



Université Catholique de Louvain
Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation



L'émergence, le développement et la plasticité du système de
reconnaissance des visages : la thèse holistique.

Adélaïde de Heering

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade
de docteur en Sciences Psychologiques
Promoteur : Professeur Bruno Rossion

Avril 2009

*A Bruno
pour ses discours passionnés et son soutien tout au long de ces années ;*

*A mes collègues du laboratoire
pour toutes les discussions que l'on a eues et qui m'ont tant appris.
Je pense tout particulièrement à Christine, Corentin, Dana et Thomas ;*

*Au professeur Scania de Schonen
pour m'avoir attirée dans ce champ de recherche ;*

*Aux professeurs Francesca Simion et Chiara Turati
pour m'avoir donné le goût de travailler avec les nouveau-nés ;*

*A Pierre Mahau
pour sa collaboration technique ;*

*A mes parents, ma famille et mes amis
pour m'avoir toujours encouragée et guidée dans mes choix.*

LISTE DES ABREVIATIONS

- ❖ BOLD Blood-oxygen-level dependent - dépendant du niveau d'oxygène sanguin
- ❖ CGL Corps genouillés latéraux
- ❖ Cpd Cycles per degree - Cycles par degré d'angle visuel
- ❖ CSF Contrast sensitivity function - Courbe de sensibilité aux contrastes
- ❖ EEG Electroencéphalogramme
- ❖ FFA Fusiform face area
- ❖ FIE Face inversion effect - Effet d'inversion des visages
- ❖ HD Hémisphère droit
- ❖ HG Hémisphère gauche
- ❖ HSF High-spatial frequencies - Hautes fréquences spatiales
- ❖ IOG Inferior occipital gyrus - Gyrus occipital inférieur
- ❖ IRM Imagerie par résonance magnétique
- ❖ IRMf Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
- ❖ LOC Lateral occipital complex - Complexe occipital latéral
- ❖ LSF Low-spatial frequencies - Basses fréquences spatiales
- ❖ MdT Mémoire de travail
- ❖ MGF Middle fusiform gyrus - Gyrus fusiforme moyen
- ❖ MLT Mémoire à long terme
- ❖ Mm Millimètre

- ❖ MT Middle temporal (area) - Aire temporale moyenne
- ❖ Ms(ec) Milliseconde
- ❖ Nc Negative component - composante négative
- ❖ OAE Other age effect - Effet d'âge des visages
- ❖ OFA Occipital face area
- ❖ ORE Other race effect - Effet de race des visages
- ❖ PPA Parahippocampal Place Area
- ❖ PSW Positive Slow Wave
- ❖ RGB Red, Green, Blue - Rouge, Vert, Bleu
- ❖ STS Superior temporal sulcus - Sillon temporal supérieur
- ❖ TEP Tomographie par émission de positrons
- ❖ TR(s) Temps de réaction
- ❖ V1, V2 Aires visuelles primaire, secondaire
- ❖ VEP Visual evoked potentials - Potentiels évoqués visuels
- ❖ Voie M Voie magnocellulaire
- ❖ Voie P Voie parvocellulaire
- ❖ VPP Vertex positive potential

LISTE DES FIGURES

CONTEXTE THEORIQUE

- ❖ Figure 1 : A. Exemple d'un nourrisson en phase d'habituation. On y voit que, progressivement, il se désintéresse du stimulus qui devient familier. B. Exemples de stimuli visuels présentés de part et d'autre d'un point de fixation. C. Phases d'habituation et de test lors d'un paradigme classique d'habituation visuelle.
- ❖ Figure 2 : Extraite de Orban de Xivry, Ramon, Lefèvre et Rossion (2008). Proportion de temps passée à fixer certains points dans une tâche de reconnaissance de visages d'enfants par un sujet sain (A) et un sujet prosopagnosique (B).
- ❖ Figure 3 : Extraite de Rossion et Jacques (2008). A. La technique des potentiels évoqués utilisée chez l'enfant. B. La N170, la P1 et la VPP sont des composantes qu'il est possible d'extraire et d'analyser autant chez l'enfant que chez l'adulte.
- ❖ Figure 4 : Extraite de Schiltz et Rossion (2006). Aires fonctionnelles qui répondent de manière spécifique aux visages dans IOG et MGF. Vues coronales, transversales et sagittales de MGF (ligne du dessus) et de IOG (ligne du dessous).
- ❖ Figure 5 : A. Modèle cognitif de Bruce et Young (1986). Modèles neurofonctionnels de l'organisation de la perception des visages de Haxby, Hoffman et Gobbini (2000 ; B) et de Rossion (2008 ; C).
- ❖ Figure 6 : A. Le prosencéphale (cerveau antérieur), le mésencéphale (cerveau médian) et le rhombencéphale (cerveau postérieur). B. Le prosencéphale composé du télencéphale et du diencéphale. C. Développement du télencéphale (1 : Insula ; 2 : Lobe temporal en développement ; 3 : Sillon latéral ; 4 : Sillon central ; 5 : Sillon pariéto-occipital ; A : Lobe frontal ; B : Lobe pariétal ; C : Lobe temporal ; D : Lobe occipital).
- ❖ Figure 7 : Extraite de Sowell et collaborateurs (2004). Evolution de l'épaisseur de la substance grise en millimètres chez des enfants de 5 à 11 ans. Celle-ci s'observe principalement au niveau des aires frontales et pariéto-occipitales (en bleu).
- ❖ Figure 8 : A. « Snellen charts » souvent utilisés pour évaluer l'acuité visuelle à l'âge adulte. B. Simulation de l'accroissement des capacités des nourrissons à percevoir les détails d'une scène visuelle. Il est important de noter à propos de cet exemple que la scène a été manipulée par rapport à sa visibilité et sa quantité de contraste.

- ❖ Figure 9 : A. Vue schématique de la voie ventrale (« What ? », en mauve) et de la voie dorsale (« Where ? », en vert). B. Vue détaillée des aires cérébrales impliquées dans l'organisation de ces voies visuelles.

- ❖ Figure 10 : A. Gratings ne révélant que les hautes (haut) et basses (bas) fréquences spatiales. B. Courbe de sensibilité au contraste (« CSF ») pour les adultes, les nourrissons d'un mois (Banks & Salapatek, 1978) et les nouveau-nés (Acerra, Burnod, & de Schonen, 2002).

- ❖ Figure 11 : Configurations schématiques qui ressemblent (« facelike stimulus », à gauche) ou pas (« non facelike stimulus », à droite) à un visage (voir Johnson & Morton, 1991). Le nouveau-né préfère regarder la configuration de gauche (en vert).

- ❖ Figure 12 : Préférence des nouveau-nés pour les lignes horizontales plutôt que verticales, que les lignes soient pleines (à gauche) ou composées d'éléments (à droite) (voir Farroni, Valenza, Simion, & Umiltà, 2000).

- ❖ Figure 13 : A. Effet d'asymétrie haut/bas (voir Simion, Valenza, Macchi Cassia, Turati & Umiltà, 2002). Préférence pour les patterns de la colonne de gauche, entourés de vert, qui disposent de davantage d'éléments dans la partie supérieure que dans la partie inférieure du champ. B. Effet de congruence (voir Macchi Cassia, Valenza, Pividori, & Simion, 2002 ; Macchi Cassia, Valenza, Simion, & Leo, 2008). Préférence pour le pattern du bas, entouré de vert, dont la relation spatiale entre les traits internes et le contour est congruente.

- ❖ Figure 14 : Extraite de Sugita (2008). 1. Bébé singe élevé sans contact avec des visages (A) ou dans un environnement de visages (B). Jouets (C) et fleurs (D) décorant les cages des singes. 2. Objets (A), visages de singes modifiés au niveau des traits (yeux et bouche) (B) ou des distances relatives entre ces traits (yeux et bouche) (C), visages humains modifiés au niveau des traits (yeux et bouche) (D) ou des distances relatives entre ces traits (yeux et bouche) (E).

- ❖ Figure 15 : Extraite de Grill-Spector, Golorai et Gabrieli (2008). Carey (1992 ; a) et Flin (1980 ; b) rapportent une augmentation des performances avec l'âge en reconnaissance de visages à l'endroit ainsi qu'une chute des performances à la puberté. Golorai et collaborateurs (2007) démontrent que les capacités de reconnaissance augmentent pour les visages (rouge) et les lieux (vert) mais pas pour les objets (bleu).

- ❖ Figure 16 : Visages de « Jane » extraits de Mondloch, Le Grand et Maurer (2002). Le visage original se retrouve au début de chaque ligne parmi ses « sœurs » différant du visage original par la distance relative entre les traits (A), la forme des traits (B) ou le contour externe (C).

- ❖ Figure 17 : Extraite de Taylor, Batty et Itier (2004). Latence (A) et amplitude (B) de la N170 (à gauche) et de la P1 (à droite) au cours du développement de l'enfant.

- ❖ Figure 18: Extraite de Golorai, Ghahremani, Whitfield-Gabrieli, Reiss, Eberhardt, Gabrieli et Grill-Spector (2007). Volume en millimètres cubes de la FFA (A), de LOC (B) et de la PPA (C) respectivement impliqués dans la reconnaissance des visages, des objets et des lieux chez des enfants (7-11 ans), des adolescents (12-16 ans) et des adultes. Il apparaît que la taille de la FFA et de la PPA augmente avec l'âge, contrairement à la taille de LOC. Ces résultats sont maintenus quand la quantité de signal BOLD est appariée entre les participants (« Matched »).

- ❖ Figure 19 : Evolution des représentations faciales au travers du développement.

CONTRIBUTION EMPIRIQUE

- ❖ Figure 20 : A. Données relatives aux contrastes et à la sensibilité aux contrastes des nouveau-nés aux stimuli LSF et HSF de l'Etude N°1. B. Illustration de la différence de contraste constatée entre les visages HSF et LSF.

