and the expresser share some social signals, such as mutual eye contact favoring social attention, and congruent valenced-based facial actions and an emotional experience fostering an initial openness to engage in affiliative interactions (Hess & Fisher, 2013). Although our paradigm was not designed to test the effect of interpersonal matching on affiliative interactions, the fact that 7- and 12-month-old infants spent a high percentage of time (> 80%) looking at the negative expressions, displayed longer durations of attention to the avatars' fear than to the avatars' neutral and anger faces, and exhibited a higher frequency of gaze aversion for neutral than for fear faces, seems not to support the distress reactivity hypothesis. Interestingly, despite some contradictory findings (Hunnius, de Wit, Vrins, & von Hofsten, 2011), behavioral and event-related potential (ERP) studies have shown that 7 month-old infants prefer to look longer at fearful than at happy faces (Kotsoni et al., 2001; Nelson & Dolgin, 1985), show attention-related ERPs to fearful faces (Leppänen et al., 2007; Nelson & Haan, 1996), and have difficulty in disengaging from fearful faces, which was not simply attributable to the novelty of these faces (Peltola, Leppänen, Palokangas, Hietanen, 2008). In our study the dissociation found between infants' negative facial displays (fear, sad and anger faces > neutral and joy faces) and infants' visual attention and gaze aversion (neutral and anger faces > joy and fear faces) suggest that infants might match negative AUs with a progressive developmental differentiation of emotional mimicry.

Finally, concerning the effect of gaze direction, our results do not provide any evidence that infants use the avatar's gaze direction to infer a specific intention to avatars displaying approach-oriented (anger and happiness) and avoidance-oriented (fear, disgust, and

sadness) emotional expressions with gaze either directed at or averted from the infant. For instance, adult EMG studies have shown that an avatar's anger face with direct gaze induces in the observer either a congruent anger reaction, such as frowning as a hostile signal or an incongruent fear reaction such as brow raising as a threat signal (Moody et al., 2007; Schrammel et al., 2009; Soussignan et al., 2013). Regardless of infants' age and avatars' gaze direction, our results do not provide any evidence that avatar's anger faces produced specific anger (AU 4) or fear (AUs 1, 2, 1+2+4) facial movements in infants. Similarly, we found no evidence that avatar's fear faces with averted gaze produced congruent fear faces in infants, as it has been demonstrated in adults (Soussignan et al., 2013). It appears rather that our findings may reflect a process of differentiation of valence-based emotional mimicry linked to stages of development in relation with the nature of emotion. Three month-old infants, but not the older age groups, increased their smiling to the avatars' joy face with direct gaze more than to the avatars' neutral and negative emotional faces.This suggests that the 3-month-olds might be more sensitive to eye contact than the other age groups during positive exchanges because at this age this communicative cue might be a social signal fostering emergent shared experience in the sense of primary intersubjectivity and emotional reciprocity (Hains & Muir, 1996; Bertin & Striano, 2006; Soussignan et al., 2006). At 7 months, however, infants displayed more negative AUs to the avatars' sad and fear faces with averted gaze than to other facial expressions. One cannot rule out two alternative interpretations to these findings. On the one hand, infants could have appraised the specific social meaning of avatars' fear (danger in the shared environment) and sad faces (help or social support) and matched the valence of avatars' facial expressions. On the other hand, infants could have reacted more negatively to the avatars because the avoidance of mutual eye contact signals an intention to interrupt a social exchange after episodes of eye contact. Previous behavioral and electrophysiological studies have not shown a robust gaze-cueing effect for fear faces in 7-to-12 month old infants,

unless these facial expressions were perceived in a concrete referential context (Hoehl, Palumbo, Heinisch, & Striano, 2008; Hoehl & Striano, 2010b; Matsunaka & Hiraki, 2014). Thus, further studies are needed to distinguish between both of these hypotheses. Finally, at 12 months, infants displayed more congruent negative AUs to the avatars' anger, fear and disgust faces with direct gaze (but not with the averted gaze) than to the avatars' neutral or joy faces. These latter findings suggest that the oldest infants might process the emotional value of negative facial expressions differently compared with 7-month-olds, in that they responded more to mutual eye contact to match the negative value of emotional expressions of a communicative partner. Previous electrophysiological studies in 4-to-7 month-olds have shown that infants allocate more attentional resources to angry faces with direct eye gaze, as indexed by a larger frontocentral negative component (Nc), compared to averted eye gaze (Striano, Kopp, Grossmann, & Reid, 2006; Hoehl & Striano, 2008), and that 7-month-olds spend more time looking to the eyes' region of human faces showing fearful or angry expressions (Vanderwert et al., 2014). It remains, however, to clarify whether these findings reflect i) a discrimination based on perceptual comparisons, ii) some understanding of the social meaning or valence of the expression, or iii) the fact that eye contact is attractive because it signals an intention to communicate. It is important to note that it is difficult to directly compare our results with findings from prior studies because they differ for some measures (emotional response *vs*. ERP), the range of senders' facial expressions (5 *vs*. 3) and number of age groups (3 *vs*. 1) compared.

To account for the differentiation of both discrimination and responsiveness to others' emotional expressions during the first year of life, experience-expectant and experience-dependent mechanisms might be invoked (Greenough, Black, &Wallace, 1987, Leppänen & Nelson, 2009). Experience-expectant development would occur during sensitive periods and is shaped by exposure to species-typical aspects of environmental stimuli, whereas

experience-dependent development is mainly influenced by individual-specific experiences (Greenough et al., 1987). In the case of facial expressions, this perspective would predict that infants have prewired neural mechanisms which are initially broadly tuned to process perceptually salient signals displayed in the human face, and which attune and specialize to process and respond to specific facial expressions with experience and the exposure to emotion-specific facial prototypes (Leppänen & Nelson, 2009). In the case of human face identity recognition, evidence supports the hypothesis of a perceptual narrowing phenomenon between 6 and 9 months, leading the face processing neural network to be more finely tuned to a human template (Pascalis, de Haan, & Nelson, 2002). In the case of facial expressions, at an early stage of development, infants are frequently exposed to parents'smiling faces and display congruent facial reactions, but are less exposed to negative expressions. This might explain why 3-month-olds in our study did not appear to narrowly process negative facial expressions or to accurately match the valence of emotional expressions. From 7 to 12 months, as the present results suggest, they explored and responded more selectively the avatars' facial expressions with a progressive differentiation of the emotional expressions. They also displayed a bias to look at and to match emotionally salient faces that signal harmful or threatening stimuli. This bias negativity in the decoding and encoding of negative emotions is considered to be adaptive following the onset of self-produced locomotion and refinement of social cognition at the second half of the first year. By this age, infants often explore distant, ambiguous and novel objects and events that lead to more differentiated and intensified emotional experiences and behaviors such as anger, fear, and sadness when their needs or social goals are not satisfied or are counteracted (Campos et al., 1992; Vaish et al., 2008). Interestingly, the pattern of responsiveness in the 12-month-olds differed somewhat from that of the 7-month-olds, as the oldest infants responded in a more differentiated way i) by being more sensitive to the avatars' eye contact during negative emotional expressions and

ii) by matching more accurately the valence of their own facial displays with the positive/negative expressions of avatars. This finding likely reflects a critical social cognitive milestone in the decoding and appraisal of the meaning of others' facial expressions. At the end of the first year, infants' social referencing improves considerably, as reflected in their ability to connect the direction of gaze and the emotional expression to intentional action in adults (Meltzoff, & Brooks, 2007; Phillips, Wellman, & Spelke, 2002; Sorce et al., 1985; Walden & Baxter, 1989).

One limitation of the present study is that we observed interindividual variability in infants' facial responsiveness to the avatars' emotional expressions, with a sizeable number of apparently non-responsive infants. The visual detection of infants responses using the Baby FACS has however its limitations, in that the apparent absence of AUs does not exclude subtle, non-visible muscular changes that would be detectable only with EMG. Facial EMG is indeed the standard technique to measure facial mimicry in adults. However, electrophysiological recording of facial muscles cannot be reliably used in infants because of compliance and contamination of the EMG signal by motor artefacts. Nevertheless, in contrast to facial EMG, the Baby FACS is a comprehensive rather a selective coding system as it can unobstrusively record a great number and variety of muscle actions (i.e., 44 UAs). Further, because the Baby FACS detects only muscular movements that are observable on the face, it is better adapted than facial EMG for addressing issues related to the communicative and social signal value of emotional expressions during face-to-face exchanges. It is thus important for future studies to examine whether such individual differences are linked to genetic variations, experiential differences or infant temperament (Grossmann et al., 2010; Soussignan et al., 2009), and how the familiarity of the sender (e.g., mother vs. unfamiliar woman) modulates emotional discrimination and mimicry when infants are exposed to a variety of facial expressions. Another relative limitation of the present study is the use of

avatars instead of real human faces. Although such virtual faces have the advantage to allow stringent experimental control on the facial stimuli (e.g., emotional templates, gaze direction) and were previously shown to induce differentiated facial responses and a sense of presence in adult perceivers (Bailenson, Bloscovich, Beall, & Loomis, 2003; Soussignan et al., 2013), to the best of our knowledge no such studies exist so far for infants. It remains thus to investigate whether that some aspects of infants' responsiveness recorded in the present experimental conditions are dependent on the substrate of the facial stimuli used. This remark also raises an additional explanation to the developmental change in the processing of visual emotions displayed through virtual faces. With increasing age, within the age window considered here, infants do obviously have increasing experience with virtual characters to which they are exposed in televisual or printed cartoons. Their increased age-related differentiation of the avatars' facial displays of emotions and gaze may thus depend on unavoidable experience with human faces but also on direct experience with virtual faces of different kinds and expressive sophistication (static vs. dynamic). Thus, future studies should compare infants' responses toward both real and virtual human faces.

In summary, the current study adds to our knowledge of developmental changes and potential processes that underlie the infants' sensitivity and responsiveness to dynamic emotional expressions, displayed here only visually on faces. In particular, our results reveal a progressive differentiation in discrimination and responses to facial expressions during the first year of life. They suggest that emotional matching might emerge and develop during a developmental period of fine-tuning where the decoding of emotions becomes more sensitive to the meaning and social signal value of other's facial expressions.

Acknowledgements

The authors thank the parents and infants who agreed to take part in the study, and Sylviane Martin for recruiting participating families. This research was supported by a grant

from the French National Research Agency (EMCO 00902: SELFREADEMO project), the Regional Council of Burgundy (PARI grant), the Ministry of Research and Education (PhD grant to ND), and the *Institut Universitaire de France* (to JYB).

References

Anisfeld, M. (1996). Only tongue protrusion modeling is matched by neonates. *Developmental Review, 16,* 149-161. doi:10.1006/drev.1996.0006

Barrera, M. E., & Maurer, D. (1981). The perception of facial Ackerman, B. P., Abe, J. A., & Izard, C. E. (1998). Differential emotion theory and emotional development : Mindful of modularity. In M. F. Mascolo & S. Griffin (Eds), *What develops in emotional development*? New York : Plenum Press.

Bailenson, J. N., Bloscovich, J., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2003). Interpersonal distance in immersive virtual environments. *Personality and Social Psychology Bulletin, 29*, 819-833. doi:10.1177/ 0146167203029007002 doi:10.1177/0146167203029007002

Barrera, M. E., & Maurer, D. (1981). The perception of facial expressions by the three-month-old. *Child Development, 52*, 203-206.

Barrett, K. C., & Campos, J. (1987). Perspectives on emotional development: II. A functionalist approach to emotions. In J.D. Osofsky (Ed.), *Handbook of infant development* (pp. 555-578). New York: Wiley.

Bennett, D., Bendersky, M., & Lewis, M. D. (2005). Does the organization of emotional expression change over time? Facial expressivity from 4 to 12 months. *Infancy, 8*, 167-187.

Bertin, E., & Striano, T. (2006). The still-face response in newborn, 1.5-, and 3-month-old infants. *Infant Behavior and Development, 29*, 294-297.

Bigelow, A. E., & DeCoste, C. (2003). Sensitivity to social contingency from mothers and strangers in 2-, 4-, and 6-month-old infants. *Infancy, 4*, 111-140.

Bornstein, M. H., & Arterberry, M. E. (2003). Recognition, discrimination and categorization of smiling by 5-month-old infants. *Developmental Science, 6*, 585-599.

Browne, G. Y., Rosenfeld, H. M, & Horowitz, F. D. (1977). Infant discrimination of facial expressions. *Child Development, 48*, 555-582.

Bushnell, I. W. R. (1979). Modification of the externality effect in young infants. *Journal of Experimental Child Psycholology, 28*, 211-229.

Camras, L. A., & Fatani, S. S. (2008). The Development of facial expressions: Current perspectives on infant emotions. In M. Lewis, J. M. Haviland-Jones, & L. Feldman Barrett (Eds), *Handbook of emotion* (3eds. pp. 291-303). New York: The Guilford Press.

Camras, L. A., Oster, H., Bakeman, R., Meng, Z., Ujiie, T., & Campos, J. (2007). Do infants show distinct negative facial expressions for fear and anger: Emotional expression in 11-month-old European-American, Chinese, and Japanese infants. *Infancy, 11*, 131-155.

Camras, L. A., & Shutter, J. M. (2010). Emotional facial expressions in infancy. *Emotion Review,* 2, 120-129.

Campos, J. J., Kermoian, R., & Zumbahlen, M. R. (1992). Socioemotional transformations in the family system following infant crawling onset. In N. Eisenberg & R. A. Fabes (Eds.), Emotion and its regulation in early development. Series New Directions for Child Development, No. 55. (pp. 25-40). San Francisco: Jossey-Bass

Campos, J., & Sternberg, C. (1981). Perception, appraisal, and emotion: The onset of social referencing. In M. Lamb & L. Sherrod (Eds.), *Infant social cognition: Empirical and theoretical considerations* (pp. 273–314). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Carver, L. J., & Vaccaro, B. G. (2007). 12-month-old infants allocate increased neural resources to stimuli associated with negative adult emotion. *Developmental Psychology, 43*, 54-69.

Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psycholology*, 76, 893-910.

Chartrand, T. L., & van Baaren, R. (2009). Human mimicry. *Advances in Experimental Social Psychology, 41*, 219-274.

Chugani, H., & Phelps, M. (1986). Maturational changes in cerebral function in infants determined by 18FDG positron emission tomography. *Science, 231*, 840-843.

Decety, J., & Svetlova, M. (2012). Putting together phylogenetic and ontogenetic perspectives on empathy. *Developmental Cognitive Neuroscience, 2*, 1-24.

D'Entremont, B., & Muir, D. (1999). Infant responses to adult happy and sad vocal and facial expressions during face-to-face interactions. *Infant Behavior and Development, 22,* 527-539.

de Haan, M., & Nelson, C. A. (1998). Discrimination and categorization of facial expressions of emotion during infancy. In A.M. Slater (Ed.), *Perceptual development: Visual, auditory, and language perception in infancy* (pp. 287–309). London: UCL Press.

Dezecache, G., Jacob, P., & Grèzes, J. (2015). Emotional contagion: its scopes and limits. *Trends in Cognitive Sciences, 19*, 297-299.

Dimberg, U., & Thunberg, M. (1998). Rapid facial reactions to emotional facial expressions. *Scandinavian Journal of Psychology, 39*, 39-46.

Ekman, P., & Friesen, W. (1978). *Facial Action Coding System: A technique for measurement of facial movement*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologist Press.

Ekman, P, Friesen, W. V., & Hager, J. C. (2002). *Facial Action Coding System* (E-book). Salt Lake City, UT: Research Nexus.

Emery, N. J. (2000). The eyes have it: The neuroethology, function and evolution ofsocial gaze. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 24*, 581-604.

Field, T., Woodson, R., Greenberg, R., & Cohen, D. (1982). Discrimination and imitation of facial expressions by neonates. *Science, 218*, 179-181.

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* (3rd ed., pp. 456-468). New York: Guilford.

Fridlund, A. J. (1994). *Human facial expression: An evolutionary view*. San Diego, CA: Academic Press.

Greenough, W.T., Black, J. E., & Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development, 58*, 539-559.

Grèzes, J., Leonor, P., Chadwick, M., Dezecache, G., Soussignan, R., & Conty, L. (2013). Self-relevance appraisal influences facial reactions to emotional body expressions. *Plos One, 8*, e55885.

Grossmann, T., Johnson, M. H., Vaish, A., Hughes, D. A., Quinque, D., Stoneking, M., & Friederici, A. D. (2011). Genetic and neural dissociation of individual responses to emotional expressions in human infants. *Developmental Cognitive Neuroscience, 1*, 57-66.

Grossmann, T., Striano, T., & Friederici, A. D. (2007). Developmental changes in infants' processing of happy and angry facial expressions: a neurobehavioral study. *Brain and Cognition, 64*, 30-41.

Hains, S. M., & Muir, D. W. (1996). Infant sensitivity to adult eye direction. *Child Development, 67*, 1940-1951.

Hatfield, E., Cacioppo, J. T., & Rapson, R. L. (1994). *Emotional contagion*. New York: Cambridge University Press.

Haviland, J. M., & Lelwica, M. (1987). The induced affect response: 10-week-old infants' responses to three emotion expressions. *Developmental Psychology, 23*, 97-104.

Hess, U., Adams, R. B., Jr., & Kleck, R. E. (2007). Looking at you or looking elsewhere: The influence of head orientation on the signal value of emotional facial expressions. *Motivation and Emotion, 31*, 137-144.

Hess, U., & Fischer, A. (2013). Emotional mimicry as social regulation. *Personality and Social Psychology Review, 17*, 142-157.

Hess, U., & Fischer, A. (2014). Emotional mimicry: Why and when we mimic emotions. *Social and Personality Psychology Compass*, 8/2, 45-57.

Hoehl, S., Palumbo, L., Heinisch, C., & Striano, T. (2008). Infants' attention is biased by emotional expressions and eye gaze direction. *Neuroreport, 19*, 579-582.

Hoehl, S., & Striano, T. (2008). Neural processing of eye gaze and threat-related emotional facial expressions in infancy. *Child Development, 79*, 1752–60.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010a). Discrete emotions in infancy : Perception without production. *Emotion Review, 2*, 132-133.

Hoehl, S., & Striano, T. (2010b). The development of emotional face and eye gaze processing. *Developmental Science, 13*, 813-825.

Hoehl, S., Wiese, L., & Striano, T. (2008). Young infants' neural processing of objects is affected by eye gaze direction and emotional expression. *PloS One, 3*, e2389.

Hunnius, S., de Wit, T. C., Vrins, S., & von Hofsten, C. (2011). Facing threat: infants' and adults' visual scanning of faces with neutral, happy, sad, angry, and fearful emotional expressions. *Cognition and Emotion, 25*, 193-205.

Izard, C. E. (1979). *The maximally discriminative facial movement coding system (MAX)*. Newark, DE: Instructional Resources Center, University of Delaware.

Izard, C. E, Fantauzzo, C. A., Castle, J. M., Haynes, O. M, Rayias, M. F., & Putnam, P. H. (1995). The ontogeny and significance of infants' facial expressions in the first 9 months of life. *Developmental Psychology, 31*, 997-1013.

Izard, C. E., & Malatesta, C. Z. (1987). Perspectives on emotional development I: Differential emotion theory of early emotional development. In J. D. Osofsky (Ed.), *Handbook of infant development* (2nd ed., p. 494-554). New York : Wiley Interscience.

Johnson, M. H. (2005). Subcortical face processing. *Nature Reviews Neuroscience, 6*, 766-774.

Kaitz, M., Meschulach-Sarfaty, O., Auerbach, J., & Eidelman, A. A. (1988). reexamination of newborns' ability to imitate facial expressions. *Developmental Psychology, 24*, 3-7.

Kestenbaum, R., & Nelson, C. A. (1990). The recognition and categorization of upright and inverted emotional expressions by 7-month-old infants *Infant Behavior and Development, 13*, 497-511.

Kotsoni, E., de Haan, M., & Johnson, M. H. (2001). Categorical perception of facial expressions 7-month-old infants. *Perception, 30*, 1115-1125.

Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., & Nelson, C. A. (2007). An ERP study of emotional face processing in the adult and infant brain. *Child Development, 78*, 232-245.

Leppänen J. M., & Nelson, C. A. (2009). Tuning the developing brain to social signals of emotions. *Nature Review Neuroscience, 10*, 37-47.

Likowski, K. U., Mühlberger, A., Seibt, B., Pauli, P., & Weyers, P. (2008). Modulation of facial mimicry by attitudes. *Journal of Experimental Social Psychology, 44*, 1065-1072.

Ludemann, P., & Nelson, C. A. (1988). Categorical representation of facial expressions by 7-month-old infants. *Developmental Psychology, 24*, 492-501.

Matsunaka, R. & Kazuo Hiraki, K. (2014). Fearful gaze cueing: Gaze direction and facial expression independently influence overt orienting responses in 12-month-olds. *PLoS One, 9*, e89567.

Matsuzawa, J., Matsui, M., Konishi, T., Noguchi, K., Gur, R. C., Bilker, W., & Miyawaki, T. (2001). Age-related volumetric changes of brain gray and white matter in healthy infants and children. *Cerebral Cortex, 11*, 335-342.

Maurer, D., & Salapatek, P. (1976). Developmental changes in the scanning of faces by young infants. *Child Development, 47,* 523-527.

Meltzoff, A. N., & Brooks, R. (2007). Eyes wide shut: The importance of eyes in infant gaze following and understanding other minds. In R. Flom, K. Lee, & D. Muir (Eds.), *Gaze following: Its development and significance* (pp. 217-241). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Meltzoff, A., & Moore, M. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science, 198,* 75-78.

Meltzoff, A., & Moore, M. (1983). Newborn infants imitate adult facial gestures. *Child Development, 54,* 702-709.

Messinger, D., & Fogel, A. (2007). The interactive development of social smiling. In R. Kail (Ed.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 35, pp. 327-366). Oxford: Elsevier.

Montague, D. P., & Walker-Andrews, A. S. (2001). Peekaboo: A new look at infants' perception of emotion expressions. *Developmental Psychology, 37,* 826-838.

Moody, E. J., McIntosh, D. N., Mann, L. J., & Weisser, K. R. (2007). More than mere mimicry? The influence of emotion on rapid facial reactions to faces. *Emotion, 7,* 447-457.

N'Diaye, K., Sander, D., & Vuilleumier, P. (2009). Self-relevance processing in the human amygdala: Gaze direction, facial expression, and emotion intensity. *Emotion, 9,* 798-806.

Nagy, E., Pal, A., & Orvos, H., (2014). Learning to imitate individual finger movements by the human neonate. *Developmental Science, 17,* 841-857.

Nelson, C. A., & Dolgin, K. (1985). The generalized discrimination of facial expressions by 7-month-old infants. *Child Development, 56,* 58-61.

Nelson, C. A., & de Haan, M. (1996). Neural correlates of infants' visual responsiveness to facial expressions of emotions. *Developmental Psychobiology, 29,* 577-595.

Oster, H. (2007). Baby-FACS: *Facial Action Coding System for infants and young children*. Copyright © Harriet Oster, New York University.

Oster, H., Hegley, D., & Nagel, L. (1992). Adult judgments and fine-grained analysis of infant-facial expressions: testing the validity of a priori coding formulas. *Developmental Psychology, 28,* 1115-31.

Pascalis, O., de Haan, M., & Nelson, C. A. (2002). Is face processing species-specific during the first year of life? *Science, 296,* 1321-1323.

Peltola, M. J., Hietanen, J. K., Forssman, L., & Leppänen, J. M. (2013). The Emergence and stability of the attentional bias to fearful faces in infancy. *Infancy, 18,* 905-926.

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Mäki, S., & Hietanen, J. K. (2009). Emergence of enhanced attention to fearful faces between 5 and 7 months of age. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 4,* 134-142.

Peltola, M. J., Leppänen, J. M., Palokangas, T., Hietanen, J. K. (2008). Fearful faces modulate looking duration and attention disengagement in 7-month-old infants. *Developmental Science, 11,* 60-68.

Phillips, A. T., Wellman, H. M., & Spelke, E. S. (2002). Infants' ability to connect gaze and emotional expression to intentional action. *Cognition,* 85, 53-78.

Preston, S. D., & de Waal, F. B. M. (2002). Empathy: its ultimate and proximate bases. *Behavioral and Brain Sciences, 25*, 1-71.

Reissland, N. (1988). Neonatal imitation in the first hour of life: observations in rural Nepal. *Developmental Psychology, 24*, 464-469.

Richards, J. E. (2001). Attention in young infants: A developmental psychophysiological perspective. In C.A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (1st ed., pp. 321-338). Cambridge MA: Wisconsin: MIT Press.

Rigato, S., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2010). The shared signal hypothesis and neural responses to expressions and gaze in infants and adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 5,* 88-97.

Rigato, S., Menon, E., Farroni, T., & Johnson, M.H. (2013). The shared signal hypothesis: effects of emotion-gaze congruency in infant and adult visual preferences. *British Journal of Developmental Psychology, 31,* 15-29.

Rizzolatti, G., Fabbri-Destro, M., & Cattaneo, L. (2009). Mirror neurons and their clinical relevance. *Nature Clinical Practice Neurology 5,* 24-34.

Rochat, P. (1999). *Early social cognition*, Mahaw, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Rosenstein, D., & Oster, H. (1988). Differential facial response to four basic tastes in newborns. *Child Development, 59,*1555-1568.

Sander, D., Grandjean, D., Kaiser, S., Wehrle, T., & Scherer, K. R. (2007). Interaction effects of perceived gaze direction and dynamic facial expression: Evidence for appraisal theories of emotion. *European Journal of Cognitive Psychology, 19*, 470-480.

Sato, W., & Yoshikawa, S. (2007). Spontaneous facial mimicry in response to dynamic facial expressions. *Cognition, 104,* 1-18.

Scott-Phillips, T. C. (2008). Defining biological communication. *Journal of Evolutionary Biology, 21,* 387-395.

Schrammel, F., Pannasch, S., Graupner, S., Mojzisch, A., & Velichkovsky, B. (2009). Virtual friend or threat? The effects of facial expression and gaze interaction on psychophysiological responses and emotional experience. *Psychophysiology, 46*, 922-931.

Serrano, J. M., Iglesias, J., & Loeches, A. (1992). Visual discrimination and recognition of facial expressions of anger, fear and surprise in four- to six-month-old infants. *Developmental Psychobiology, 25*, 411-425.

Soken, N. H., & Pick, A. D. (1999). Infants' perception of dynamic affective expressions: Do infants distinguish specific expressions? *Child Development, 70*, 1275-1282.

Sorce, J. F., Emde, R. N., Campos, J. J., & Klinnert, M. D. (1985). Maternal emotional signaling: Its effect on the visual cliff behavior of 1-year-olds. *Developmental Psychology, 21*, 195-200.

Soussignan, R., Courtial, A., Canet, P., Danon-Apter, G. & Nadel, J. (2011). Human newborns match tongue protrusion of disembodied human and robotic mouths. *Developmental Science, 14*, 385-394.

Soussignan, R., Nadel, J., Canet, P., & Gerardin, P. (2006). Sensitivity to social contingency and positive emotion in 2-month-olds. *Infancy, 10*, 123-144.

Soussignan, R., Chadwick, M., Leonor, P., Conty, L., Dezecache, G., & Grèzes, J. (2013). Self-relevance appraisal of gaze direction and dynamic facial expressions: Effects on facial electromyographic and autonomic reactions. *Emotion*, *13*, 330-337.

Soussignan, R., & Schaal, B. (2005). Emotional processes in human newborns: A functionalist perspective. In J. Nadel & D. Muir (Eds.), *Emotional development: Recent research advances* (pp. 127-159). Oxford: Oxford University Press.

Soussignan, R., Schaal, B., Boulanger, V., Garcia, S., & Jiang, T. (2015). Emotional communication in the context of joint attention for food stimuli: Effects on attentional and affective processing. *Biological Psychology*, *104*, 173-183.

Soussignan, R., & Schaal, B. (1996). Children's facial responsiveness to odors: Influences of hedonic valence of odor, gender, age and social presence. *Developmental Psychology*, *32*, 367-379.

Soussignan, R., Boivin, M., Girard, A., Perusse, D., Liu, X., & Tremblay, R.E. (2009). Genetic and environmental etiology of emotional and social behaviors in 5 month-old infant twins: Influence of the social context. *Infant Behavior and Development, 32*, 1-9.

Sroufe, L. A. (1996). *Emotional development: The organization of emotional life in the early years*. Cambridge: Cambridge University Press.

Striano, T., Kopp, F., Grossmann, T., & Reid, V. M. (2006). Eye contact influences neural processing of emotional expressions in 4-month-old infants. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 1*, 87-94.

Termine, N. T., & Izard, C. E. (1988). Infants' responses to their mothers' expressions of joy and sadness. *Developmental Psychology*, *24*, 223-229.

Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are created equal: the negativity bias in social-emotional development. *Psychological Bulletin, 134*, 383-403.

Van der Schalk, J., Fischer, A. H., Doosje, B. J., Wigboldus, D., Hawk, S. T., Hess, U., & Rotteveel, M. (2011). Congruent and incongruent responses to emotional displays of ingroup and outgroup. *Emotion, 11*, 286-298.

Vanderwert, R. E., Westerlund, A., Montoya, L., McCormick, S., Miguel, H. O., & Nelson, C. (2014). Looking to the eyes influences the processing of emotion on face-sensitive event-related potentials in 7-month-old infants. *Developmental Neurobiology*, doi:10.1002/dneu.22204.

Vinter, A. (1986). The role of movement in eliciting early imitations. *Child Development, 57*, 66-71.