- ❖ Figure 21 : Exemples de stimuli dans lesquels du bruit a été ajouté de manière à ce que le contenu fréquentiel soit différent d'un visage à l'autre et le contraste identique. De gauche à droite : Visages en basses fréquences spatiales (LSF) filtrés avec un cutoff à 0.5 cpd (Visage N°1) et à 1 cpd (Visage N°2) et visages en hautes fréquences spatiales (HSF) filtrés avec un cutoff à 0.5 cpd (Visage N°3) et à 1 cpd (Visage N°4). Ces manipulations ont été réalisées par Frédéric Gosselin.

- ❖ Figure 22 : Exemples de stimuli qui pourraient être utilisés avec des nouveau-nés pour tester la présence de traitement holistique à la naissance. Les adultes détectent généralement plus rapidement et plus efficacement les manipulations faciales telles qu'elles apparaissent dans les conditions 2 et 3 que dans les conditions 1 et 4. Elles impliquent, en effet, une distorsion plus importante du triangle imaginaire qui relie les 2 yeux à la bouche (voir à ce sujet Barton et al., 2003).

- ❖ Figure 23 : Acquisition des propriétés de conservation de l'aire des objets vers 7-9 ans. Dans le cas A, on demande à l'enfant si les carrés occupent le même espace dans les 2 configurations (ici : gauche et droite). L'enfant de moins de 7-9 ans répond que oui. On lui demande ensuite, pour les configurations proposées en B (gauche et droite), si les carrés occupent toujours le même espace. L'enfant de moins de 7-9 ans répond que non.

- ❖ Figure 24 : Amplitude de l'illusion de composite calculée au niveau des temps de réaction chez les novices et les experts. Les colonnes bleues représentent les performances en regard des visages adultes et les colonnes blanches en regard des visages d'enfants.

DISCUSSION GENERALE

- ❖ Figure 25 : Proposition personnelle de la manière dont se met en place la fonction de reconnaissance des visages au fil du temps, soit à l'intersection de processus spécifiques et généraux qui se développent selon des trajectoires temporelles singulières, en constante interaction avec des facteurs maturationnels et environnementaux.
- ❖ Figure 26 : Extraite de Gava, Valenza, Turati et de Schonon (2008). Quand les nouveau-nés sont habitués à des visages entiers, ils marquent une préférence pour la nouveauté lorsque les yeux sont présents (A) et une préférence pour le stimulus familier lorsqu'ils sont absents (B).
- ❖ Figure 27 : Visages extraits de l'étude de Schwarzer, Zauner et Jovanovic (2007). A. Visage habitué. B. De gauche à droite : Visages manipulés au niveau des yeux, de la bouche, des yeux et de la bouche.
- ❖ Figure 28 : Paradigme classique de la supériorité du tout sur les parties (Tanaka & Farah, 1993). Dans un premier temps, les participants sont entraînés à apprendre le visage de Larry. Ils sont ensuite testés sur la reconnaissance de traits (ex : le nez) isolés ou intégrés à l'ensemble du visage.
- ❖ Figure 29 : Illusion de composite des visages quand les parties de visages sont alignées l'une à l'autre (A) ou décalées l'une par rapport à l'autre (B). Les parties supérieures des visages à l'endroit peuvent apparaître, à tort, comme légèrement différentes les unes des autres à cause de l'influence du bas sur la perception du haut du visage.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CONTEXTE THEORIQUE	5
<u>Chapitre I</u> <u>Contexte de réalisation des études développementales</u>	7
1. Terminologie utilisée dans le champ	9
A. Les différents niveaux d'interaction avec l'environnement	9
B. Phylogénèse, ontogénèse et épigénèse	9
C. Inné et acquis	10
D. Plasticité et rigidité	10
E. Nouveau-nés, nourrissons et enfants	11
F. Emergence et développement d'une fonction cognitive	11
2. Le stimulus facial et le traitement qui lui est appliqué.....	12
3. Les méthodes d'étude du développement.....	14
A. Les paradigmes de préférence et d'habituation visuelle	14
B. La technique d'enregistrement des mouvements oculaires	17
C. Les études comportementales	18
D. La technique des potentiels évoqués	19
E. La tomographie par émission de positrons	21
F. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle	22
<u>Chapitre II</u> <u>Perspective anatomique : la maturation des systèmes</u>	25
1. Introduction.....	27
2. Du général au particulier.....	29
A. Le développement du cerveau	29
B. La plasticité cérébrale	32
C. Le système visuel	34
3. Conclusions.....	41

<u>Chapitre III Perspective fonctionnelle : le développement du système de reconnaissance des visages de la naissance à l'âge adulte</u>		43
1.	Introduction.....	45
2.	Décours temporel de la fonction de reconnaissance des visages.....	47
	A. Les nouveau-nés	47
	a) D'incroyables capacités	47
	b) La question de l'innéité et de la spécificité des représentations faciales	49
	c) Quand l'expérience précoce avec les visages fait défaut	54
	B. Les nourrissons	59
	a) Des capacités qui se renforcent	59
	b) La question du traitement holistique/configural des visages	60
	c) L'impact de l'expérience visuelle précoce	62
	C. Les petits et grands enfants	63
	a) Position du problème	63
	b) L'amélioration des performances avec l'âge	64
	c) Les effets de l'expérience visuelle	66
	d) L'apport des facteurs spécifiques dans l'évolution des performances	69
	e) L'apport des facteurs généraux dans l'évolution des performances	73
	f) Quelle position adopter ?	74
	g) La prosopagnosie congénitale/développementale	74
	h) L'autisme	75
	i) Les études en électrophysiologie	76
	j) Les études en neuroimagerie	79
3.	Conclusions.....	85

CONTRIBUTION EMPIRIQUE	89
<u>Chapitre I</u> <u>Introduction</u>	91
<u>Chapitre II</u> <u>Le système de reconnaissance des visages des nouveau-nés</u>	95
1. Introduction.....	97
2. Etude N°1.....	99
Newborns' face recognition is based on spatial frequencies below 0.5 cycles per degree. (2008). <i>Cognition</i> , 106, 444-454	
3. Critiques et perspectives.....	115
<u>Chapitre III</u> <u>Le système de reconnaissance des visages dans l'enfance</u>	123
1. Introduction.....	125
2. Etude N°2.....	127
Holistic face processing is mature at 4 years of age: Evidence from the composite face effect. (2007). <i>Journal of Experimental Child Psychology</i> , 96, 57-70.	
3. Critiques et perspectives.....	149
4. Etude N°3.....	153
The role of experience during childhood in shaping the other-race effect. (In press). <i>Developmental Science</i> .	
5. Critiques et perspectives.....	169
<u>Chapitre IV</u> <u>Le système de reconnaissance des visages à l'âge adulte</u>	173
1. Introduction.....	175
2. Etude N°4.....	177
Prolonged visual experience in adulthood modulates holistic face perception. (2008). PLOS One, 3(5), e2317.	
3. Critiques et perspectives.....	189

DISCUSSION GENERALE : LA THESE HOLISTIQUE	193
<u>Chapitre I</u> <u>Introduction</u>	195
<u>Chapitre II</u> <u>Les capacités de traitement holistique des nouveau-nés</u>	199
1. Les données de la période néonatale revisitées.....	201
2. L’apport des études en psychophysique.....	202
<u>Chapitre III</u> <u>Les capacités de traitement holistique des nourrissons</u>	205
<u>Chapitre IV</u> <u>Les capacités de traitement holistique des petits et grands enfants</u>	211
1. Renforcement du mécanisme de traitement holistique des visages.....	213
A. L’effet d’inversion	213
B. L’avantage du tout sur les parties	215
C. L’effet de composite	217
D. L’espace de visages	219
2. Développement progressif des capacités cognitives.....	222
3. Les perspectives maturationnelles et environnementales.....	226
CONCLUSION GENERALE	229
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	233

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'intérêt des scientifiques pour le système de reconnaissance des visages a probablement émergé au cours du siècle dernier (Darwin, 1872) et n'a fait que croître ces dernières années. Il est impressionnant de constater que le nombre de publications scientifiques qui se sont attachées à améliorer la compréhension de la façon dont fonctionne ce système a littéralement explosé ces dernières années. L'attrait pour ses origines et la manière dont il se met en place de la naissance à l'âge adulte a surtout pris de l'ampleur au moment de la découverte spectaculaire, faite au cours des années 1960, que les nouveau-nés préfèrent regarder des structures qui ressemblent à des visages plutôt que des structures qui n'y ressemblent pas (Goren, Sarty, & Wu, 1975).

Il est communément admis que les individus traitent les visages à deux niveaux distincts. Ils sont capables de les différencier des objets et par conséquent de les associer à la catégorie des visages. Ils sont aussi capables de reconnaître les visages au niveau individuel et par conséquent de les distinguer les uns des autres. Cette dernière étape de traitement, au centre de notre intérêt, nécessite le recours à un mécanisme global, le traitement holistique, impliqué dans l'extraction et la mise en mémoire d'attributs visuels comme l'identité, le genre, l'âge, la race et les émotions d'un visage. C'est la mise en correspondance de ces différentes informations visuelles qui donne lieu à la reconnaissance efficace d'un visage. Le traitement holistique est sûrement ancien sur le plan phylogénétique puisqu'on le retrouve chez d'autres espèces animales comme le singe dont les cellules répondent davantage à un visage présenté entièrement qu'à un visage dont un trait a été masqué ou à des traits isolés (Gross, Bruce, Desimone, Fleming, & Gattass, 1981). Comme nous le verrons, le traitement holistique suit également une trajectoire ontogénétique singulière en apparaissant très tôt au cours du développement de l'enfant et en évoluant encore probablement jusqu'à l'âge adulte.

Dans ce travail, nous utiliserons l'approche développementale comme un outil pour aborder des questions telles que le caractère inné des capacités à reconnaître les visages ainsi que l'importance de l'expérience visuelle précoce et tardive dans leur mise en place (CONTEXTE THEORIQUE). Plus précisément, nous orienterons notre propos autour d'études qui décrivent la trajectoire de la fonction de reconnaissance des visages, de la naissance à l'âge adulte (Chapitre III). Cette revue de la littérature sera précédée d'une section qui sera l'occasion pour nous d'aborder les questions des termes fréquemment utilisés dans le

INTRODUCTION GENERALE

champ et qui prêtent souvent à confusion, de définir ce qu'est un visage ainsi que les traitements qui peuvent lui être appliqués et d'aborder les méthodes classiques d'étude du développement (Chapitre I). Les capacités des nouveau-nés, des nourrissons, des petits et des grands enfants à reconnaître les visages seront également envisagées par rapport à la maturation des systèmes qui les sous-tendent (Chapitre II). Nous pensons en effet qu'il est important de relier, autant que possible, les fonctions cognitives à leur substrat neuronal. Viendront ensuite quatre études que nous avons menées sur le sujet (CONTRIBUTION EMPIRIQUE). Celles-ci seront introduites (Chapitre I) et présentées dans leur totalité en respectant les étapes naturelles du développement de l'enfant (les nouveau-nés, Chapitre II ; les enfants, Chapitre III ; les adultes, Chapitre IV). Elles seront également critiquées dans l'idée de proposer de nouvelles pistes de recherche. A travers la DISCUSSION GENERALE, nous mettrons en perspective nos résultats et ceux présentés dans la littérature dans le but d'insister sur l'importance du traitement holistique des visages aux différents âges de la vie. Nous envisagerons ce type de traitement comme la clé de voûte pour comprendre comment se développent les capacités à reconnaître les visages. Ainsi, après avoir introduit aussi clairement que possible notre conception de la manière dont se met en place la fonction de reconnaissance des visages au fil du temps (Chapitre I), nous évoquerons les capacités de traitement holistique des nouveau-nés (Chapitre II), des nourrissons (Chapitre III), des petits et des grands enfants (Chapitre IV). Nous terminerons ce travail par une brève conclusion (CONCLUSION GENERALE).

Selon nous, l'étude de l'émergence, du développement et de la plasticité du système de reconnaissance des visages permet non seulement de remonter aux origines des incroyables habiletés dont témoignent les adultes quand on observe leurs capacités à reconnaître les visages au niveau individuel, mais aussi de se focaliser sur la mise en place du premier canal de communication, pré-verbal, qui lie l'enfant aux personnes qui l'entourent. Les recherches menées sur le sujet sont donc particulières et ont des visées plus larges qu'une simple mise en lumière de la manière dont fonctionne le système à l'âge adulte. Comme nous allons le voir, elles s'inspirent des études menées auprès d'adultes mais les nourrissent également.

CONTEXTE THEORIQUE

CHAPITRE I

Contexte de réalisation des études développementales

1. Terminologie utilisée dans le champ

Les recherches en psychologie du développement cognitif, et plus précisément celles qui se sont intéressées à la reconnaissance des visages, font constamment référence à des concepts qui se recouvrent, s'opposent, et parfois s'entremêlent. C'est pour cette raison que nous avons choisi, dans un tout premier temps, de constituer un lexique de base qui nous permettra de préciser le sens que nous attribuons aux termes utilisés dans la suite du travail.

A. Les différents niveaux d'interaction avec l'environnement

La notion d'environnement recouvre aussi bien l'environnement de la molécule, de la cellule, du réseau de neurones, du cerveau que l'environnement cognitif et social de l'individu. A chaque niveau d'observation correspond un environnement avec lequel l'objet étudié est en interaction. La maturation du système nerveux obéit à des facteurs génétiques dont l'expression requiert des environnements. Les propriétés pertinentes de l'environnement peuvent être identiques pour tous les membres d'une espèce ou pour plusieurs espèces (ex : sensibilité à la gravité ou à la lumière) ou ne concerner que certaines espèces (ex : sensibilité aux couleurs) ou certains sous-groupes d'individus (ex : les langues). Par le passé, lorsqu'on voulait insister sur les facteurs endogènes des transformations du cerveau liés à la migration neuronale, à l'arborisation dendritique ou à la myélinisation, par exemple, on parlait de maturation cérébrale. A l'inverse, lorsqu'on voulait insister sur les facteurs exogènes des transformations du cerveau, on se référait davantage à la notion de développement. Au travers de leurs recherches, les développementalistes montrent à présent que ces deux notions sont intimement liées.

B. Phylogénèse, ontogénèse et épigénèse

La phylogénèse (du grec : *phulê*, la tribu, l'espèce ; *génnan*, engendrer) rend compte du processus d'évolution de l'espèce au travers de la sélection naturelle par opposition à l'ontogénèse (du grec : *on*, *ontos*, l'être ; *génnan*, engendrer) qui renvoie à l'évolution de l'individu par rapport à lui-même. L'ontogénèse comporte la notion d'épigénèse (du grec : *épi*, sur ; *génnan*, engendrer) qui s'oppose à l'idée de préformation. L'épigénèse implique que

l'être vivant se développe et se modifie à travers les interactions avec l'environnement et non point par la simple croissance d'un être déjà complet au stade embryonnaire. Cette notion s'est étendue à celle d'épigenèse cognitive qui désigne la manière dont se développent les capacités cognitives du cerveau.

Par extension, le génotype désigne l'ensemble des gènes d'un organisme d'une espèce et le phénotype, l'expression du génotype, soit l'expression des traits observables au niveau même de l'individu. En d'autres mots, les traits existent dans le génotype (~ phylogenèse) mais ne se révèlent qu'à travers le phénotype, grâce aux processus liés à l'épigenèse.

C. Inné et acquis

La polémique de ce qui est inné et acquis dans les capacités cognitives du cerveau recouvre le problème suivant. Il s'agit de déterminer ce qui, au cours du développement du cerveau (in utero et après la naissance), doit nécessairement avoir lieu ou être présent pour qu'une compétence X puisse se développer. Le problème n'est pas simple puisqu'il s'agit de décrire une cascade d'interactions entre facteurs génétiques (~ inné) et environnementaux (~ acquis), à tous les niveaux d'interaction et d'environnement.

D. Plasticité et rigidité

Dans la mesure où l'on ne peut décrire que les compétences et les comportements phénotypiques, on est parfois amené à croire qu'il n'existe qu'un seul phénotype pour telle compétence, tel comportement. Lorsque l'on découvre l'existence d'un phénotype différent, on conclut que le système nerveux est plastique (du grec : *plassein*, former) puisqu'il est capable de développer les mêmes capacités dans des environnements différents. La notion de plasticité ne s'oppose pas à celle de déterminant génétique dans la mesure où la plasticité du système nerveux est sous le contrôle de facteurs génétiques.

E. Nouveau-nés, nourrissons et enfants

Un nouveau-né est un enfant dont l'âge s'exprime en jours (de 0 à 28 jours). La période néonatale est suivie de la petite enfance pendant laquelle grandissent, de 28 jours à 2 ans, des nourrissons. La période de développement considérée comme l'enfance s'étale de 2 ans à la puberté. Après vient l'adolescence. On considère généralement que celle-ci commence à 13 ans et se termine à 21 ans, âge auquel l'adolescent devient adulte.

F. Emergence et développement d'une fonction cognitive

Une fonction cognitive est généralement caractérisée par un point d'émergence, à un moment donné du développement de l'individu. Son évolution, son développement, peut se faire de manière continue, linéaire, ou discontinue, par paliers par exemple. Dans le cas d'une discontinuité (courbe en « U »), il peut être difficile de trouver des preuves qui démontrent que le deuxième état de la compétence est issu du premier état, après interruption. Dans le cas de la pré-marche du nouveau-né, il était certes évident qu'elle ressemblait à la marche de l'enfant mais il a fallu plusieurs années pour démontrer que l'une et l'autre compétence étaient liées, bien que séparées par une rupture. Dans le cas des visages, l'émergence de l'aptitude à les reconnaître ainsi que son caractère « inné et/ou acquis » ont été abordées en étudiant les nouveau-nés. On considère, en effet, que le fait de tester des individus après quelques heures/jours de vie renvoie à l'essence de ce qui est inscrit phylogénétiquement. La question du décours développemental de la fonction de reconnaissance des visages et de ses sous-composantes trouve ses réponses dans l'étude de populations d'âges différents.

2. Le stimulus facial et le traitement qui lui est appliqué

Un stimulus facial est caractérisé par des variations de luminance dans 3 canaux de couleur (RGB) par rapport à un espace donné. Plus largement, il est défini par un ensemble d'informations visuelles de bas niveau (surface, forme, contraste, contenu fréquentiel) qui lui sont propres et qui en font un stimulus tridimensionnel à la fois complexe et unique. Ces variations caractérisent tout autant les traits faciaux du visage et les relations qu'ils entretiennent que les éléments saillants du visage comme le contour du visage ou les cheveux.