Walden, T. A., & Baxter, A. (1989). The effect of context and age on social referencing. *Child Development, 60,* 1511-1518.

Young-Browne, G., Rosenfeld, H. M., & Horowitz, F. D. (1977). Infant discrimination of facial expressions. *Child Development, 48*, 555-562.

ANNEXE 3 : ARTICLE PUBLIE DANS *NEUROSPYCHOLOGIA*

Neuropsychologia 77 (2015) 366–379

Contents lists available at ScienceDirect

Neuropsychologia

journal homepage: www.elsevier.com/locate/neuropsychologia

Contextual odors modulate the visual processing of emotional facial expressions: An ERP study

Arnaud Leleu*,[1], Ornella Godard [1], Nicolas Dollion [1], Karine Durand, Benoist Schaal, Jean-Yves Baudouin *

Équipe Éthologie Développementale et Psychologie Cognitive, Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, UMR 6265 CNRS – UMR 1324 INRA – Université Bourgogne Franche-Comté, 9E Boulevard Jeanne d'Arc, 21000 Dijon, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 March 2015
Received in revised form
24 July 2015
Accepted 8 September 2015
Available online 14 September 2015

Keywords:
Facial expression
Olfaction
Inter-sensory integration
Multisensory processes
Emotion
Event-Related Potentials (ERPs)

ABSTRACT

We studied the time course of the cerebral integration of olfaction in the visual processing of emotional faces during an orthogonal task asking for detection of red-colored faces among expressive faces. Happy, angry, disgust, fearful, sad, and neutral faces were displayed in pleasant, aversive or no odor control olfactory contexts while EEG was recorded to extract event-related potentials (ERPs). Results indicated that the expressive faces modulated the cerebral responses at occipito-parietal, central and central-parietal electrodes from around 100 ms and until 480 ms after face onset. The response was divided in different successive stages corresponding to different ERP components (P100, N170, P200 and N250 (EPN), and LPP). The olfactory contexts influenced the ERPs in response to facial expressions in two phases. First, regardless of their emotional content, the response to faces was enhanced by both odors compared with no odor approximately 160 ms after face-onset at several central, centro-parietal and left lateral electrodes. The topography of this effect clearly depended on the valence of odors. Then, a second phase occurred, but only in the aversive olfactory context, which modulated differentially the P200 at occipital sites (starting approximately 200 ms post-stimulus) by amplifying the differential response to expressions, especially between emotional neutrality and both happiness and disgust. Overall, the present study suggests that the olfactory context first elicits an undifferentiated effect around 160 ms after face onset, followed by a specific modulation at 200 ms induced by the aversive odor on neutral and affectively congruent/incongruent expressions.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The perception of facial expressions of emotions is not an encapsulated mechanism only involving the processing of visual cues from faces, but it also integrates information from the context (for reviews, see Barrett et al. (2011), Hassin et al. (2013) and Wieser and Brosch (2012)). Various types of contextual information influence facial expression perception. For example, gaze direction (e.g., Adams et al., 2003; Sander et al., 2007) and body posture (e.g., Aviezer et al., 2008; Meeren et al., 2005) modulate the way we perceived emotions in faces. External features such as surrounding visual scenes (Righart and de Gelder, 2006, 2008), verbal labels (e.g., Gendron et al., 2012) or sentences describing the situation encountered by the perceived face (Diéguez-Risco et al., 2013) are also integrated in expression perception. Likewise, the perception of emotions in faces also depends on the perceiver's internal states such as facial mimicry (Niedenthal et al., 2001; Oberman et al., 2007), emotional state (e.g., Niedenthal et al., 2001) or social bias (e.g., Bijlstra et al., 2014). Studies using event-related potentials (ERPs) indicated that contextual integration could arise at different processing stages reflected by the N170 (Righart and de Gelder, 2006, 2008) or the late positive potential (LPP) (Diéguez-Risco et al., 2013).

The above-reviewed literature deals with the integration of the visual context but contextual influences are also multisensory. For instance, the modulation of facial expressions perception by auditory cues from the voice, especially affective prosody, has been largely described (e.g., de Gelder and Vroomen, 2000; Dolan et al., 2001). At the cerebral level, it has been shown that the activity of the amygdala and the fusiform gyrus is enhanced when a fearful face is displayed with a congruent vocal intonation (e.g., Dolan et al., 2001). Moreover, greater activation for expressive faces presented with affective voices has been found in the posterior part of the superior temporal sulcus (STS) and in the middle temporal gyrus (e.g., Pourtois et al., 2005a), two regions involved

* Corresponding authors.
E-mail addresses: arnaud.leleu@u-bourgogne.fr (A. Leleu), jean-yves.baudouin@u-bourgogne.fr (J.-Y. Baudouin).
[1] These authors contributed equally.

http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.014
0028-3932/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

in multisensory integration. The face-voice integration in the posterior STS occurs within the first 250 ms of processing as revealed by a MEG study (Hagan et al., 2009).

In this respect, affective information carried by odors may be able to modulate the perception of emotions in expressive faces. An increasing number of studies indicate that olfaction does not play as minor a role as was previously believed in human behavior and cognition (see Zucco et al. (2012, 2014), for reviews). In particular, olfaction modulates the processing of information by the senses considered as "major" (e.g., Robinson et al., 2013; Seigneuric et al., 2010) and is strongly involved in multisensory social interactions (for reviews, cf. Schaal and Porter (1991), Semin and de Groot (2013)). In visual scenes and in social objects as well, faces are stimuli for which the processing appears especially sensitive to the olfactory context. The odor context modulates visual processing in face encoding and recognition (Steinberg et al., 2012; Walla, 2008; Walla et al., 2003, 2005) and in the rating of attractiveness (Demattè et al., 2007; Lundstrom and Olsson, 2005), likeability (Li et al., 2007), stress level or confidence (Dalton et al., 2013). This odor context effect on face processing is already fully active in early infancy (Durand et al., 2013).

Odors also influence the perception of facial expressions (Leppänen and Hietanen, 2003; Mujica-Parodi et al., 2009; Pause et al., 2004; Seubert et al., 2010a, 2010b; Zernecke et al., 2011; Zhou and Chen, 2009). For example, Leppänen and Hietanen (2003) identified faster and more accurate recognition of happy faces in pleasant (lemon, strawberry, or vanilla) than in aversive (pyridine) or no-odor contexts. Conversely, Seubert et al. (2010b) identified slower and less accurate recognition of smiling faces with odor priming regardless of the valence of the odor (vanillin vs. hydrogen sulfide), but enhanced speed and accuracy for disgust faces. An fMRI study demonstrated that odorants activate the primary olfactory cortex, the anterior insula and the superior temporal gyrus during the perception of facial expressions (Seubert et al., 2010a). Hypoactivation for disgust faces in the fusiform, middle frontal and middle cingulate gyri was interpreted as reflecting the priming effect of both aversive and pleasant odorants. This priming effect was also noted in the anterior insula, but only with an aversive odor.

Thus, odors clearly influence how facial expressions are processed. However, little is known regarding the dynamic interactions between olfaction and vision in the modulation of the cerebral response to emotional facial expressions. Several recent studies have revealed that compared with a control odor, the odor of sweat (collected either after physical exercise or after an anxiogenic situation) enhances the amplitudes of both the P100/N100 and N170 components of the event-related potentials (ERPs) in response to fearful faces, with a diminished late LPP (Late Positive Potential, Adolph et al., 2013). These results were interpreted as reflecting the effects of sweat odor to enhance the allocation of visual attention toward faces. It has also been reported that stress sweat enhances the late LPP (400–600 ms post-stimulus-onset) to neutral and ambiguous faces, but not to angry faces (Rubin et al., 2012). The same authors also reported an earlier effect of stress odor on the early LPP (250–400 ms), which was not specific of neutral, ambiguous, or angry expressions. Though mixed, these results suggest at least two phases in the olfactory modulations of visual processing of facial expressions: first, a global odor effect on any facial expression and then an interactive odor–vision effect that depends on the emotional content of the facial expression.

These ERPs studies, however, concerned biological odorants emitted by the body which convey potential information regarding the emitter's emotional state. Much less is known regarding the time course of the effect of environmental odorants (e.g., related to food or to non-specific surroundings) that concurrently influence the emotional state of both the emitter and the perceiver. In a recent study, Forscher and Li (2012) reported that aversive odors (valeric and hexanoic acids) reduce the spatial attention bias to low-intensity fearful faces in a dot-probe task, and this behavioral effect was accompanied by a reduced P100 amplitude for fearful faces compared with neutral ones. The N170 amplitude was subsequently decreased in the negative odor context, but without selective interference according to expressions. Hence, these results suggest that environmental odorants may influence early visual processing of emotional faces through the congruency between the emotional valences of both cues. However, this effect might also be due to an undifferentiated effect of the presence of an odor irrespective of its valence. Remember that behavioral data have shown inconsistent results, either congruency effects between odors and happiness/disgust (e.g., Leppänen and Hietanen, 2003) or a global effect of odors for disgust and happiness whatever the affective valence of the olfactory cues (e.g., Seubert et al., 2010b). As far as we know, no ERP study has attempted to assess whether hedonically contrasted odors differentially modulate the early processing of facial expressions. An additional explanation of the discrepant results may be a task-dependent integration of olfactory and visual information, as the modulation of facial emotion processing by odors may depend on decisional and goal-directed mechanisms. Thus, the task-unrelated influence of odors on the early visual processing of emotional faces needs to be investigated to dismiss any contribution of such mechanisms.

Accordingly, the present study aimed to clarify the nature and time course of olfactory influences on the processing of facially-expressed emotions, when no bodily emitted odorants are used and when the task performed is orthogonal to facial expression processing (i.e., pleasant/aversive/control olfactory contexts alternated with happy/disgust/other expressions). The participants were engaged in a detection task of neutral red-faces among expressive and neutral non-red faces displayed in hedonically contrasted odor contexts (butyric acid as an aversive context and strawberry as a pleasant context) or in a no odor control context. The non-red faces were expressive faces, which valence was congruent/incongruent with the olfactory context (i.e., happy and disgust expression). They were also composed of different control conditions with expressive faces unrelated to both odors (i.e., angry, fearful, and sad faces) and neutral faces. Based on previous ERP studies (Forscher and Li, 2012; Rubin et al., 2012), we hypothesized that the odor context would modulate the ERPs to facial expressions in two phases: An early global effect of the olfactory context on the cerebral processing of faces should first emerge whatever the expressions, followed by a subsequent interactive odor–vision effect with the valence of the olfactory context differentially modulating ERPs according to the congruent/incongruent relation with the perceived facial expression.

2. Methods

2.1. Participants

Twenty-nine participants were recruited by advertisements and remunerated for their participation. All of the participants provided informed consent, and testing was conducted according to the Declaration of Helsinki (BMJ 1991; 302: 1194). Five participants were excluded because their EEG recordings were too noisy (less than 60% of signals kept after artifact rejection, see below). The final sample was composed of 24 participants (12 women; mean age ± SD: 22 ± 2.9 years; range: 18–30 years). They were all right-handed (mean laterality quotient ± SD: .78 ± .14; range: + .52 to + 1; Dorthe et al., 1995). At the moment of the experiment, no participant reported any problem regarding their vision and

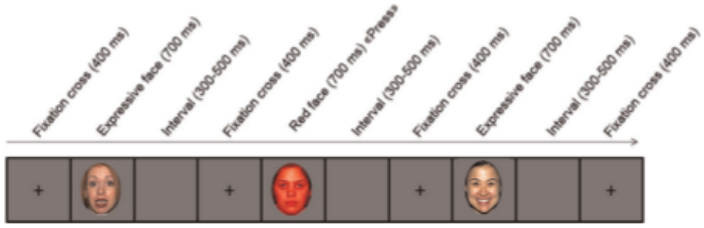


Fig. 1. Time sequence of the experimental trials. The stimuli were displayed for a duration of 700 ms following the appearance of a fixation cross for 400 ms. A blank screen then appeared for a random duration ranging from 300 and 500 ms. In each block, 36 expressive faces were randomly intermixed with 6 neutral red faces. The participant's task was to press the "space" bar each time a red face was perceived[2]. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

olfaction (no allergies or infections). At the end of the experiment, the participants were interviewed with a standardized set of questions regarding their degree of awareness of odors in the environment. Twelve participants spontaneously reported having smelled an odor when they were asked if they noticed anything unusual, and ten other participants only reported smelling an odor when they were asked. None of the participants noticed the exact source of the odorants (chinrest), nor any somesthesic stimulation related to the flow of odor, but reported their impression that some odor stimuli (perfume/body odor) were linked to the room or the experimenter.

2.2. Stimuli

2.2.1. Face stimuli

The participants were required to detect neutral red-colored faces among sets of emotional and neutral distractor faces. Six different facial identities were chosen from the NimStim set of facial expressions (Models F01, F02, F05, F07, F09 and F10; Tottenham et al., 2009); for each model, neutral pictures and 5 different emotions (angry, happy, sad, fear and disgust) were selected. An additional set of 6 neutral faces was used to create the "red faces". The faces were cropped and mounted on a gray background of medium luminance (gray level=128) and scaled to an image size of 385 × 513 pixels. The "red faces" were created by increasing the intensity of red to 175–189 in the RGB properties.

2.2.2. Olfactory stimulation

Two odor stimuli were selected for their contrasted hedonic valence: a pleasant strawberry odor ("Meilleur du Chef", Maignon, France) and butyric acid (Sigma, Saint-Quentin-Fallaviers, France), which conveys a cheese odor that is strongly aversive (Soussignan and Schaal, 1996). The strawberry odor was used in undiluted form, while butyric acid was diluted in mineral oil (concentration: 5.10^{-4} v/v). We used 20 μL strawberry and 40 μL butyric acid solutions that were spiked on pieces of an odorless adsorbent material (P100, Powersorb, 3 M). These concentrations were chosen due to a pilot study that was performed with 4 judges to determine the subjective intensity and detectability of both odor stimuli and equilibrate them. Each judge was tested with the same experimental display as in the main experiment (see below). Different concentrations were presented for each odor stimulus and the judges should say whether they detected an odor and which odor it was. The lowest concentrations for an accurate detection were kept for the main experiment. The pieces of absorbent material were introduced into 20-ml polypropylene bottles. The control stimulus consisted of a bottle that contained the scentless adsorbent material without any odorant. These bottles were connected to an air-delivering device through which a constant flow of scentless air was passed (at .5 bars). This continuous flow of air originated from a tank of pressured air which was purified on charcoal filters and set at room temperature. The main air-stream was directed to one of the three 20-ml polypropylene bottles through a hand-activated valve so that it could entrain the odor-saturated air developed over the adsorbent material within each bottle. Downstream of each bottle, an independent tube was connected to a chinrest on which the participants applied their heads during the whole experiment. Although it was extremely week, the air-flow was not directed toward the participants' face to ensure that it could not be detected through somesthesic stimulation. The odor-laden or control airflows were thus conveyed under the participants' noses in the absence of visual or auditory cues. The odor-delivery device was hidden from the participants' visual field.