Ces variations de luminance obéissent à une organisation sans laquelle le stimulus facial n'existe pas. Les traits sont en effet organisés de manière symétrique autour d'un axe vertical, avec une paire d'yeux au-dessus d'un nez et d'une bouche. Ce type d'organisation a été qualifié par Carey et collaborateurs (1977 ; 1980) de relations de premier ordre, qu'ils ont opposées aux relations de second ordre. Ces dernières étaient alors comprises comme les distances relatives, les distances métriques qui séparent les traits faciaux (ex : distance entre les 2 yeux ou entre le nez et la bouche). Entre temps, ces informations physiques, mesurables et manipulables, ont souvent été associées par certains auteurs à l'information configurale des visages jugée comme l'une des clés pour reconnaître un visage à l'âge adulte (voir par exemple, Maurer, Le Grand, & Mondloch, 2002). Toujours au niveau du stimulus, il est évident que les informations locales d'un visage lui garantissent aussi son unicité, que ces informations se rapportent aux traits internes (ex : yeux, nez, bouche), aux traits externes (sourcils, oreilles, cheveux) du visage ou à des unités plus locales encore, de l'ordre du pixel, elles-mêmes caractérisées par une forme, une couleur, une luminance et un contraste. Plus largement, les visages peuvent aussi être différenciés les uns des autres sur base de leur genre, leur âge, leur expression émotionnelle et leur race. L'ensemble de ces attributs interagit avec l'observateur comme l'indique l'existence d'effets perceptifs, sur lesquels nous reviendrons, comme l'effet de race (voir par exemple, Meissner & Brigham, 2001) et l'effet d'âge des visages (voir par exemple, Anastasi & Rhodes, 2005).

Ainsi, l'observateur joue un rôle crucial dans la dynamique de reconnaissance des visages puisqu'il est capable d'appliquer différents types de traitement au stimulus facial pour le reconnaître, qu'il sollicite en fonction des situations rencontrées (voir aussi Sergent, 1984).

Ces processus ne sont pas mutuellement exclusifs, peuvent être activés simultanément et n'impliquent pas la même vitesse de traitement (Sergent, 1986).

Dans le cadre de ce travail, nous centrerons principalement nos propos sur le traitement holistique/configural des visages qui permet à l'observateur de les appréhender dans leur ensemble. Il est intéressant de constater que, dans la littérature relative à la reconnaissance des visages chez l'adulte, les termes « configural » et « holistique » ont aussi bien été utilisés de manière interchangeable (voir par exemple, Ramon, Busigny, & Rossion, en préparation ; Young, Hellowell, & Hay, 1987) que distincte (voir par exemple Carey, 1992 ; Maurer et al., 2002 ; Rhodes, 1988). Ainsi, alors que Maurer et collaborateurs (2002) envisagent le traitement configural comme englobant la sensibilité aux informations de premier ordre, le traitement holistique et la sensibilité aux relations de second ordre des visages, Ramon et collaborateurs (en préparation) suggèrent que les termes « configural » et « holistique » sont, à l'inverse, intimement liés. Pour simplifier, nous avons choisi ici d'utiliser ces deux termes comme des synonymes car ils renvoient tous deux à la forte interdépendance qui existe entre les traits d'un visage. Ce parti pris nous permettra d'évoquer tant les études qui font référence au traitement configural compris comme un processus (voir par exemple Sergent, 1984 ; Young et al., 1987) ou une information relative au stimulus (voir par exemple Rhodes, 1988) que les études qui font référence au traitement holistique des visages (voir par exemple Tanaka & Farah, 1993). Selon nous, le traitement holistique des visages est directement lié à l'observateur et peut être défini comme le processus qui permet l'intégration simultanée des multiples traits du visage en une représentation perceptive unique (voir Rossion, 2008). Il est indispensable à la reconnaissance d'un visage et lui est automatiquement appliqué afin d'associer de manière rapide et efficace les informations visuelles de bas (couleur, texture, ...) et de plus haut (traits internes et externes ainsi que leurs distances relatives) niveau qui le composent. Comme nous le verrons, l'existence du traitement holistique des visages a principalement été mis en évidence au travers de paradigmes comme l'avantage du tout sur les parties (« Whole Part Advantage » ; Tanaka & Farah, 1993), l'effet de composite (« Composite Face Effect » ; Young et al., 1987) et l'effet d'inversion des visages (« Face Inversion Effect » ; Yin, 1969).

3. Les méthodes d'étude du développement

Depuis 40 ans, le nombre de techniques dont dispose le psychologue pour tester les enfants dès leurs premiers jours de vie explose. Tous ne sont pourtant pas logés à la même enseigne. Les plus jeunes enfants (ex : les nourrissons) sont, par exemple, plus difficiles à tester que les enfants plus âgés pour plusieurs raisons. La première est l'alternance extrêmement rapide et variable de leurs périodes de veille active et de sommeil profond. La seconde difficulté réside dans le fait qu'ils ne disposent encore que d'un répertoire comportemental réduit. Ils ne peuvent ni suivre des instructions, ni donner de réponses verbales ou motrices précises. Seules leurs réponses spontanées peuvent être enregistrées, d'où l'intérêt de paradigmes tels que la préférence visuelle et de techniques comme les potentiels évoqués basés sur le recueil des réponses électriques émises automatiquement par le cerveau. Nous mentionnerons aussi ici d'autres outils d'investigation comme l'enregistrement des mouvements oculaires, les techniques comportementales, la tomographie par émission de positrons et les techniques d'imagerie cérébrale.

A. Les paradigmes de préférence et d'habituation visuelle

Les paradigmes de préférence et d'habituation visuelle ont été élaborés afin d'évaluer les comportements spontanés, visuels et auditifs, des nouveau-nés et des nourrissons. Grâce à eux, ceux-ci ne sont plus considérés comme des individus passifs et immatures du point de vue sensoriel mais plutôt comme des organismes dotés de compétences perceptives fonctionnelles sophistiquées. De manière tout à fait générale, ces techniques permettent d'observer vers quel stimulus visuel se porte l'attention des tous jeunes participants quand 2 stimuli visuels sont présentés côte à côte et de manière suffisamment contrôlée pour en tirer des conclusions valables (Simion & Valenza, 1990). Plus particulièrement, le paradigme de préférence visuelle consiste à présenter de manière simultanée 2 stimuli, l'un à gauche et l'autre à droite d'un point central de fixation. L'analyse porte d'une part sur le nombre d'orientations visibles que le sujet initie vers chacun des stimuli, d'autre part sur la durée de chacune de ces fixations. Ce paradigme est fondé sur l'hypothèse que si le nouveau-né ou le nourrisson fixe plus longtemps un stimulus qu'un autre, c'est qu'il a codé l'information contenue dans ces stimuli, qu'il les a discriminés et qu'il en a spontanément préféré un. Il

paraît cependant important d'insister sur 2 points. Premièrement, pour que l'on puisse effectivement parler d'une préférence visuelle, il faut que le sujet ait regardé au moins une fois chacun des stimuli. Ensuite, les préférences visuelles ne sont pas forcément le témoignage direct d'un phénomène inné. En effet, si la préférence précoce des nouveau-nés pour les visages humains peut être interprétée comme telle, ce n'est pas le cas de la préférence pour le visage de la mère plutôt que pour celui d'une étrangère qui, elle, serait plutôt interprétée comme la conséquence d'un apprentissage perceptif extrêmement rapide au contact du visage de la mère (Pascalis, de Schonen, Morton, Deruelle, & Fabre-Grenet, 1995).

Le paradigme d'habituation (quand le temps d'apprentissage est variable) ou de familiarisation visuelle (quand le temps d'apprentissage est fixé par l'expérimentateur) consiste à mesurer la diminution du temps de fixation suite à la présentation répétée d'un même stimulus (voir Figure 1C). Ce paradigme nécessite 2 phases : la phase initiale d'habituation ou de familiarisation dans laquelle le même stimulus (A) est présenté plusieurs fois à l'enfant, puis la phase de test dans laquelle le stimulus familier (A) est présenté en même temps qu'un stimulus nouveau (B) différant du stimulus familier (A) par une ou plusieurs caractéristiques (voir Figure 1B). En pratique, le nouveau-né est placé face à un écran. Dès qu'il en fixe le centre, la phase d'habituation est lancée. L'observateur appuie alors sur un bouton poussoir aussi longtemps qu'il juge que le nouveau-né fixe le stimulus (présenté sur l'écran de gauche et de droite dans le cas de la Figure 1B). Dès qu'il ne le regarde plus pendant 2 secondes, l'expérimentateur fait disparaître le stimulus de l'écran. Le temps total de fixation est automatiquement calculé sur chaque ensemble de 3 fixations consécutives. Le critère d'habituation est atteint quand la somme de la durée des 3 dernières fixations est inférieure à la moitié (50%) de la somme des 3 dernières fixations. Ensuite vient la phase de test composée de 2 essais. Lors du premier, le nouveau-né est confronté au stimulus familier (à gauche) positionné à côté du stimulus nouveau (à droite), de part et d'autre du point central de fixation. Le côté de présentation (gauche/droite) du stimulus familier est contrebalancé pour le deuxième essai. L'observateur enregistre au moyen de 2 boutons poussoirs le temps que le nouveau-né passe à fixer l'un et l'autre stimulus. L'essai se termine quand le temps total de fixation des 2 stimuli atteint 20 secondes. La procédure d'habituation visuelle est basée sur la tendance spontanée des nouveau-nés et des nourrissons à préférer la nouveauté immédiatement après une période de familiarisation. Le nouveau-né

fixe pour une période plus longue un stimulus qui contient une propriété nouvelle par rapport à un stimulus avec lequel il vient d'être familiarisé (voir Figure 1A). Il faut distinguer de ce cas le fait que le nouveau-né s'oriente spontanément vers le stimulus le plus familier lorsque aucune habituation/familiarisation spécifique n'a été réalisée auparavant (voir *supra*). Il regarde ainsi plus longtemps le visage de sa mère que celui d'une étrangère mais si on le lui présente pendant quelques minutes avant la phase de test, selon le paradigme classique d'habituation, on observe une préférence classique pour le visage nouveau (Field, Cohen, Garcia, & Greenberg, 1984). Il arrive parfois que le nouveau-né préfère le stimulus familier mais qu'une préférence pour le stimulus nouveau apparaisse à mesure que la représentation du stimulus familier se renforce (Fantz, 1964 ; Hunter, Ames, & Koopman, 1983 ; Roder, Bushnell, & Sasseville, 2000 ; Rose, Gottfried, Melloy-Carminar, & Bridger, 1982 ; Sirios & Mareschal, 2002 ; 2004). Ce phénomène survient, par exemple, quand le stimulus familier proposé en phase d'habituation n'est pas tout à fait identique à celui de la phase de test parce qu'il a subi une rotation ou a changé de taille (Walton, Amstrong, & Bower, 1997 ; Walton, Bower, & Bower, 1992). Le nouveau-né présente alors des difficultés à reconnaître le stimulus modifié et marque une préférence pour le stimulus familier qu'il cherche encore à examiner.

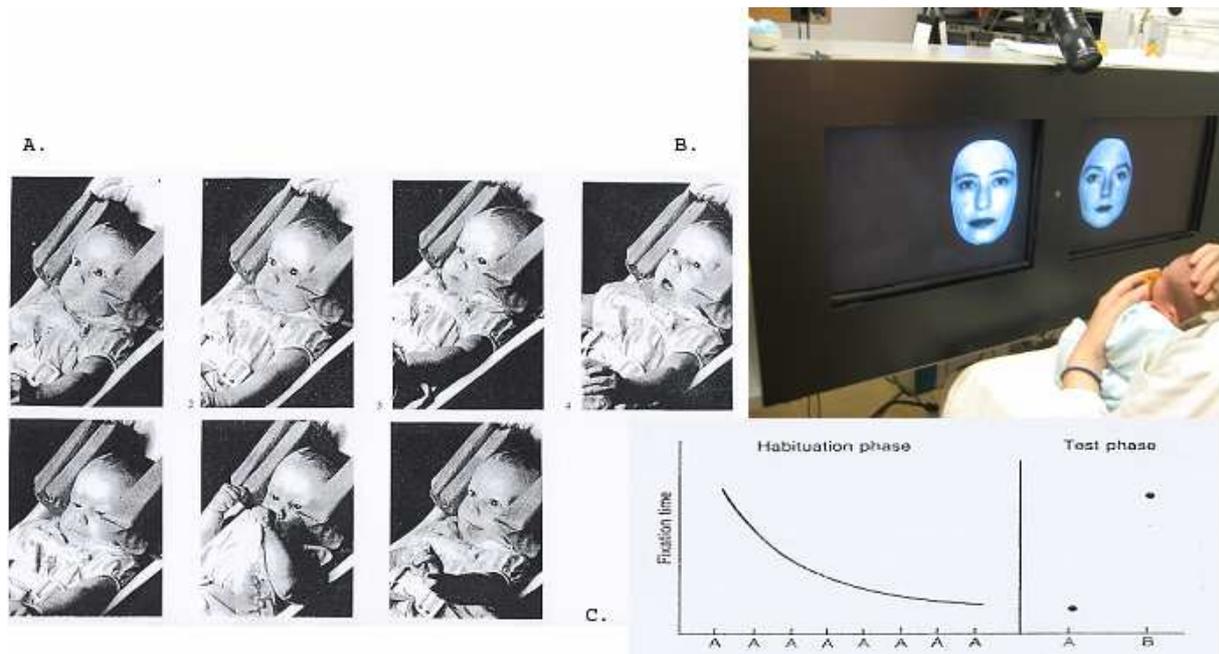


Figure 1 : A. Exemple d'un nourrisson en phase d'habituation. On y voit que, progressivement, il se désintéresse du stimulus qui devient familier. B. Exemples de stimuli visuels présentés de part et d'autre d'un point de fixation. C. Phases d'habituation et de test lors d'un paradigme classique d'habituation visuelle.

B. La technique d'enregistrement des mouvements oculaires

La technique d'enregistrement des mouvements oculaires, que l'on appelle aussi « Eye-Tracking », a été développée pour enregistrer de façon automatique les mouvements des yeux des participants. Puisqu'elle permet de mesurer des comportements spontanés, elle convient particulièrement bien aux nouveau-nés et aux nourrissons. D'un point de vue plus technique, ce type d'enregistrement nécessite une phase préalable de calibration pendant laquelle des infrarouges sont projetés vers le centre de la pupille du participant, ce qui permet à l'expérimentateur de déterminer l'espace de l'image qu'il est précisément en train de fixer. Une phase de test suit la phase de calibration. Elle permet de déterminer avec précision les coordonnées $x-y$ qui correspondent aux points de fixation des participants sur le stimulus ainsi que l'ordre dans lequel ces fixations ont eu lieu (voir exemples, Figure 2).

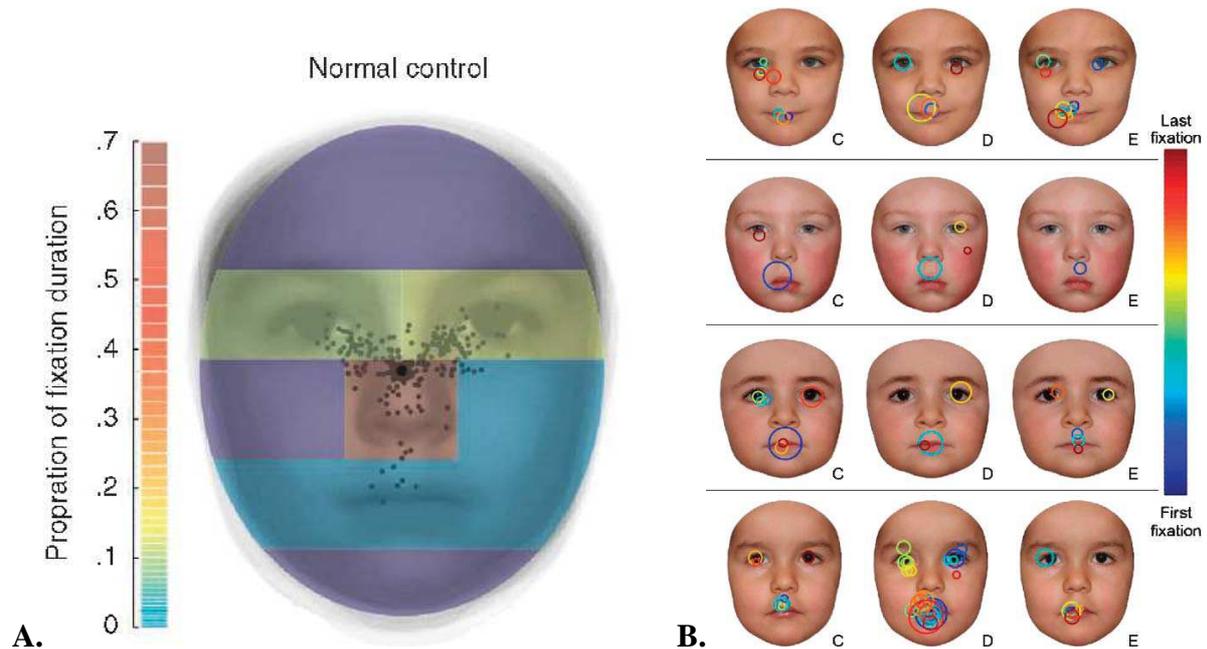


Figure 2 : Extraite de Orban de Xivry, Ramon, Lefèvre et Rossion (2008). Proportion de temps passée à fixer certains points dans une tâche de reconnaissance de visages d'enfants par un sujet sain (A) et un sujet prosopagnosique (B).

C. Les études comportementales

L'intérêt des études comportementales réside dans le fait qu'elles permettent d'évaluer avec précision les comportements moteurs et verbaux des enfants, au moyen de leurs temps de réaction (ms) et de la précision de leurs réponses (% de réponses correctes). Par extension, elles permettent également des inférences sur l'organisation de leurs processus mentaux (~chronométrie mentale). Les études comportementales ne sont pas invasives, ne demandent pas beaucoup de ressources financières et sont donc souvent utilisées pour évaluer les comportements aux différents âges de la vie. Pourtant leur mise en place et l'analyse des résultats qui en ressortent nécessitent beaucoup de précautions. Ainsi, il apparaît que le design de l'expérience est crucial pour tester les enfants de manière optimale. La tâche doit être courte mais suffisamment longue pour assurer une certaine puissance statistique. Nous avons remarqué qu'elle ne devait pas dépasser 15 minutes pour les enfants de 4-5 ans. Elle ne doit mener ni à des effets planchers ni à des effets plafonds (voir à ce sujet Want, Pascalis, Coleman, & Blades, 2003). Plus l'échantillon inclut des tranches d'âges différentes, plus l'objectif est difficile à atteindre puisqu'il faut trouver une tâche accessible aux tout-petits qui

ne soit pas trop facile pour les plus grands. Enfin, la tâche doit être suffisamment attrayante pour initier et maintenir la motivation de chacun. Outre le design, le choix de l'interface de réponse est également primordial, que l'on choisisse de recourir à des boîtiers de réponse ou à un écran tactile (« sensitive screen »). En ce qui concerne l'analyse des résultats, il est frappant de constater que l'âge des enfants est souvent calculé en années. Leurs résultats sont ensuite rapportés à l'intérieur d'un groupe d'âge (ex : les enfants de 7 ans) et comparés à d'autres groupes d'âge (ex : les enfants de 8 et 9 ans). Cependant on précise rarement de quelle manière les groupes d'âge ont été constitués. Il est donc difficile de savoir si les résultats d'un enfant de 7 ans et 9 mois ont été moyennés à ceux des enfants de 7 ou de 8 ans. Pour éviter ce problème, nous proposons de considérer l'âge des enfants en mois plutôt qu'en années, ce qui permet de supprimer toute équivocité quant à l'assignation d'un enfant dans un groupe d'âge donné et de ne pas oublier que le développement est un processus continu. Il est également important de fixer a priori le(s) critère(s) qui déterminent la prise en compte des résultats d'un enfant dans l'échantillon global. Or ce critère de sélection ne fait pas l'objet d'un consensus. Alors que certains auteurs interprètent les résultats de l'ensemble des sujets testés (ex : McKone & Boyer, 2006), d'autres choisissent un critère beaucoup plus restrictif et ne considèrent que les résultats des enfants dont le score global est supérieur au niveau du hasard (fixé par exemple à 50%, voir Etude N°2). Enfin, et toujours à propos des résultats, il faut garder en tête que ceux des jeunes participants sont souvent moins homogènes que les résultats des enfants plus âgés. A moins de définir des critères de sélection très stricts, ce phénomène se marque, plus les participants sont jeunes, par une grande variabilité des données (voir *barres d'erreurs*, Figure 4, Etude N°2) qui tendent à s'homogénéiser avec le temps. Le phénomène est surtout manifeste au niveau des temps de réaction, ce qui amenuise les chances d'observer des effets comportementaux à ce niveau dans les études développementales.