2.3. Procedure

After the electrode-cap placement, the participants were seated in a light-attenuated room in front of a screen where the stimuli were displayed at a viewing distance of 57 cm. The sequence of a trial started with a fixation cross lasting 400 ms, followed by the presentation of a face stimulus for 700 ms (see Fig. 1). A blank screen then followed for a random interval between 300 and 500 ms. Participants were asked to detect when a face stimulus was red-colored by pressing as quickly as possible the "space bar" of a computer with both forefingers. Each block was composed of 42 trials: 36 trials with non-red faces expressing neutrality or one emotional expression among the five used and 6 trials with neutral red-faces. The participants were trained during 7 blocks (without any air-flow delivery). The test was subsequently initiated and consisted of 21 blocks of 42 trials. Each block was associated with one odor. The order of odor stimuli was counterbalanced across participants for the 3 first blocks (for example: butyric acid – strawberry – control). The same sequence of olfactory context was then repeated for the 6 remaining sets of 3 blocks. The 6 possible orders (with 3 olfactory contexts) were balanced across participants. Participants could rest between blocks, with minimal inter-block intervals of 1 min. Finally, in each odor context, the entire procedure comprised 252 trials for non-red faces (five expressions and neutrality) and 42 trials for neutral red faces. Only trials containing non-red faces were analyzed (42 for each emotional expression, 42 for neutrality) as we aimed to examine olfactory–visual interactions during the passive viewing of facial expressions. The unrelated "red-face" detection task was performed to ensure that participants paid attention to the stimuli.

2.4. EEG recording and analysis

EEG was continuously recorded from 32 Ag/AgCl electrodes mounted in an electrode cap (Waveguard, ANT, Enschede, The Netherlands) according to the 10–10 classification system with respect to a reference electrode placed in a fronto-central position

(AFz). It was digitalized at a sampling rate of 1024 Hz (band-pass filter: .1–100 Hz) and electrode impedance was maintained below 10 kΩ. EEG data were analyzed with the ASA software (version 4.6, ANT). A 30 Hz low-pass filter was applied off-line and all electrodes were re-referenced to a common average reference. ERPs were then averaged for 600 ms, including a 100-ms baseline prior to the stimulus-onset and a 500-ms interval after the stimulus-onset, and trials contaminated with eye movements or other artifacts were rejected (any activity exceeding ± 75 μV relative to the baseline). After artifact rejection, all conditions (i.e., for each expression in each olfactory context) contained at least 27 trials (range: 27–42) for the remaining participants. Only trials containing non-red expressive and neutral faces were analyzed.

Inferential analyses were performed on mean amplitudes for distinct components that have been shown to be involved in face and facial expression processing (e.g., Williams et al., 2006). At occipital and parietal sites, the P100, N170, P200 and N250 components were analyzed (electrodes O1/2, P3/4, and P7/8). The P100 was tested by averaging the signal in the 80–110-ms window, the N170 in the 130–180-ms window, the P200 in the 180–240-ms window, and the N250 in the 240–320-ms window. These time windows were chosen by visually inspecting the time course of each component. In the 130–180-ms time-window, the vertex positive potential (VPP) was also analyzed at central sites (electrodes C3/4, Cz; George et al., 1996). Finally, the LPP was analyzed at central-parietal sites (electrodes C3/4, CP5/6; e.g., Schupp et al., 2004) in the 320–480 ms time-window.

The data were analyzed by computing ANOVAs for the different components. Analyses on P100, N170, P200 and N250 included four within-subjects factors: Expression (anger vs. disgust vs. happiness vs. neutrality vs. fear vs. sadness), Olfactory context (aversive vs. pleasant vs. control), Hemisphere (right vs. left), and Site (O1/2, P3/4, and P7/8). Another Site factor was used for the VPP analysis (C3, Cz, C4) and the Hemisphere factor was not included due to the central site (Cz). The LPP was analyzed with the Expression, Olfactory context and Hemisphere factors, and another Site factor (C3/4, CP5/6). Greenhouse-Geisser corrections were performed for each main effect and interaction. Post-hoc analyses were performed using the Tukey's one-factor HSD procedure. In order to improve readability, main effects or interactions involving the Site and Hemisphere factors will be described only if they interacted with the Expression and/or Olfactory context factors.

3. Results

Results regarding the main effect of facial expression (regardless of olfactory contexts) for each component will be presented first to consider the different stages of expression processing. Then, results regarding the modulations induced by the olfactory context will be presented in detail.

3.1. Different phases of facial expression processing

The modulations of cerebral response induced by the expressions at electrodes O1/2, P3/4, P7/8 are illustrated in Fig. 2. The modulations at electrodes CP5/6, C3/4 and Cz are illustrated in Fig. 3. Distinct patterns emerged for the different components (P100, N170, VPP, P200, N250 and LPP), which indicate different phases in the visual processing of emotional faces.

[2] Note that for image authorization purposes, the second "no-go" face was not used in the course of the present experiment; however, the model provided informed consent for the publication of her picture. The other models used did not agree to publication of their pictures, but they can be seen on http://www.macbrain.org/resources.htm.

For the ***P100***, Fig. 2 shows an early effect of fear at central parietal sites (P3/4) and, both anger and disgust at the more lateral parietal sites (P7/8). The main effect of Expression was not significant ($F(4,89)=1.06$), but it interacted significantly with Site ($F(6,135)=6.79$, $\varepsilon=.59$, $p<.0001$, $\eta p^2=.23$) with a significant effect of Expression at both P3/4 and P7/8 ($F(4,96)=5.67$, $\varepsilon=.84$, $p<.001$, $\eta p^2=.20$ and $F(5,104)=4.73$, $\varepsilon=.90$, $p<.001$, $\eta p^2=.17$) but not at O1/2 ($F<1$). At P3/4, post-hoc comparisons indicated that the P100 was significantly more positive for fear than anger ($p<.01$), sadness ($p<.001$) or happiness ($p<.0001$), whereas at P7/8 the P100 was significantly larger for anger and disgust than neutrality ($p<.01$ and $p<.001$, respectively).

At central sites in the 130–180-ms time-window, a main effect of Expression emerged in the ***VPP*** amplitude ($F(4,95)=8.38$, $\varepsilon=.83$, $p<.0001$, $\eta p^2=.27$) with a pattern close to the one found for the P100 (see Fig. 3). VPP was reduced for neutrality compared with disgust, anger and fear (all p values $<.01$), but no difference emerged with happiness and sadness. VPP amplitude was also more positive for disgust than for happiness and sadness (all p values $<.01$), and for anger than for happiness ($p<.05$).

The ***N170*** was measured in the same time-range at occipital and lateral parietal sites but a different pattern appeared. Indeed, Fig. 2 suggests that dissociations emerged in N170 amplitude between the emotional and neutral expressions and between disgust and the other emotional expressions. The analysis revealed that the main effect of Expression was significant ($F(3,77)=10.85$, $\varepsilon=.67$, $p<.0001$, $\eta p^2=.32$) and was significantly qualified by Site ($F(5,124)=11.66$, $\varepsilon=.54$, $p<.0001$, $\eta p^2=.34$). The effect of Expression was significant at both O1/2 and P7/8 ($F(3,64)=12.02$, $\varepsilon=.56$, $p<.0001$, $\eta p^2=.34$ and $F(4,88)=17.06$, $\varepsilon=.76$, $p<.0001$, $\eta p^2=.43$) but not at P3/4 ($F(4,81)=2.02$). Post-hoc comparisons indicated a quite similar pattern at O1/2 and P7/8. At both sites, the N170 amplitude was significantly enhanced for disgust as compared with any other emotional expression (all p values $<.0001$, with the exception of fear at P7/8) and reduced for neutrality as compared with any other emotional expression (all p values $<.0001$). At P7/8, the N170 was also significantly greater for fear than for the other expressions (all p values $<.05$, with the exception of disgust as described above).

The ***P200*** mirrored, to some extent, the pattern reported for the N170 by distinguishing expressive faces from neutral faces and disgust faces from most other expressions. The main effect of Expression was significant ($F(4,92)=2.84$, $\varepsilon=.80$, $p<.05$, $\eta p^2=.11$) and interacted with Site ($F(6,138)=3.40$, $\varepsilon=.60$, $p<.01$, $\eta p^2=.13$). The effect of Expression was significant at both O1/2 and P7/8 ($F(4,85)=3.59$, $\varepsilon=.74$, $p<.05$, $\eta p^2=.14$ and $F(4,92)=3.03$, $\varepsilon=.80$, $p<.05$, $\eta p^2=.12$) but not at P3/4 ($F(4,86)=1.76$). Post-hoc comparisons revealed that at O1/2, the P200 was of higher amplitude for neutrality than for any other emotional expression (all p values $<.05$), with the exception of sadness. At P7/8, the amplitude was higher for neutrality than for anger, disgust, and fear (all p values $<.01$), but not for happiness or sadness.

The ***N250*** component primarily resembled the patterns reported at the level of the P200, but it was not modulated by Expression ($F(3,78)=1.46$). In contrast, Expression significantly interacted with Site ($F(6,132)=3.75$, $\varepsilon=.57$, $p<.01$, $\eta p^2=.14$). Further analyses demonstrated that the effect of Expression was significant at O1/2 only ($F(3,70)=3.01$, $\varepsilon=.61$, $p<.05$, $\eta p^2=.12$; at P3/4: ($F(3,79)=1.54$; at P7/8: $F<1$). Post-hoc tests indicated that most emotional expressions elicited more negative N250 compared with neutrality, at the occipital site. This effect was significant for anger ($p<.05$), disgust ($p<.0001$), happiness ($p<.0001$), and fear ($p<.001$), but not for sadness. Finally, disgust elicited also a more negative component than sadness ($p<.001$).

For the ***LPP*** component, a significant main effect of Expression was observed ($F(4,83)=4.87$, $\varepsilon=.72$, $p<.01$, $\eta p^2=.17$). It was

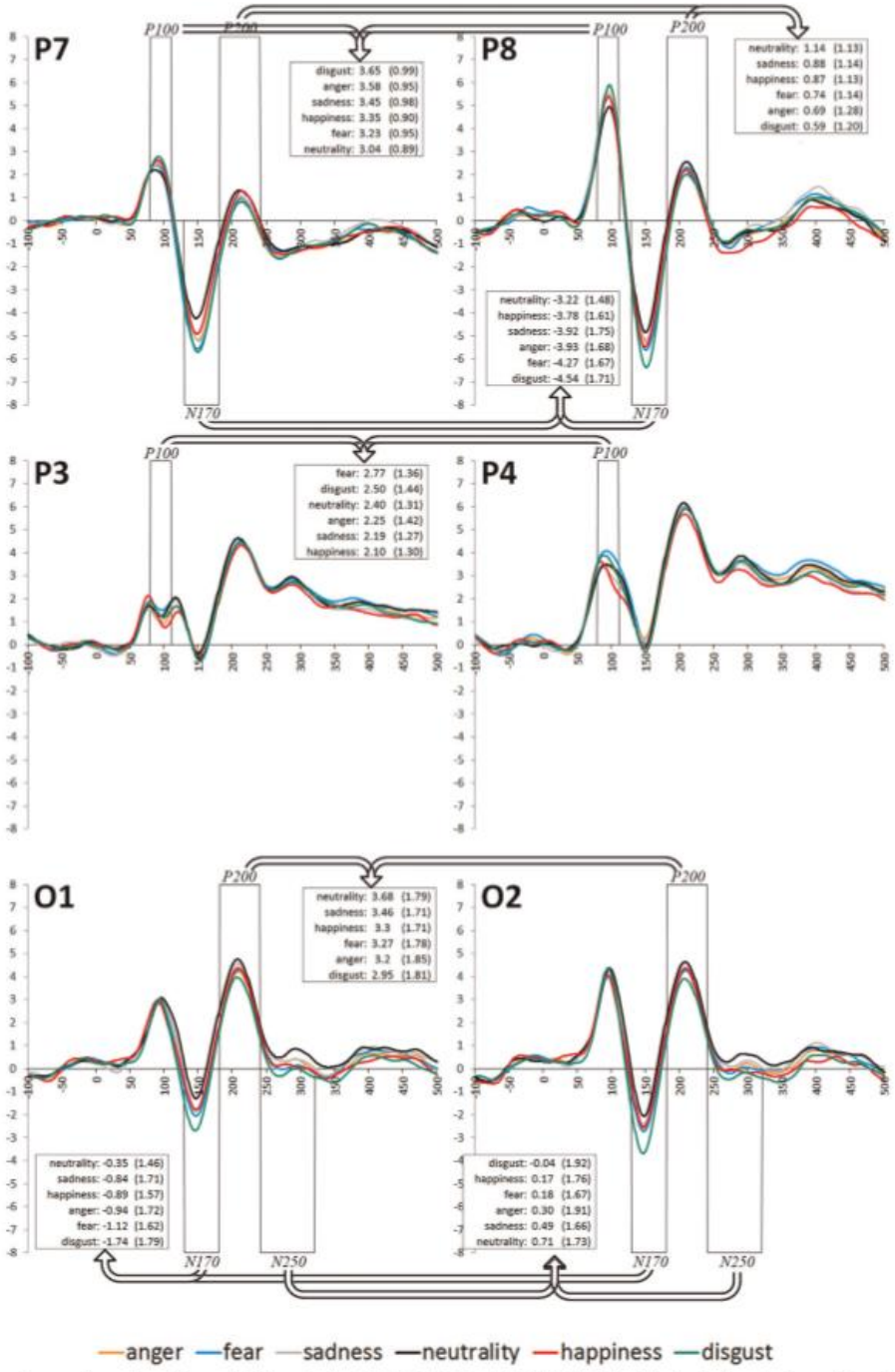


Fig. 2. Main effect of expression at the occipito-parietal electrodes for P100, N170, P200 and N250. The black-lined brackets indicate the time-windows for analysis. Mean amplitudes (and SEs) for each expression are indicated within boxes.