D. La technique des potentiels évoqués

Cette technique est largement utilisée dans le domaine de la psychologie et des neurosciences. Elle s'applique aussi bien aux nourrissons et aux enfants qu'aux personnes adultes. En effet, elle (1) est non invasive, (2) fait référence à des variables dépendantes (ex : latence et amplitude d'une composante) qui peuvent être étudiées tout au long du

développement, (3) donne la possibilité d'isoler les réponses électriques des autres réponses de l'enfant, ce qui permet d'éviter d'attribuer une différence à un processus visuel alors qu'elle reflète en fait une réponse motrice ou linguistique. Les potentiels évoqués (« Event Related Potentials ») dérivent de l'électroencéphalogramme (EEG). Ils sont recueillis grâce à une série d'électrodes placées à la surface du scalp (voir Figure 3A) mais doivent ensuite être amplifiés et filtrés (Luck, 2005).

De manière très générale (voir Figure 3B), les recherches menées sur les adultes indiquent que la présence d'un visage induit une déflexion négative de l'électroencéphalogramme environ 170 millisecondes [150-200 ms] après l'apparition du stimulus. Cette composante, appelée la « N170 », s'observe principalement au niveau des régions occipito-temporales du scalp et est souvent plus ample au niveau de l'hémisphère droit que de l'hémisphère gauche (Bentin, Allison, Puce, Perez, & McCarthy, 1996). La présence d'une N170 est souvent utilisée comme un argument en faveur de la spécificité du processus de reconnaissance des visages car elle est plus ample pour les visages que pour d'autres objets comme des maisons, des mains ou des mots (Bentin et al., 1996; Botzel, Schulze, & Stodieck, 1995 ; Rossion et al., 2000). La VPP (« Vertex Positive Potential », voir Figure 3B) est la contrepartie positive du dipôle qui génère la N170 (Jeffreys, 1989 ; 1996 ; Joyce & Rossion, 2005). Tout comme cette dernière, elle est marquée par une réponse plus importante en présence de visages que d'objets (Jeffreys, 1989 ; 1996). La P1 (ou P100) est une autre composante souvent rapportée dans les études impliquant des visages (voir Figure 3B). Il s'agit d'une composante précoce marquée par une positivité aux alentours de 100 millisecondes après l'apparition du stimulus. La P1 est sensible à de nombreuses propriétés de bas niveau des stimuli visuels. Les aires visuelles striées et extrastriées en seraient l'origine (voir par exemple, Clark, Fan, & Hillyard, 1995 ; Di Russo, Martinez, Sereno, Pitzalis, & Hillyard, 2002).

Ce n'est que depuis une dizaine d'années que la technique des potentiels évoqués est utilisée avec les nourrissons (de Haan & Nelson, 1997 ; 1999) et les enfants (Taylor, McCarthy, Saliba, & Degiovanni, 1999). Elle leur convient particulièrement bien car elle est, comme nous l'avons déjà mentionné, non invasive et beaucoup moins sensible que les techniques comportementales aux biais tels que les persévérations motrices ou verbales

puisque seules les réponses électriques émises à la surface du scalp sont prises en compte. Globalement, les études développementales menées avec cette technique ont pour but de déterminer quels sont les composants présents dans l'enfance et la petite enfance et s'ils présentent les mêmes caractéristiques fonctionnelles qu'à l'âge adulte.

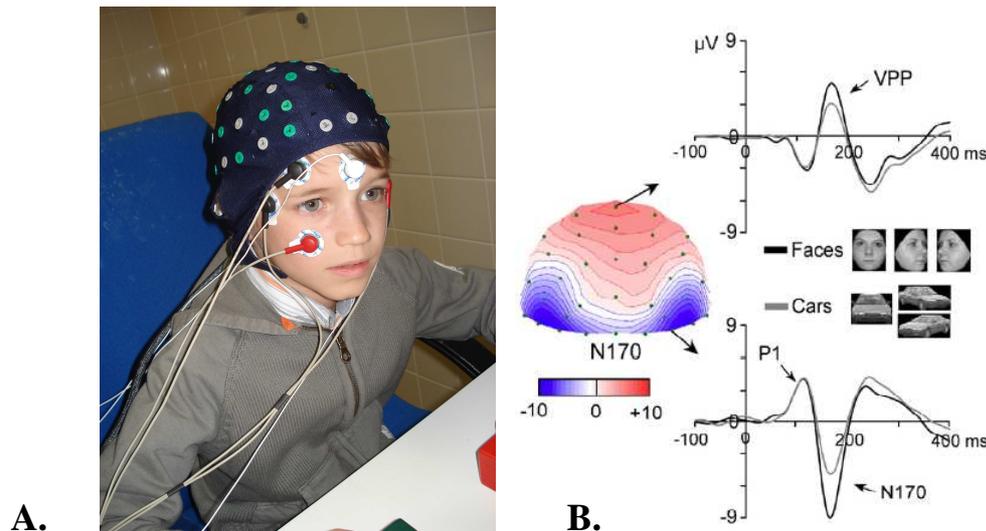


Figure 3 : A. La technique des potentiels évoqués utilisée chez l'enfant. B. Extraite de Rossion et Jacques (2008). La N170, la P1 et la VPP sont des composantes qu'il est possible d'extraire et d'analyser autant chez l'enfant que chez l'adulte.

E. La tomographie par émission de positrons

La tomographie par émission de positrons (TEP) mesure les changements métaboliques de glucose et d'oxygène qui ont lieu lors d'une activité cognitive. Ceux-ci sont repérables grâce à l'injection préalable d'une substance radioactive. Dans une série d'études, Chugani et Phelps (1986), Chugani, Phelps et Mazziotta (1987) et Chugani (1994) ont utilisé cette technique aussi bien avec des nourrissons que des enfants afin d'élargir leurs connaissances sur la manière dont se développent le métabolisme cérébral et les synapses. Ils ont notamment mis en évidence une hétérochronie au niveau de la maturation métabolique des différentes zones du cerveau. La première étude d'imagerie fonctionnelle en TEP relative au développement de la faculté à reconnaître les visages (Tzourio-Mazoyer, de Schonen, Crivello, Reutter, Aujard, & Mazoyer, 2002) a également montré qu'une maturation métabolique limitée n'est pas incompatible avec le fonctionnement de certains réseaux.

Contrairement à la résonance magnétique fonctionnelle (voir *infra*), cette technique présente plusieurs difficultés. Tout d'abord, elle implique que l'on injecte un produit radioactif au participant, ce qui n'est pas autorisé à l'heure actuelle avec de jeunes enfants en bonne santé. Ensuite sa résolution spatiale est de l'ordre du centimètre cube, ce qui est bien moins précis que ce que propose la IRMf (voir *infra*). Enfin, sa résolution temporelle n'est que de l'ordre de la minute, ce qui donne peu d'informations sur le moment auquel l'activité prend place.

F. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf, « imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ») est la méthode la plus souvent utilisée pour mettre en images l'activité fonctionnelle du cerveau. A défaut de bénéficier d'une résolution temporelle analogue à celle des potentiels évoqués, l'IRMf permet de récolter des images de grande résolution spatiale, de l'ordre du millimètre (Logothetis, 2008). Outre le fait qu'elle permet de recueillir des informations structurales précises sur le cerveau (IRM), cette technique permet de localiser les zones cérébrales activées, sur base de l'effet BOLD (Blood Oxygen Level Dependant) lié à l'aimantation de l'hémoglobine contenue dans les globules rouges du sang. Dans le cadre des expériences IRMf, l'expérimentateur cherche à comparer les patterns d'activation d'un sujet au repos, en situation contrôle, et quand il réalise une tâche. Cette technique convient bien aux enfants car elle est non invasive et ne demande pas que le sujet soit exposé à des radiations, comme c'est le cas avec la TEP (voir *supra*). Elle n'est utilisée que depuis peu avec des enfants de moins de 5 ans pour des raisons éthiques et/ou pratiques. Il est notamment difficile, pour un tout jeune enfant, de rester calme pendant une longue période et de supporter un niveau de bruit conséquent (90 dB) dans un environnement confiné. Dans des études relatives à la perception du langage, Dehaene-Lambertz, Dehaene et Herz-Pannier (2002) ont néanmoins relevé le défi de tester des nourrissons de 2 mois en IRMf.

Les études en IRMf ont permis d'identifier un réseau d'aires fonctionnelles logées au niveau de la voie ventrale qui répond de manière préférentielle aux visages par rapport à d'autres catégories d'objets (Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997 ; Puce, Allison, Gore, & McCarthy, 1995) (voir Figure 4). L'ensemble de ces aires semble jouer un rôle dans

l'extraction des représentations faciales individuelles (Gauthier, Skudlarski, Gore, & Anderson, 2000 ; Grill-Spector, Knouf, & Kanwisher 2004 ; Rossion, Caldara, Seghier, Schuller, Lazeyras, & Mayer, 2003; Schiltz & Rossion, 2006). La première est logée dans le gyrus fusiforme moyen latéral (MGF) et est décrite comme la « Fusiform Face Area » (FFA, Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997). L'autre lui est postérieure et se trouve dans une région du cortex occipital inférieur (IOG). Elle répond à l'appellation « Occipital Face Area » (OFA, Gauthier et al., 2000). La dernière, enfin, est localisée au niveau du sillon temporal supérieur (STS). Nombreux sont les auteurs qui se sont penchés sur l'organisation de ces aires fonctionnelles (voir par exemple, Haxby, Hoffman, & Gobbini, 2000 ; Rossion, 2008 ; Figure 5). Nous y reviendrons.