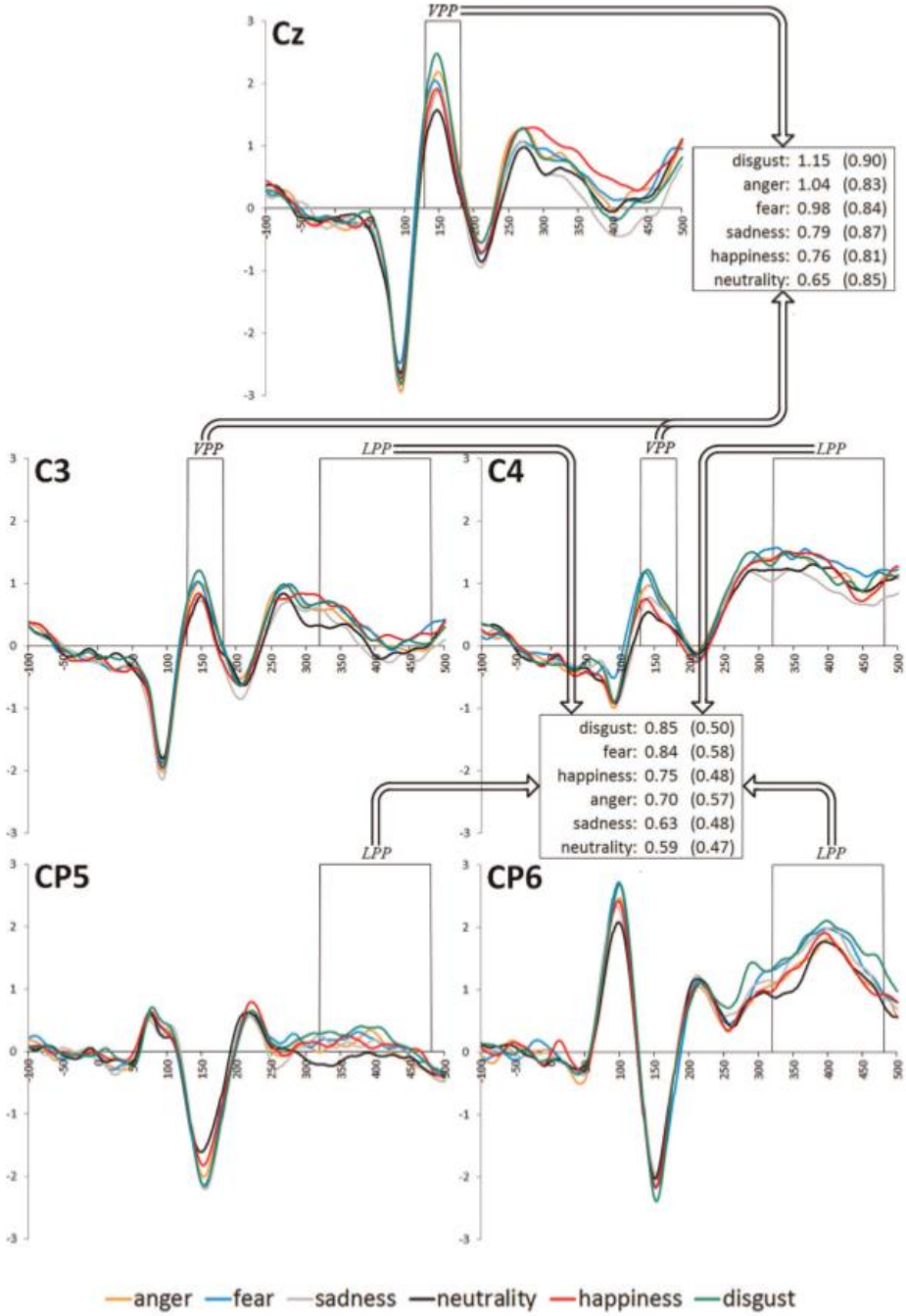


Fig. 3. Main effect of expression at the central and parietal electrodes for VPP and LPP. The black-lined brackets indicate the time-windows for analysis. Mean amplitudes (and SEs) for each expression are indicated within box.

driven by greater amplitudes for disgust and fear as compared to sadness (both p values $< .05$) and neutrality (both p values $< .01$). As suggested by Fig. 3, different patterns emerged according to the recording sites. Indeed, a significant Expression × Site interaction was found ($F(4,88)=2.76$, $\varepsilon=.77$, $p<.05$, $\eta p^2=.11$) and further analyses indicated a significant main effect of Expression for both

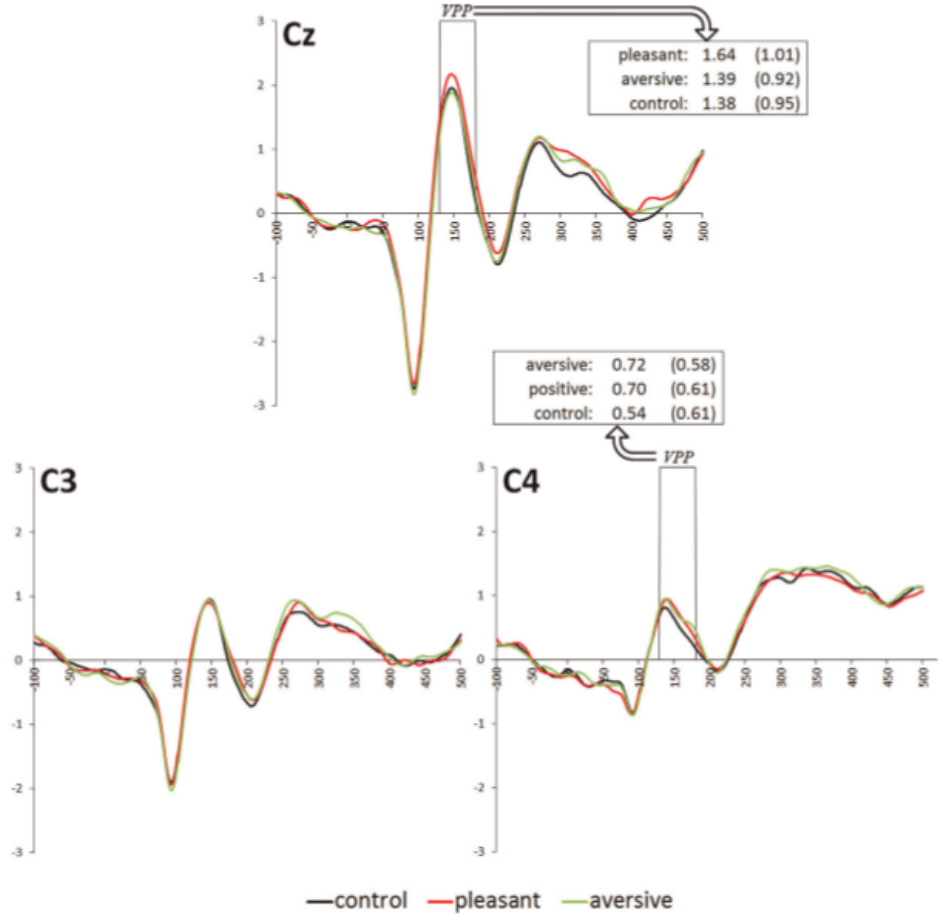


Fig. 4. Main effect of odor context at the central electrodes for VPP. The black-lined brackets indicate the time-windows for analysis. Mean amplitudes (and SEs) for each olfactory context are indicated within boxes.

CP5/6 ($F(4,87)=4.22$, $\varepsilon=.76$, $p<.01$, $\eta p^2=.16$) and C3/4 electrodes ($F(4,86)=3.59$, $\varepsilon=.75$, $p<.05$, $\eta p^2=.17$). Post-hoc tests showed that the enhanced amplitudes for disgust were only observed at the CP5/6 electrodes with a significant difference with neutrality ($p<.01$). Conversely, at the level of the C3/4 electrodes, amplitudes for fear were greater than those for sadness ($p<.01$).

3.2. Different phases of the effect of the olfactory context in the processing of facial expression

The olfactory context modulated the brain response to facial expressions in two sequential phases: (1) an enhanced response regardless of the emotional content of faces when an odor was present, which especially occurred at central sites in the 130–180-ms time-window (VPP), but also at different centro-parietal and temporal scalp locations in the same time-window (see Section 3.3); and (2) an interaction effect between the olfactory context and the type of facial expression initiated at the level of the occipital P200.

For the first phase, the modulations of the visual responses by the olfactory contexts are illustrated in Fig. 4. No main effect of Olfactory context was noted on the VPP, despite a strong trend ($F(2,41)=2.85$, $\varepsilon=.89$, $p=.075$), but it significantly interacted with Site ($F(4,82)=3.27$, $\varepsilon=.89$, $p<.05$, $\eta p^2=.12$). The main effect of Olfactory context was further significant at Cz ($F(2,45)=4.16$, $\varepsilon=.97$, $p<.05$, $\eta p^2=.15$) and C4 ($F(2,46)=3.98$, $\varepsilon=1$, $p<.05$, $\eta p^2=.15$), but not at C3 ($F<1$). For Cz, post-hoc comparisons indicated a larger amplitude for the pleasant odor context than for the control and aversive odor contexts (both p values $<.01$). However for electrode C4, no effects were found after post-hoc corrections, despite an apparent effect of the aversive context in Fig. 4. No other effects or interactions involving the Olfactory context were noted at the level of VPP. Because the effect of the olfactory context irrespective of the content of facial expressions was detected only at central sites, and because no post-hoc comparisons were significant at electrode C4 despite a significant main effect, we performed complementary analyses to more precisely characterize the timing and topography of this effect in this time-window. Details and results from these analyses are provided in Section 3.3.

For the second phase, the interaction between Expression and Olfactory context is illustrated for electrodes O2 and P8 in Fig. 5. The data in this figure suggest that the previous effects of Expression described at the levels of P200 and N250 were larger in

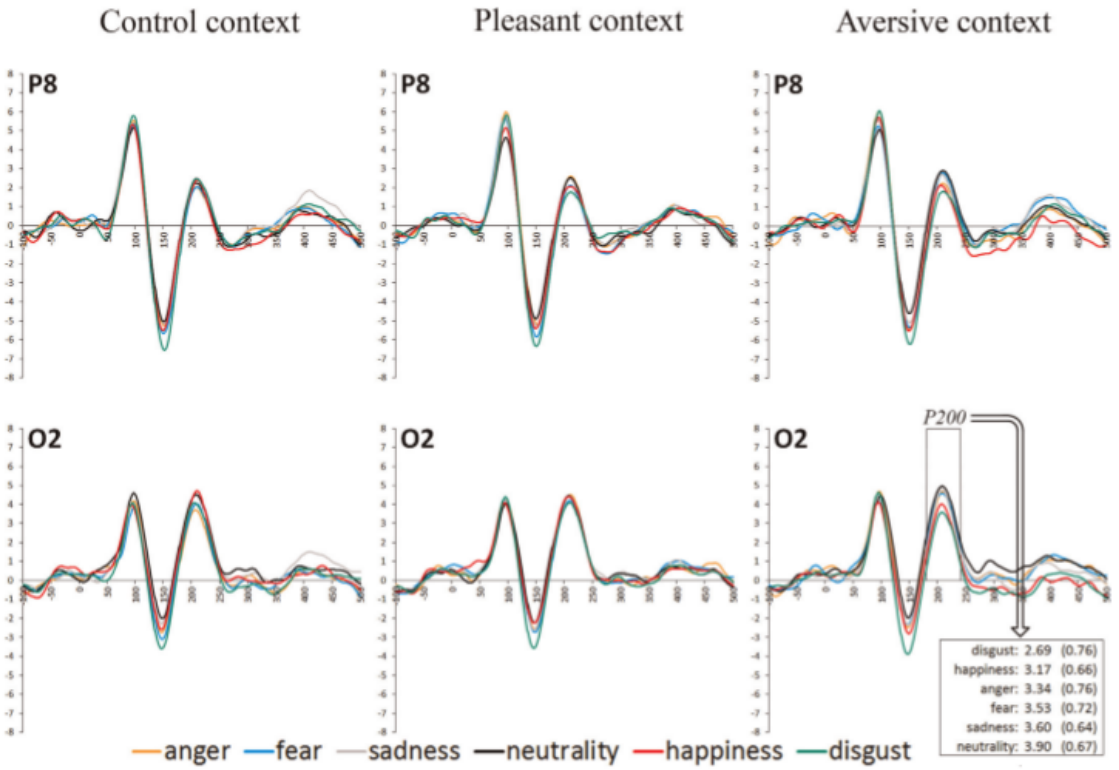


Fig. 5. Interaction of expression and odor context at the right occipito-parietal electrodes O2 and P8 for P200 and N250. The black-lined brackets indicate the time-windows for analysis. Mean amplitudes (and SEs) for each expression are indicated within boxes.

the aversive odor context than in the control and pleasant odor contexts, with an exaggeration enhancement in the ERP differences between neutrality and both happiness and disgust in the aversive odor context.

At the level of the P200, the analyses that included the 3 sites (O1/2, P3/4, and P7/8) suggested hemispheric differences in the interaction between Expression and Olfactory context, but the interaction between the three factors did not reach significance after Greenhouse-Geisser correction ($F(7,153)=1.89$, $\varepsilon=.67$, $p=.078$). A similar analysis restricted to each site where the main effect of Expression was significant (i.e., O1/2 and P7/8) indicated that the interaction between Expression, Olfactory context, and Hemisphere was significant at O1/2 ($F(6,137)=2.26$, $\varepsilon=.60$, $p<.05$, $\eta p^2=.09$), but not at P7/8 ($F(7,155)=1.54$). Complementary analyses at O1/2 indicated that the interaction between Expression and Olfactory context was significant in the right hemisphere ($F(6,138)=2.44$, $\varepsilon=.60$, $p<.05$, $\eta p^2=.10$), but not in the left hemisphere ($F(7,152)=1.11$). Interestingly, in the right hemisphere (electrode O2), the effect of Expression was not significant in the control or pleasant odor contexts ($F(4,89)=1.94$ and $F(4,84)=.50$, respectively), but it was significant in the aversive odor context ($F(4,97)=5.30$, $\varepsilon=.84$, $p<.001$, $\eta p^2=.19$), with significantly greater amplitudes for neutrality than for the other emotional expressions (all p values $<.05$), except fear. P200 amplitudes were also lower for disgust and happiness than for the other emotional expressions (all p values $<.001$). Considering the effect of the Olfactory context, P200 amplitudes for disgust and happiness were lower in the aversive odor context than in the control and pleasant odor contexts (all p values $<.01$). Conversely for neutrality, the P200 component was more positive in the aversive odor context than in the control ($p<.05$) and pleasant ($p<.01$) odor contexts. Regarding the other expressions, the amplitude was larger for anger in both the pleasant and aversive odor contexts compared with the control context (both p values $<.0001$), with no difference between these two last olfactory contexts. For fear, there was only a significant difference between the control and aversive odor contexts, with a higher positive component in the aversive odor context ($p<.0001$). No difference was detected for sadness. Finally, analyses of the N250 and LPP components indicated that the Olfactory context by Expression interaction vanished around 240 ms after face onset.