Les recherches menées sur le développement des capacités à reconnaître les visages en sont encore à leurs balbutiements. Comme nous le verrons plus tard, elles ont principalement pour objectif d'identifier le réseau plus impliqué dans la reconnaissance des visages que des objets chez l'enfant, d'évaluer son évolution à travers le temps et de le comparer à celui de l'adulte. Certaines études cherchent également à déterminer si les activations corticales en réponse aux visages sont plus focales ou plus étendues chez les enfants que chez les adultes et si elles se spécialisent au cours du développement (voir *infra*).

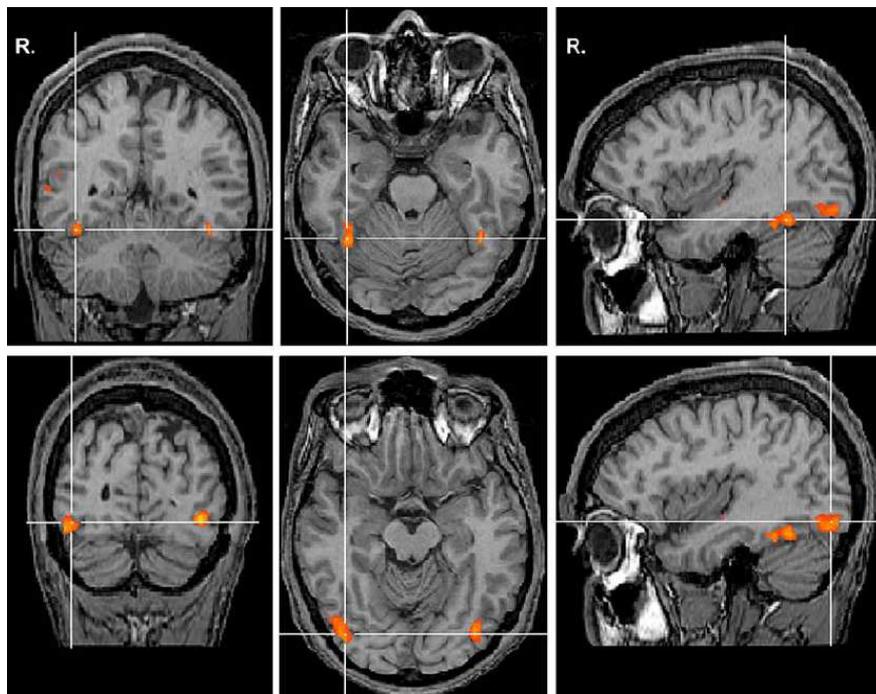


Figure 4. Extraite de Schiltz et Rossion (2006). Aires fonctionnelles qui répondent de manière spécifique aux visages dans IOG et MGF. Vues coronales, transversales et sagittales de MGF (ligne du dessus) et de IOG (ligne du dessous).

CHAPITRE II

Perspective anatomique : la maturation des systèmes

1. Introduction

Sur base de nos lectures relatives au développement du système de reconnaissance des visages, il apparaît clairement que penser le comportement en terme de neurobiologie offre une plausibilité biologique aux modèles construits (voir de Schonon & Mathivet, 1989 ; Johnson & Morton, 1991 ; Nelson, Moulson, & Richmond, 2006). Pour ne donner qu'un seul exemple, les persévérations verbales et/ou motrices que l'on observe parfois chez les enfants peuvent être expliquées par le fait que le cortex préfrontal subit encore des changements importants jusqu'à l'adolescence (Sowell, Thompson, Holmes, Jernigan, & Toga, 1999a).

Nous assisterons probablement, dans les années à venir, à un accroissement de la tendance à se référer spontanément au substrat neuronal, et ce principalement pour trois raisons. La première est que l'accès aux techniques d'imagerie cérébrale est un phénomène récent et que leur utilisation est de plus en plus fréquente avec de jeunes enfants (voir par exemple, Dehaene-Lambertz et al., 2002). Or elles contribuent très certainement au regain d'intérêt général pour les structures neuronales (à ce propos, voir Goldman-Rakic, 1987 ; Nelson & Bloom, 1997). La seconde est que, ces dernières années, les chercheurs ont plutôt tendance à se défaire des diagrammes composés de boîtes et de flèches issus de la psychologie cognitive des années 1960, qui ne font aucunement référence au cerveau (voir modèle de Bruce & Young, 1986, Figure 5A), au profit de modèles neurofonctionnels (voir par exemple, Rossion, 2008, Figure 5B). La dernière est que les années à venir devraient voir s'accroître les connaissances à propos de la maturation du cerveau humain, et plus précisément du système visuel chez l'homme. Comme nous allons le voir, celles-ci sont, à l'heure actuelle, pleines d'inconnues et parfois même contradictoires. Au travers de ce chapitre, nous allons malgré tout tenter l'exercice de décrire la trajectoire maturationnelle du réseau qui sous-tend la fonction de reconnaissance des visages car, de toute évidence, aucune fonction cognitive ne peut être correctement étudiée si l'on oublie qu'elle est aussi incarnée.

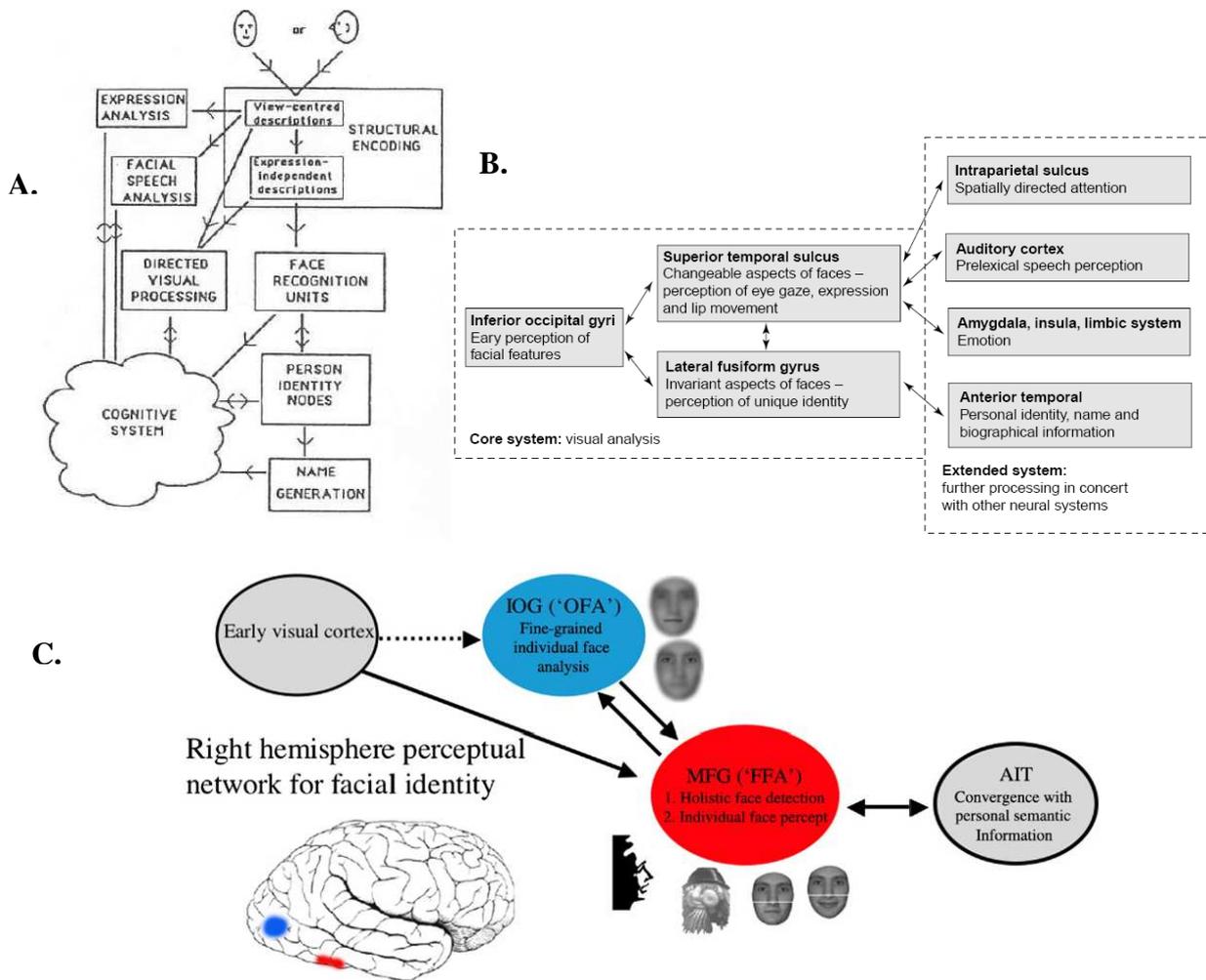


Figure 5 : A. Modèle cognitif de Bruce et Young (1986). Modèles neurofonctionnels de l'organisation de la perception des visages de Haxby, Hoffman et Gobbini (2000 ; B) et de Rossion (2008 ; C).

2. Du général au particulier

Avant toute chose, il convient de rappeler que les réseaux neuronaux s'élaborent notamment à partir d'instructions génétiques qui permettent au cerveau de se développer par le biais d'une cascade complexe d'événements physiques et biochimiques, qui est séquentielle et déterminée fonctionnellement. En outre, comme nous l'avons déjà vu et le verrons par la suite, la mise en place définitive de ces circuits dépend fortement de l'environnement du sujet in utero et pendant la petite enfance. Ce phénomène renvoie au caractère plastique du cerveau, en particulier au cours de certaines périodes critiques, appelées aussi périodes sensibles du développement.