3.3. *Complementary analyses on the first phase of undifferentiated influence of odors in facial expression processing*

Because the results indicated a main effect of the Olfactory context regardless of the emotional content of facial expressions only at central sites (VPP amplitude), and because this effect was not clearly identified with post-hoc comparisons at electrode C4, we performed complementary analyses to precisely characterize the timing and topography of this effect in ERPs. We first computed the F values for the main effect of Olfactory context at each electrode and at each time sample in the 130–180-ms time-window. To control for false positives when performing such a high number of comparisons, a criterion of consecutive significance (e.g., Guthrie and Buchwald, 1991) was used for each electrode to

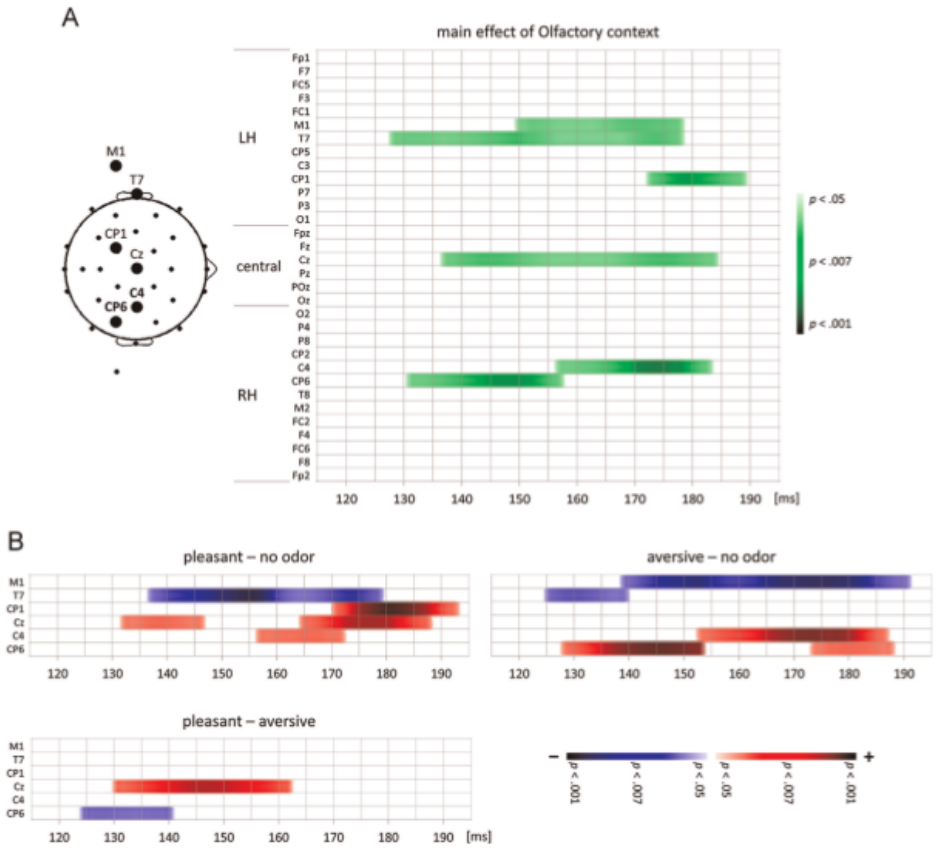


Fig. 6. (A) Time course of the main effect of the odor context at each electrode in the 115–195-ms time-window computed with a criterion of consecutive significance of 15 time samples. *P* values are color-coded in green with the darker areas indicating the lower values. LH: left hemisphere; RH: right hemisphere. (B) Time course of the differences between each odor context in the same time-window for the electrodes that showed a significant main effect (the same criterion of consecutive significance was applied). *P* values are color-coded in red for positive differences, and in blue for negative differences, with the darker points indicating lower *p* values. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

determine the time course of the effect: at least 15 consecutive significant time points should be obtained to indicate the onset of the effect, followed by at least 15 consecutive non-significant samples to determine when it stopped. Due to this criterion, we included the 30-time samples surrounding the time-window (15 before and 15 after) to compute the *F* values (complete time-window: 115–195 ms). Further, we restricted a similar analysis with *t*-tests between the different olfactory contexts in the same time-window for the electrodes that showed a significant main effect. For both analyses, *p* values were translated in color-codes to illustrate the results. For the main effect of Olfactory context, significant effects are represented in green, with the darker points indicating the lower *p* values. For the *t*-tests comparing each olfactory context, significant effects are represented in red for positive differences, and in blue for negative differences. Again, the darker points indicate the lower *p* values. Results from these analyses are depicted in Fig. 6.

For the main effect of the Olfactory context, results from the analysis of the VPP amplitude were confirmed with a significant effect between 135 and 185 ms at electrode Cz and between 155 and 185 ms at electrode C4, but no effect at electrode C3. At the Cz electrode, significant differences were further confirmed between the pleasant and both the aversive and the no odor contexts. Critically, whereas post-hoc comparisons did not previously show significant differences between odors at C4 electrode, consecutive significance rather indicates that both the aversive and the pleasant odors elicited more positive VPP amplitudes than the no odor olfactory context. Interestingly, the main effect of the Olfactory context was also found for centro-parietal and temporal sites. It started as soon as 130 ms after face-onset at electrodes T7 and CP6, 20 ms later at electrode M1 and 40 ms later at electrode CP1. *T*-tests indicated significant differences between the pleasant odor and the no odor contexts at T7 and CP1. Significant differences between the aversive and the no odor contexts mainly appeared at M1 and CP6, but a short early effect was also noted at T7. Finally, only CP6 also showed a short significant difference between the aversive and the pleasant odor contexts at early latencies. Note that the sign of the significant differences mainly reflects greater amplitudes for the odor vs. no odor conditions, as a positive component was recorded at central and centro-parietal sites, and a negative component at temporal sites. In sum, both pleasant and aversive odor contexts elicited enhanced amplitudes compared with the no odor context in the 115–195-ms time-window, but these effects were found at different sites depending on the odor

(Cz, C4, T7 and CP1 for the pleasant odor; C4, M1, T7 and CP6 for the aversive odor).

In order to explore more precisely the different topographies elicited by the effects of the pleasant and aversive odors compared to no odor control condition, we performed two principal component analyses (PCAs) including the six electrodes showing a significant odor effect as variables and each time point in the 115–195 ms time-window as observations. The first analysis was performed for the differences between pleasant and no odor conditions, the second analysis was performed for the differences between aversive and no odor conditions. Both analyses were computed according to the effect sizes (Cohen's d). Varimax rotation was applied to minimize component overlap and the number of components was decided according to a minimal eigenvalue of 1.

The first PCA indicated two principal components (PC1 and PC2) with eigenvalues of 4.28 and 1.13 respectively (variance explained: 71.4% for PC1 and 18.9% for PC2). Electrodes M1, T7, CP1, Cz and C4 loaded in PC1 whereas electrode CP6 loaded in PC2. Thus, PC1 included all electrodes showing a significant effect of the pleasant odor but M1. PC2 only included electrode CP6 that did not show any significant effect of the pleasant odor. The second PCA also indicated two PCs with respective eigenvalues of 3.05 and 2.69 (variance explained: 50.8% for PC1 and 44.8% for PC2). PC1 included three recording sites (T7, C4 and CP6) whereas PC2 included the three others (M1, CP1 and Cz). In other words, three electrodes showing a significant effect of the aversive odor loaded in the first component whereas the three electrodes loading in the second component did show any significant effect of the aversive odor, except M1. In sum, the PCAs confirmed that the two effects of odors compared to no odor in the 115–195 ms time-window developed over different recording sites, despite slight differences with the topographies suggested by the previous analysis of consecutive significance.

4. Discussion

Using a technique (ERPs) with high temporal resolution, this study was designed to investigate the time-course of the modulations induced by contextual odors valence on the processing of emotionally expressive faces. Odorants convey indeed influential cues that can concurrently influence the emotional state of both the emitter and the perceiver of facial indices, and may affect how expressions of the emitter are perceived. Here, we used an orthogonal task to assess how odor–vision interactions affect early visual processing uncontaminated by explicit goal-directed mechanisms. Based on previous ERP studies (e.g., Williams et al., 2006), we predicted an early odor-based modulation of brain responses to expressive faces from 80 to 480 ms after stimulus onset in several occipital, parietal and central ERP components (P100, VPP, N170, P200, N250 and LPP). Moreover, based on previous studies investigating odor–vision interactions (e.g., Rubin et al., 2012), we expected that the odor context would have a general effect before interacting with the decoding of facial expressions depending on whether odors and faces convey congruent/incongruent affective information. Our main results fit well with this prediction and cast some new light on the time course of odor–vision integration in the early processing of facial expression. Three main phases were evidenced in odor–vision interactions in face reading: a main effect of face expressions occurring from 80 to 480 ms after face-onset at posterior and central topographies, a main effect of odors globally modulating the early stages of face processing between 130 and 180 ms at several central, centro-parietal and temporal scalp locations, and an interaction between expressions and odors around 200 ms after face-onset at occipital sites.

4.1. The different phases of facial expression processing

First, the emotional content of some expressions (e.g., fear, anger, and disgust), enhanced the cerebral responses at the level of the P100, starting around 80 ms after stimulus-onset. Such emotional modulations corroborate prior studies (e.g., anger: Brosch et al., 2008; Kolassa and Miltner, 2006; disgust: Utama et al., 2009; fear: Eimer and Holmes, 2002; Li et al., 2008; Pourtois et al., 2004a, 2005b) which consider that they derive from the stronger mobilization of attention orienting or alerting mechanisms for these expressions and have been interpreted in terms of higher relevance to the perceiver (e.g., signaling an immediate danger) compared with the other expressions (i.e., happiness, sadness, and neutrality). This early sensitivity may index fast cortical pathways (Pessoa and Adolphs, 2010) or influences from the amygdala (Vuilleumier et al., 2001, 2004) through the processing of coarse visual information from magnocellular inputs (Pourtois et al., 2005b). The same emotional expressions also enhanced VPP amplitudes approximately 130 ms after face-onset at central sites, corroborating previous reports of expression-sensitive positive responses at central and anterior topographies (Ashley et al., 2004; Eger et al., 2003; Eimer and Holmes, 2002; Luo et al., 2010; Smith et al., 2013; Williams et al., 2006). It has been suggested that these activities may reflect emotional enhancement of visual processing (e.g., Eimer and Holmes, 2002; Smith et al., 2013), maybe larger for expressions that previously elicited larger responses at the level of the P100. This interpretation fits well with the extraction of the affective content of visual objects in this time-range (Barrett and Bar, 2009). Hence, VPP amplitudes in response to facial expressions may reflect a response to alerting emotions following the first emotional relevance detection observed in the posterior P100.

The emotional content of expressions also modulated the occipito-temporal N170 component where emotional expressions, especially disgust, gave rise to a differential response compared with neutrality. The N170 is known to be involved in the perceptual coding of facial information (Bentin et al., 1996; George et al., 1997; Rossion and Jacques, 2011) and is sensitive to facial expressions (Ashley et al., 2004; Campanella et al., 2002; Eger et al., 2003; Luo et al., 2010; Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006; Utama et al., 2009; Williams et al. 2006). Because the N170 reflect the encoding of facial configuration, it has been suggested that it is sensitive to the intensity of facial expressions but not indicative of emotion categories (Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006; Utama et al., 2009). As we mainly observed enhanced amplitudes for disgust, and in a lesser extent for fear, this interpretation suggests that these expressions were the most intense in our set of stimuli (i.e., with the greatest difference in facial configuration compared with neutrality). Another explanation could be that the diagnostic features for perceiving disgust and fear were more salient, as it has been suggested that the N170 indicates the integration of diagnostic features for the perceptual categorization of facial expressions (e.g., Joyce et al., 2006; Schyns et al., 2007, 2009). Future studies are needed to evaluate these interpretations. Nonetheless, both suggest that the expression effect at the level of the N170 is not related to the specific affective content of the expressions. Note that it has been shown that the VPP and the N170 index the same mechanisms during face categorization (Joyce and Rossion, 2005). However, in line with previous findings (Ashley et al., 2004; Smith et al., 2013; Williams et al., 2006), we noted different patterns for both components in the present study. This likely suggests that at least some different generators may be involved during facial expression processing, perhaps reflecting differential perceptual coding and sensitivity to emotional relevance.

Concerning the P200 and the N250, we found increased negativities for all facial expressions except sadness. Previous studies showed increased negativity for emotional expressions at

posterior sites in the P200 time-range (Schupp et al., 2004; Williams et al., 2006; see also Eimer and Holmes (2002)). Previous evidence also showed modulations by facial expressions at the level of the subsequent N250 component or in the same time-window (Ashley et al., 2004; Dennis and Chen, 2007; Williams et al., 2006). Increased negativities appearing in the P200 and N250 time-ranges (around 200 to 350 ms after stimulus-onset) have been previously reported for emotional expressions relative to neutral faces, and often called early posterior negativities (EPN; e.g., Schupp et al., 2004; Smith et al., 2013). These are interpreted as enhanced processing for affective information (Schupp et al., 2004; Smith et al., 2013), which may index projections from the amygdala (Sato et al., 2001) or the insula (Ashley et al., 2004) on the visual system. This interpretation has also been more generally provided for all kinds of emotional stimuli (e.g., Foti et al., 2009). Thus, EPN may index the first integration of the specific emotional meaning in the visual processing of stimuli sharing emotional content through connections between the visual system and the amygdala, the OFC, the insula, and the somatosensory cortices (Adolphs, 2002). For example, the OFC and posterior structures in the visual system interact as soon as 215 ms after stimulus onset (Bar et al., 2006). Because we observed increased EPN for all emotional expressions except sadness, our results fit well with this interpretation. After different stages reflecting the initial attentional capture by emotional relevance (P100, VPP) and the perceptual coding of expressive faces (N170), the EPN observed in the P200 and N250 time-windows indexes the first stage sensitive to the emotional meaning conveyed by the expressions, maybe through connections between the emotional brain and the visual system.

Finally, our results showed increased amplitude of the LPP, especially for disgust and fear compared with other expressions. The LPP has been interpreted as reflecting sustained attention to motivationally salient stimuli, and/or elaborative processing (Schacht and Sommer, 2009; Schupp et al., 2004). Whereas some studies report larger LPP for all expressions (e.g., Luo et al., 2010), other observed larger LPP only for fearful and angry faces (Schupp et al., 2004; Williams et al., 2006). In the present study, we found the effect for fear but not for anger, whereas disgust also elicited a larger LPP. The present evidence suggests that faces expressing fear and disgust were especially motivationally relevant compared with other expressions. Interestingly, it may be related to their higher salience and/or intensity as indicated by the effects observed at the level of the N170. Note that because we used an orthogonal task designed to avoid any influence from decisional and goal-directed mechanisms, modulation of the LPP may have been reduced for some emotions in the present study because participants were not explicitly motivated to process facial expressions.

Altogether, the above-mentioned results indicate that between 80 and 480 ms after face onset, emotional expressions elicit different ERP modulations associated with different mechanisms which allow an elaborate representation of the perceptual and emotional contents of expressive faces. We will now describe the results according to the main goal of the present study, namely determine which mechanism in the reading of facial expressions are sensitive to the olfactory context and its affective value.

4.2. Different phases of olfactory context effects on the processing of facial expression

Our results indicate a biphasic influence of the odor context on facial expression processing. The first phase concerned an early enhancement of EEG responses between 130 and 180 ms after face onset in the presence of odor contexts, regardless of the emotional content of the faces. This effect is consistent with previous studies and with our own hypotheses indicating at least one phase in odor–vision integration with an unspecific effect on facial expression processing (Forscher and Li, 2012; Rubin et al., 2012). Our main analyses have shown this effect only for the pleasant odor context in the VPP component. However, complementary analyses also revealed this effect for both odor contexts in several central, centro-parietal and temporal scalp locations in the same time-range, with differential topographies for the pleasant odor (T7, CP1, Cz, C4) and the aversive odor (M1, T7, C4, CP6), further confirmed by two PCAs.

Different hypotheses can be suggested regarding the nature of these odor-based modulations of facial processing. Olfactory and visual inputs activate common or interactive brain structures. The olfactory system has close connections with the emotional brain (e.g., amygdala, insula, and OFC; Carmichael et al., 1994; Gottfried, 2006; Rolls and Baylis, 1994). Smelling disgusting odorants and seeing disgust faces both activate the insula (Wicker et al., 2003). The amygdala (for a review, see Zald (2003)) and the OFC (e.g., Royet et al., 2000) are also activated by odor stimulations and emotional facial expressions. Thus, the odor context may pre-activate these brain structures and subsequently influence their responses when a face appears in the visual field, possibly boosting the processing of faces. Remember that the extraction of the affective content of visual objects occurs in this time-range (Barrett and Bar, 2009). Note that the separable topographies discriminating both odors likely indicate recruitment of distinct neural substrates, possibly because of the difference in affective valence between them and/or intrinsic differences in the nature of the odorants, as the chemical structure of an odorant often determine its affective value (e.g., Khan et al., 2007). In sum, according to our previous interpretation of VPP amplitudes, the response to alerting emotions may be enhanced by concurrently presented odors, with different topographies (and probably underlying neural activations) depending on the valence of the odors.

Alternatively, the odor context may provoke facial micro-reactions in the perceiver. Facial reactions to odors were already reported, notably with the odorants we used in the present study (Godard et al., in press; Soussignan et al., 1997; Soussignan and Schaal, 1996). Since automatic facial reactions were also reported when participants have to recognize facial expressions and influence the "reading" of the face (e.g., Aguado et al., 2013; Soussignan et al., 2013), the odor context may have acted as mimicking-like responses or priming effects and facilitate the recognition of facial expressions (see Lundqvist and Dimberg, 1995; Niedenthal, 2007; Hess and Fischer, 2013, for a review). Likewise, it may intervene through embodiment by simulating emotional reactions and allowing the matching between an individual's own emotional states and the states perceived by other individuals (Adolphs, 2002; Wicker et al., 2003). Both interpretations are not incompatible. Indeed, the neural structures involved in the embodiment of facial expressions partly overlap with emotional structures, as emotion is intrinsically an embodied mechanism. For instance, the insula is a visceral sensorimotor structure, explaining its involvement in both the feeling of disgust and the perception of disgust in others (Wicker et al., 2003). Likewise, the OFC is well-known for its presumable role in reactivating the affective value of any kind of object/context through somatic modulations or simulations further coded in cortical somatosensory areas (Damasio, 1998). As a matter of fact, somatosensory cortices are also of great importance in facial expression recognition (Adolphs, 2002; Pourtois et al., 2004b). Finally, despite some differences in theoretical considerations, both interpretations suggest that the odor context may mobilize emotional and sensorimotor areas to modify the responses to subsequent facial expressions. Future investigations must be designed to precisely determine whether the above-mentioned cerebral regions are involved in olfactory influences on

the visual processing of emotional faces within the time-window identified in the present study.

Following this first phase, we also observed that odors interacted with the content of expressions between 180 and 240 ms after face onset (P200) at a right occipital site (O2), but no more after 240 ms (N250). The main finding here is that the aversive odor context amplified the differences between the facial expressions primarily through an increase in the EEG differentiation between (i) neutrality and all expressions (except fear) and (ii) between disgust/happiness and other emotional expressions. Compared with the two other olfactory contexts, the aversive odor mainly induced increased negativities for faces expressing disgust and happiness and reduced negativities for neutral faces. Overall, whereas these results were significant only for the aversive odor context, they support our hypothesis of an interacting mechanism depending on the congruent/incongruent relations between odors and the perceived facial expressions. In any way, these results exclude interpretations suggesting that the mere presence of an odor suffices to provoke a global effect on facial processing regardless of its affective value.

Previous reports on odor–vision interactions during the processing of expressive faces have yielded inconsistent results. Some authors found that reaction times to recognize happiness depend on the congruency with the olfactory context, an effect they did not notice for disgust face, however (Leppänen and Hietanen, 2003). In contrast, others showed that disgust is processed faster and happiness more slowly in the presence of odor contexts, irrespective of their emotional valence (Seubert et al., 2010b). When considering ERPs, some studies evidenced early effects of odors on visual processing of facial expressions (e.g., at the level of P100 and N170 components; Adolph et al., 2013; Forscher and Li, 2012), while others found later effect (e.g., between 250 and 600 ms; Rubin et al., 2012). Moreover, a global effect of odors regardless of the emotional content of expressions was noticed sometimes before (e.g., Rubin et al., 2012) and sometimes after (e.g., Forscher and Li, 2012) an interaction between the affective values of both cues. These discrepancies may originate from several methodological differences, such as the nature of the task. For instance, contrary to the present study, Forscher and Li (2012) used a dot-probe task where attentional resources are explicitly solicited and found early interactive effects. Even earlier effects were observed by Steinberg et al. (2012) when a strong associative learning between odors and faces was previously engaged. Hence, future studies are needed to disentangle this issue and to determine whether the present findings may differ according to the depth of processing and/or goal-directed mechanisms by manipulating the task performed. Note that we precisely chose an orthogonal task to examine odor–vision interactions uncontaminated by these processes, in order to provide a frame for further studies. Another explanation for the discrepant results between the present and earlier studies may come from the nature of the odorants. It seems conceivable that body odors do not elicit the same neural responses than 'conventional', non-social odors, such as those of foods. Following this view, the specific effect observed here for the aversive odor may have arisen due to intrinsic differences between the odorants. However, this kind of effect would have been observed for every emotional expression. The specific results found only for some expressions suggest an interaction between the affective contents of both olfactory and visual cues.

The time-window of the interactive modulation of facial expression processing by the odor context, namely the P200 between 180 and 240 ms after face onset, corresponds to the first part of the EPN. Our findings on the main effect of facial expressions at this level suggested that it is the first processing stage of specific affective information. Accordingly, it is also the first stage where the influence of odors depends on the specific emotional content of facial expressions. EPN are classically interpreted as enhanced processing of affective information (e.g., Schupp et al., 2004). Hence, the fact that the aversive odor increased the EPN for disgust and happiness, and conversely reduced the EPN for neutrality, likely suggests that its emotional value elicits enhanced processing of affective information for disgust and happiness, but also reduced affective processing during the perception of neutral faces. In other words, the aversive odor context may be able to modulate the processing of all emotions related to its affective meaning, either congruent or incongruent. It may thus facilitate their processing by increasing their relevance through the perceived difference between them and neutrality, while leaving unaffected other emotions unrelated to the "aversive" emotional meaning.

Previous studies using ERPs did not find an influence of contextual information on facial expression processing at the same latency. Some of them found an earlier effect with enhanced amplitude of the N170 in response to fearful faces when a congruent visual scene was concomitantly displayed (Righart and de Gelder, 2006, 2008). Another one observed a later influence with congruency effects between the perceived expression and a previously presented sentence arising at the level of the LPP (Diéguez-Risco et al., 2013). However, the integration of face-voice emotional meanings was shown within the first 250 ms of processing by a MEG study (Hagan et al., 2009). This discrepancy between studies may be first explained by the nature of contextual information. Indeed, when a visual scene surrounds a face (Righart and de Gelder, 2006, 2008), both cues are visual and this unisensory contextual influence may be processed faster. In contrast, when an auditory or an olfactory context is presented, multisensory integration may be slower, depending on the activity of specific brain regions (see below). Moreover, even when contextual information is visual in nature, physical objects (Righart and de Gelder, 2006, 2008) vs. verbal information (Diéguez-Risco et al., 2013) may differentially influence the onset of the integration. Methodological factors might also explain these discrepant results. Indeed, in Diéguez-Risco and collaborators' study, the context is displayed before the expressive face. This sequential contextual "priming" may trigger different mechanisms such as expectations for example. However, because the olfactory context in the present study was presented along an entire block, it could have elicited expectations as well. Another explanation would be that the LPP is modulated by affective congruency only during an explicit task, as it is particularly sensitive to task-related motivation. As previously discussed, the orthogonal task in the present study may have reduced the sensitivity of the LPP to various effects. Nonetheless, future studies should further investigate the time-course of contextual integration in the visual processing of facial expressions and its variability depending on several factors.

At the neural level, the contextual effect we found may be mediated by feedback from "emotional" structures in multisensory or sensorimotor areas (Adolphs, 2002; Ashley et al., 2004; Sato et al., 2001) that may have been pre-activated during the early global modulation induced by the odors. Accordingly, both the insula (Chen et al., 2009) and the somatosensory cortices (Pourtois et al., 2004b) intervene approximately 200 ms after stimulus-onset during emotional face processing. Likewise, the OFC and the visual system start to interact around 215 ms after stimulus onset (Bar et al., 2006). Moreover, multisensory integration of affective prosody and emotional face occurs in the posterior STS with the same time-course (Hagan et al., 2009). Hence, the affective value computed by emotional structures may have been modulated by the odor input and may subsequently modulate the visual processing of expressions. However, we acknowledge that ERPs do not allow precise conclusions on brain regions involved and further studies are needed to solve this issue.

4.3. Conclusion

In conclusion, the results of the present study show that non-social odors (food odors) influence the brain responses during facial expression processing. A first effect started 130 ms after face-onset at several central, centro-parietal and temporal locations depending on the valence of the contextual odors and elicited enhanced activation regardless of the emotional content of expressions. Then, an interaction between odors and expression occurred around 200 ms with an occipital location, showing that the aversive odor context increased the differentiation between facial neutrality and emotional displays, especially of happiness and disgust. Collectively, these results suggest a global effect of olfaction on face processes around 160 ms, followed by an interaction between the aversive odor and congruent/incongruent facial expressions. This interaction may reflect enhanced affective processing and is presumably due to feedback from emotional or multisensory or somatosensory structures to the visual cortices. Because these results were evidenced without any explicit task toward the facial expressions and toward the presence of olfactory stimuli, future studies must be designed to investigate whether the time course of olfactory–visual interactions depend on the task performed. Nonetheless, the present study offers a promising frame to explore the functional properties of odor–vision integration over time.

Acknowledgments

This work was supported by the French Agence Nationale de la Recherche [ANR 11 EMCO 002 01, to J-Y.B. and A.L.]; the Région Bourgogne [PARI 2012, post-doctoral grant to O.G.]; the Ministère de la Recherche [PhD grant to N.D.]; and the Institut Universitaire de France [to J-Y.B.].

References

Adams, R.B., Gordon, H.L., Baird, A.A., Ambady, N., Kleck, R.E., 2003. Effects of gaze on amygdala sensitivity to anger and fear faces. Science 300, 1536.
Adolph, D., Meister, L., Pause, B.M., 2013. Context counts! social anxiety modulates the processing of fearful faces in the context of chemosensory anxiety signals. Front. Hum. Neurosci. 7, e283.
Adolphs, R., 2002. Neural systems for recognizing emotion. Curr. Opin. Neurobiol. 12, 169–177.
Aguado, L., Román, F.J., Rodríguez, S., Diéguez-Risco, T., Romero-Ferreiro, V., Fernández-Cahill, M., 2013. Learning of facial responses to faces associated with positive or negative emotional expressions. Span. J. Psychol. 16 (e24), 1–10.
Ashley, V., Vuilleumier, P., Swick, D., 2004. Time-course and specificity of event-related potentials to emotional expressions. NeuroReport 15, 211–215.
Aviezer, H., Hassin, R.R., Ryan, J., Grady, C., Susskind, J., Anderson, A., et al., 2008. Angry, disgusted, or afraid? Studies on the malleability of emotion perception. Psychol. Sci. 19, 724–732.
Bar, M., Kassam, K.S., Ghuman, A.S., Boshyan, J., Schmid, A.M., Dale, A.M., Hämäläinen, M.S., Marinkovic, K., Schacter, D.L., Rosen, B.R., Halgren, E., 2006. Top-down facilitation of visual recognition. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103, 449–454.
Barrett, L.F., Bar, M., 2009. See it with feeling: affective predictions during object perception. Philos. Trans. R. Soc. B 364, 1325–1334.
Barrett, L.F., Mesquita, B., Gendron, M., 2011. Context in emotion perception. Curr. Dir. Psychol. Sci. 20, 286–290.
Bentin, S., Allison, T., Perez, E., Puce, A., McCarthy, G., 1996. Electrophysiological studies of face perception in humans. J. Cogn. Neurosci. 8, 551–565.
Bijlstra, G., Holland, R.W., Dotsch, R., Hugenberg, K., Wigboldus, D.H.J., 2014. Stereotype associations and emotion recognition. Personal. Soc. Psychol. Bull. 40, 567–577. http://dx.doi.org/10.1177/0146167213520458.
Brosch, T., Sander, D., Pourtois, G., Scherer, K.R., 2008. Rapid spatial orienting toward positive emotional stimuli. Psychol. Sci. 19, 362–370.
Campanella, S., Quinet, P., Bruyer, R., Crommelinck, M., Guerit, J.M., 2002. Categorical perception of happiness and fear facial expressions: an ERP study. J. Cogn. Neurosci. 14, 210–227.
Carmichael, S.T., Clugnet, M.C., Price, J.L., 1994. Central olfactory connections in the macaque monkey. J. Comp. Neurol. 346, 403–434.
Chen, Y.-H., Dammers, J., Boers, F., Leiberg, S., Edgar, J.C., Roberts, T.P.L., Mathiak, K., 2009. The temporal dynamics of insula activity to disgust and happy facial expressions: a magnetoencephalography study. NeuroImage 47, 1921–1928.
Dalton, P., Mauté, C., Jaén, C., Wilson, T., 2013. Chemosignals of stress influence social judgments. PLoS One 8, e77144.
Damasio, A.R., 1998. Emotion in the perspective of an integrated nervous system. Brain Res. Rev. 26, 83–86.
de Gelder, B., Vroomen, J., 2000. Faces in context: modulation of expression processing by situational information. Soc. Neurosci. 8 (6), 601–620.
Demattè, M.L., Österbauer, R., Spence, C., 2007. Olfactory cues modulate facial attractiveness. Chem. Senses 32, 603–610.
Dennis, T.A., Chen, C.-C., 2007. Emotional face processing and attention performance in three domains: Neurophysiological mechanisms and moderating effects of trait anxiety. Int. J. Psychophysiol. 65, 10–19.
Diéguez-Risco, T., Aguado, L., Albert, J., Antonio Hinojosa, J., 2013. Faces in context: modulation of expression processing by situational information. Soc. Neurosci. 8 (6), 601–620.
Dolan, R.J., Morris, J.S., de Gelder, B., 2001. Crossmodal binding of fear in voice and face. PNAS 98, 10006–10010.
Dorthe, N.J., Blumenthal, T.D., Jason, D.R., Lantz, P.E., 1995. The use of next-of-kin in assessing handedness. Percept. Mot. Skills 81, 203–208.
Durand, K., Baudouin, J.-Y., Lewkowicz, D.J., Goubet, N., Schaal, B., 2013. Eye-catching odors: olfaction elicits sustained gazing to faces and eyes in 4-month-old infants. PLoS One 8, e70677.
Eger, E., Jedynak, A., Iwaki, T., Skrandies, W., 2003. Rapid extraction of emotional expression: evidence from evoked potential fields during brief presentation of face stimuli. Neuropsychologia 41, 808–817.
Eimer, M., Holmes, A., 2002. An ERP study on the time course of emotional face processing. Neuroreport 13, 427–431.
Forscher, E.C., Li, W., 2012. Hemispheric asymmetry and visuo-olfactory integration in perceiving subthreshold (micro) fearful expressions. J. Neurosci. 32, 2159–2165.
Foti, D., Hajcak, G., Dien, J., 2009. Differentiating neural responses to emotional pictures: evidence from temporal-spatial PCA. Psychophysiology 46, 521–530.
Gendron, M., Lindquist, K.A., Barsalou, L., Barrett, L.F., 2012. Emotion words shape emotions percepts. Emotion 12, 314–325.
George, N., Evans, J., Fiori, N., Davidoff, J., Renault, B., 1996. Brain events related to normal and moderately scrambled faces. Cogn. Brain Res. 4, 65–76.
George, N., Jemel, B., Fiori, N., Renault, B., 1997. Face and shape repetition effects in humans: a spatio-temporal ERP study. NeuroReport 8, 1417–1423.
Godard O., Baudouin J.-Y., Schaal B. and Durand K., Affective matching of odors and facial expressions in infants: shifting patterns between 3 and 7 months, Dev. Sci. http://dx.doi.org/10.1111/desc.12292, in press.
Gottfried, J.A., 2006. Smell: central nervous processing. Adv. Oto-Rhino-Laryngol. 63, 44–69.
Guthrie, D., Buchwald, J.S., 1991. Significance testing of difference potentials. Psychophysiology 28 (2), 240–244.
Hagan, C.C., Woods, W., Johnson, S., Calder, A.J., Green, G.G.R., Young, A.W., 2009. MEG demonstrates a supra-additive response to facial and vocal emotion in the right superior temporal sulcus. PNAS 106, 20010–20015.
Hassin, R.R., Aviezer, H., Bentin, S., 2013. Inherently ambiguous: facial expressions of emotions, in context. Emot. Rev. 5 (1), 60–65.
Hess, U., Fischer, A., 2013. Emotional mimicry as social regulation. Personal. Soc. Psychol. Rev. 17, 142–157.
Joyce, C.A., Schyns, P.G., Gosselin, F., Cottrell, G.W., Rossion, B., 2006. Early selection of diagnostic facial information in the human visual cortex. Vis. Res. 46, 800–813.
Joyce, C., Rossion, B., 2005. The face-sensitive N170 and VPP components manifest the same brain processes: The effect of reference electrode site. Clin. Neurophysiol. 116, 2613–2631.
Khan, R.M., Luk, C.-H., Flinker, A., Aggarwal, A., Lapid, H., Haddad, R., Sobel, N., 2007. Predicting odor pleasantness from odorant structure: pleasantness as a reflection of the physical world. J. Neurosci. 27 (37), 10015–10023.
Kolassa, I.-T., Miltner, W.H.R., 2006. Psychophysiological correlates of face processing in social phobia. Brain Res. 1118, 130–141.
Li, W., Moallem, I., Paller, K.A., Gottfried, J.A., 2007. Subliminal smells can guide social preferences. Psychol. Sci. 18, 1044–1049.
Li, W., Zinbarg, R.E., Boehm, S.G., Paller, K.A., 2008. Neural and behavioral evidence for affective priming from unconsciously perceived emotional facial expressions and the influence of trait anxiety. J. Cogn. Neurosci. 20, 95–107.
Leppänen, J.M., Hietanen, J.K., 2003. Affect and face perception: odors modulate the recognition advantage of happy faces. Emotion 3, 315–326.
Lundqvist, L.O., Dimberg, U., 1995. Facial expressions are contagious. J. Psychophysiol. 9, 203–211.
Lundstrom, J.N., Olsson, M.J., 2005. Subthreshold amounts of social odorant affect mood, but not behavior, in heterosexual women when tested by a male, but not a female, experimenter. Biol. Psychol. 70, 197–204.
Luo, W., Feng, W., He, W., Wang, N.-Y., Luo, Y.-J., 2010. Three stages of facial expression processing: ERP study with rapid serial presentation. Neuroimage 49, 1857–1867.
Meeren, H.K., van Heijnsbergen, C.C., de Gelder, B., 2005. Rapid perceptual integration of facial expression and emotional body language. PNAS 102, 16518–16523.
Mujica-Parodi, L.R., Strey, H.H., Frederick, B., Savoy, R., Cox, D., Botanov, Y., Tolkunov, D., Rubin, D., Weber, J., 2009. Chemosensory cues to conspecific emotional stress activate amygdala in humans. PLoS One 4, e6415.
Niedenthal, P.M., 2007. Embodying emotion. Science 316, 1002–1005.

Niedenthal, P.M., Brauer, M., Halberstadt, J.B., Innes-Ker, A., Ase, H., 2001. When did her smile drop? Facial mimicry and the influences of emotional state on the detection of change in emotional expression. Cogn. Emot. 15, 853–864.
Oberman, L.M., Winkielman, P., Ramachandran, V.S., 2007. Blocking facial mimicry can selectively impair recognition of emotional expressions. Soc. Neurosci. 2, 167–178.
Pause, B.M., Ohrt, A., Prehn, A., Ferstl, R., 2004. Positive emotional priming of facial affect perception in females is diminished by chemosensory anxiety signals. Chem. Senses 29, 797–805.
Pessoa, L., Adolphs, R., 2010. Emotion processing and the amygdala: from a 'low road' to 'many roads' of evaluating biological significance. Nat. Rev. Neurosci. 11, 773–783.
Pourtois, G., Dan, E.S., Grandjean, D., Sander, D., Vuilleumier, P., 2005b. Enhanced extrastriate visual response to bandpass spatial frequency filtered fearful faces: time course and topographic evoked-potentials mapping. Hum. Brain Mapp. 26, 65–79.
Pourtois, G., de Gelder, B., Bol, A., Crommelinck, M., 2005a. Perception of facial expressions and voices and of their combination in the human brain. Cortex 41, 49–59.
Pourtois, G., Grandjean, D., Sander, D., Vuilleumier, P., 2004a. Electrophysiological correlates of rapid spatial orienting towards fearful faces. Cereb. Cortex 14, 619–633.
Pourtois, G., Sander, D., Andres, M., Grandjean, D., Reveret, L., Olivier, E., Vuilleumier, P., 2004b. Dissociable roles of the human somatosensory and superior temporal cortices for processing social face signals. Eur. J. Neurosci. 20, 3507–3515.
Robinson, A.K., Mattingley, J.B., Reinhard, J., 2013. Odors enhance the salience of matching images during the attentional blink. Front. Integr. Neurosci. 7, 77.
Righart, R., de Gelder, B., 2006. Context influences early perceptual analysis of faces—an electrophysiological study. Cereb. Cortex 16, 1249–1257.
Righart, R., de Gelder, B., 2008. Rapid influence of emotional scenes on encoding of facial expressions: an ERP study. Soc. Cogn. Affect. Neurosci. 3, 270–278.
Rolls, E.T., Baylis, L.L., 1994. Gustatory, olfactory, and visual convergence within the primate orbitofrontal cortex. J. Neurosci. 14, 5437–5452.
Rossion, B., Jacques, C., 2011. The N170: understanding the time course of face perception in the human brain. In: Luck, S., Kappenman, E. (Eds.), The Oxford Handbook of ERP Components. Oxford University Press, Oxford, UK.
Royet, J.-P., Zald, D., Versace, R., Costes, N., Lavenne, F., Koenig, O., Gervais, R., 2000. Emotional responses to pleasant and unpleasant olfactory, visual, and auditory stimuli: a positron emission tomography study. J. Neurosci. 20 (20), 7752–7759.
Rubin, D., Botanov, Y., Hajcak, G., Mujica-Parodi, L.R., 2012. Second-hand stress: inhalation of stress sweat enhances neural response to neutral faces. Soc. Cogn. Affect. Neurosci. 7, 208–212.
Sander, D., Grandjean, D., Kaiser, S., Wehrle, T., Scherer, K.R., 2007. Interaction effects of perceived gaze direction and dynamic facial expression: evidence for appraisal theories of emotion. Eur. J. Cogn. Psychol. 19, 470–480.
Sato, W., Kochiyama, T., Yoshikawa, S., Matsumura, M., 2001. Emotional expression boosts early visual processing of the face: ERP recording and its decomposition by independent component analysis. Neuroreport 12, 709–714.
Schaal, B., Porter, R.H., 1991. Microsmatic humans revisited – the generation and perception of chemical signals. Adv. Study Behav. 20, 135–199.
Schacht, A., Sommer, W., 2009. Emotions in word and face processing: early and late cortical responses. Brain Cogn. 69, 538–550.
Schupp, H.T., Öhman, A., Junghöfer, M., Weike, A.I., Stockburger, J., Hamm, A.O., 2004. The facilitated processing of threatening faces: an ERP analysis. Emotion 4, 189–200.
Schyns, P.G., Petro, L.S., Smith, M.L., 2007. Dynamics of visual information integration in the brain for categorizing facial expressions. Curr. Biol. 17, 1580–1585.
Schyns, P.G., Petro, L.S., Smith, M.L., 2009. Transmission of facial expressions of emotion co-evolved with their efficient decoding in the brain: Behavioral and brain evidence. PLoS One 4 (5), e5625.
Seigneuric, A., Durand, K., Baudouin, J.-Y., Jian, T., Schaal, B., 2010. Crossmodal associations between vision and olfaction: evidence from eye movements. Perception 39, 1541–1554.
Semin, G.R., de Groot, J.H.B., 2013. The chemical bases of human sociality. Trends Cogn. Sci. 17, 427–429.
Seubert, J., Kellermann, T., Loughead, J., Boers, F., Brensinger, C., Schneider, F., Habel, U., 2010a. Processing of disgusted faces is facilitated by odor primes: a functional MRI study. NeuroImage 53, 746–756.
Seubert, J., Loughead, J., Kellermann, T., Boers, F., Brensinger, C.M., Habel, U., 2010b. Multisensory integration of emotionally valenced olfactory–visual information in patients with schizophrenia and healthy controls. J. Psychiatry Neurosci. 35, 185–194.
Smith, E., Weinberg, A., Moran, T., Hajcak, G., 2013. Electrocortical responses to NIMSTIM facial expressions of emotion. Int. J. Psychophysiol. 88, 17–25.
Soussignan, R., Chadwick, M., Philip., L., Conty., L., Dezecache., G., Grèzes, J., 2013. Self-relevance appraisal of gaze direction and dynamic facial expressions: effects on facial electromyographic and autonomic reactions. Emotion 13 (2), 330–337.
Soussignan, R., Schaal, B., 1996. Forms and social signal value of smiles associated with pleasant and unpleasant sensory experience. Ethology 102, 1020–1041.
Soussignan, R., Schaal, B., Marlier, L., Jiang, T., 1997. Facial and autonomic responses to biological and artificial olfactory stimuli in human neonates: re-examining early hedonic discrimination of odors. Physiol. Behav. 62, 745–758.
Sprengelmeyer, R., Jentzsch, I., 2006. Event related potentials and the perception of intensity in facial expressions. Neuropsychologia 44, 2899–2906.
Steinberg, C., Dobel, C., Schupp, H.T., Kissler, J., Elling, L., Pantev, C., Junghöfer, M., 2012. Rapid and highly resolving: affective evaluation of olfactorily conditioned faces. J. Cogn. Neurosci. 24, 17–27.
Tottenham, N., Tanaka, J.W., Leon, A.C., McCarry, T., Nurse, M., Hare, T.A., Nelson, C. A., 2009. The NimStim set of facial expressions: judgments from untrained research participants. Psychiatry Res. 168, 242–249.
Utama, N.P., Takemoto, A., Koike, Y., Nakamura, K., 2009. Phased processing of facial emotion: an ERP study. Neurosci. Res. 64, 30–40.
Vuilleumier, P., Armony, J.L., Driver, J., Dolan, R.J., 2001. Effects of attention and emotion on face processing in the human brain. Neuron 30, 829–841.
Vuilleumier, P., Richardson, M.P., Armony, J.L., Driver, J., Dolan, R.J., 2004. Distant influences of amygdala lesion on visual cortical activation during emotional face processing. Nat. Neurosci. 7, 1271–1278.
Walla, P., 2008. Olfaction and its dynamic influence on word and face processing: Cross-modal integration. Prog. Neurobiol. 84, 192–209.
Walla, P., Hufnagl, B., Lehrner, J., Mayer, D., Lindinger, G., Imhof, H., Deecke, L., Lang, W., 2003. Olfaction and face encoding in humans: a magnetoencephalographic (MEG) study. Cogn. Brain Res. 15, 105–115.
Walla, P., Mayer, D., Deecke, L., Lang, W., 2005. How chemical information processing interferes with face processing: a magnetoencephalographic (MEG) study. NeuroImage 24, 111–117.
Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J.P., Gallese, V., Rizzolatti, G., 2003. Both of us disgusted in my insula: The common neural basis of seeing and feeling disgust. Neuron 40, 655–664.
Wieser, M.J., Brosch, T., 2012. Faces in context: a review and systematization of contextual influences on affective face processing. Front. Psychol. 3, 471. http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00471.
Williams, L.M., Palmer, D., D., Liddell, B.J., Song, L., Gordon, E., 2006. The 'when' and 'where' of perceiving signals of threat versus non-threat. NeuroImage 31, 458–467.
Zald, D.H., 2003. The human amygdala and the emotional evaluation of sensory stimuli. Brain Res. Rev. 41, 88–123.
Zernecke, R., Haegler, K., Kleemann, A.M., Albrecht, J., Frank, T., Linn, J., Brückmann, H., Wiesmann, M., 2011. Effects of male anxiety chemosignals on the evaluation of happy facial expressions. J. Psychophysiol. 25, 116–123.
Zhou, W., Chen, D., 2009. Fear-related chemosignals modulate recognition of fear in ambiguous facial expressions. Psychol. Sci. 20, 177–183.
From perception and memory to environmental odours and neuroscience. In: Zucco, G.M., Herz, R., Schaal, B. (Eds.), Olfactory Cognition. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, NL.
Zucco, G.M., Schaal, B., Olsson, M.J., Croy, I., 2014. Applied olfactory cognition. Front. Psychol. 5, 873. http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00873.