A. Le développement du cerveau

A partir de la 3^{ème} semaine, le système nerveux de l'embryon humain commence à subir de grands changements. Une des premières étapes du développement cérébral passe par l'induction et la complexification d'un tube neural. Ce dernier est constitué de 3 couches : l'endoderme qui donne naissance à la paroi de plusieurs organes internes, le mésoderme à partir duquel se forment les os et les muscles et l'ectoderme à partir duquel sont produits le système nerveux et la peau. Le tube neural se différencie ensuite en 3 vésicules primitives (voir Figure 6A) : le prosencéphale (ou cerveau antérieur), le mésencéphale (ou cerveau médian) et le rhombencéphale (ou cerveau postérieur). Le prosencéphale se fractionne ensuite en vésicules optiques à l'origine de la rétine et des nerfs optiques adultes, en un diencephale à l'origine du thalamus, de l'hypothalamus et du 3^{ème} ventricule adulte et en un télencéphale à l'origine du bulbe olfactif, du cortex cérébral, du télencéphale basal, du corps calleux, de la substance blanche corticale et de la capsule interne tels qu'on les trouve chez l'adulte (voir Figure 6B). La Figure 6C illustre bien la maturation progressive du télencéphale de la 9^{ème} à la 36^{ème} semaine de gestation. C'est au sein de la vésicule télencéphalique que se déroule la phase de prolifération cellulaire. Les cellules, qu'il s'agisse des neurones ou des cellules gliales, exécutent une véritable danse pendant laquelle elles envoient, dans l'ordre, leurs projections ou leur noyau vers la surface externe du cerveau, se rétractent et se divisent. Certaines d'entre elles, les cellules souches, restent dans la zone ventriculaire pour se diviser à nouveau alors que d'autres, les cellules filles, entament un

processus de migration cellulaire pour prendre place dans une zone bien définie du cortex. Ce processus a lieu entre la 5^{ème} semaine et le 5^{ème} mois de grossesse. Plus précisément, les cellules filles, appelées aussi neuroblastes, migrent le long de fibres formées de glie radiaire de la zone ventriculaire à la périphérie du cerveau pour former, par vagues successives, la plaque corticale. Quand toutes les cellules corticales sont arrivées à destination, les fibres de glie radiaire rétractent leurs prolongements. Vient ensuite le processus de différenciation cellulaire au cours duquel le neuroblaste prend l'aspect et les caractéristiques d'un neurone. Celui-ci n'apparaît que quand la plaque corticale est atteinte par la cellule. On assiste alors au développement axonal et dendritique des neurones dont les projections cherchent à s'orienter vers leurs cibles respectives. On voit ainsi, par exemple, que l'ensemble de ces mécanismes pousse les axones rétiniens à atteindre les corps genouillés latéraux ainsi que la couche IV du cortex strié avec lesquels ils forment des synapses tout en respectant une certaine organisation rétinotopique.

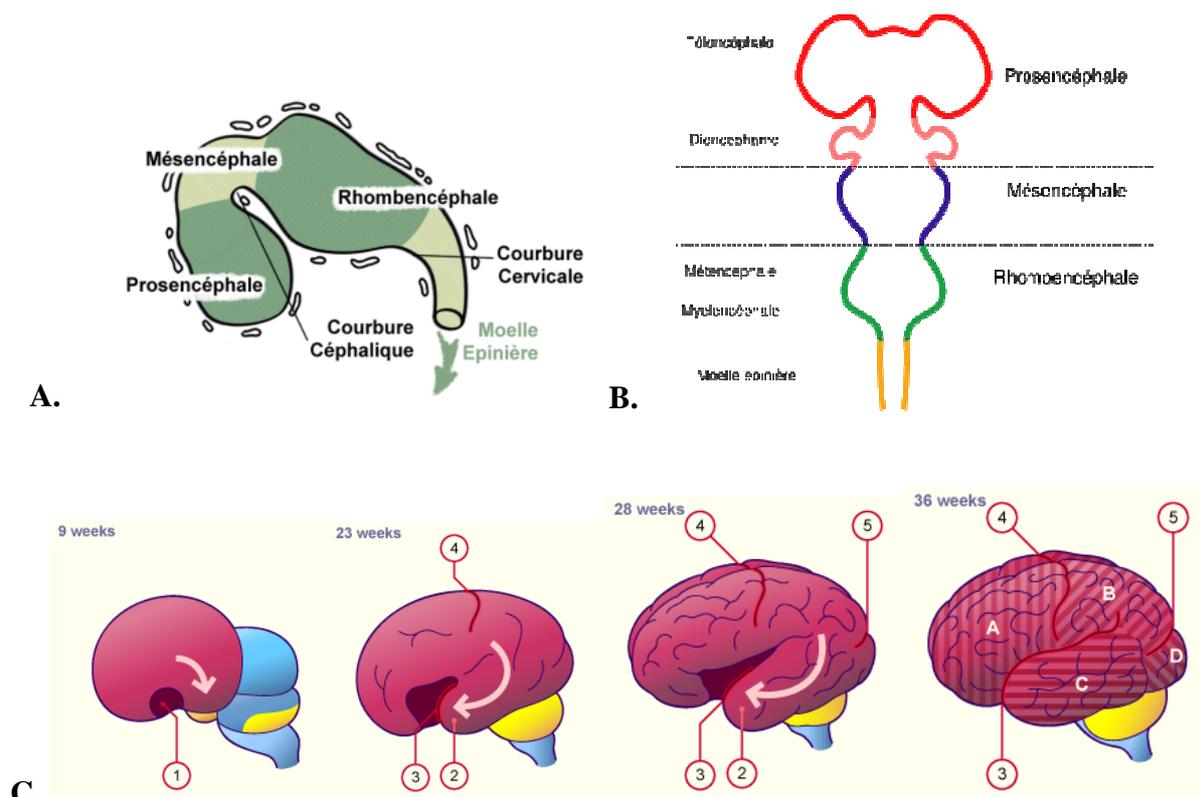


Figure 6 : A. Le prosencéphale (cerveau antérieur), le mésencéphale (cerveau médian) et le rhombencéphale (cerveau postérieur). B. Le prosencéphale composé du télencéphale et du diencephale. C. Développement du télencéphale (1 : Insula ; 2 : Lobe temporal en développement ; 3 : Sillon latéral ; 4 : Sillon central ; 5 : Sillon pariéto-occipital ; A : Lobe frontal ; B : Lobe pariétal ; C : Lobe temporal ; D : Lobe occipital).

Outre ces différentes étapes qui se déroulent avant la naissance, on assiste à un affinement progressif des connexions établies jusque-là, de la naissance à l'adolescence, voire à l'âge adulte. Celui-ci est rendu possible par l'intermédiaire des processus de mort cellulaire et de réorganisations des synapses. On observe en effet que, jusqu'à l'adolescence, le nombre de neurones nouvellement élaborés chute drastiquement. Cette période se caractérise aussi par l'incroyable capacité synaptique des jeunes neurones, deux fois plus grande que celle des cellules adultes. De plus, les synapses ne cessent de se réorganiser en fonction de l'activité neuronale et des transmissions synaptiques qui ont eu lieu jusque-là. On observe, par exemple, qu'au niveau du cortex visuel le nombre total de synapses à la naissance équivaut à 10 % de ce que l'on trouvera plus tard chez l'adulte. Il atteint son maximum à 6 mois et décroît ensuite de moitié entre 1 et 5 ans, pour se stabiliser enfin (Huttenlocher, 1999). Le phénomène de mort cellulaire serait essentiellement dû à la compétition entre les cellules pour des facteurs trophiques, c'est-à-dire pour le carburant dont elles ont besoin pour fonctionner. Globalement, la période qui s'étend de la naissance à l'âge adulte est souvent associée à des changements importants au niveau de la quantité de substance grise et de substance blanche. Ceux-ci sont fonction des aires cérébrales comme nous le montre l'exemple suivant. Alors que la quantité de substance blanche et grise augmente encore fortement au niveau du lobe préfrontal à l'adolescence, de manière concomitante à l'élaboration des fonctions exécutives (Sowell et al., 1999a), elle se développerait surtout au cours de l'enfance dans les régions dorso-pariétales impliquées dans les fonctions sensorielles et perceptives (Sowell, Thompson, Holmes, Batth, Jernigan, & Toga, 1999b). Plus particulièrement il apparaît, au travers du processus de myélinisation des fibres qui assure le transfert rapide de l'influx nerveux, que la substance blanche se développe intensément au cours des 6 premiers mois postnataux et que ce développement se poursuit ensuite jusqu'à la puberté. La substance grise, quant à elle, se développe très différemment en fonction de l'aire cérébrale impliquée comme nous l'indiquent Sowell, Thompson, Leonard, Welcome, Kan et Toga (2004). Par l'intermédiaire du calcul de l'épaisseur de la substance grise en millimètres (mm), leur recherche a mis en évidence que la taille du cerveau augmente à raison de 0.4 à 1.5 mm par an de 5 à 11 ans. Entre ces 2 moments, le gain en quantité de substance grise s'observe surtout au niveau des régions frontales et pariéto-occipitales par rapport aux autres régions corticales (voir Figure 7). Chugani, Phelps et Mazziotta (1987) en TEP et Giedd et collaborateurs (1996) en IRMf ont également suggéré que le cortex visuel, occipital, subissait des changements structurels

même à l'âge adulte. Nous retiendrons de ce paragraphe que les régions impliquées dans la reconnaissance des visages subissent probablement encore des changements dans l'enfance, tant au niveau de la substance blanche que de la substance grise (Sowell et al., 2004).

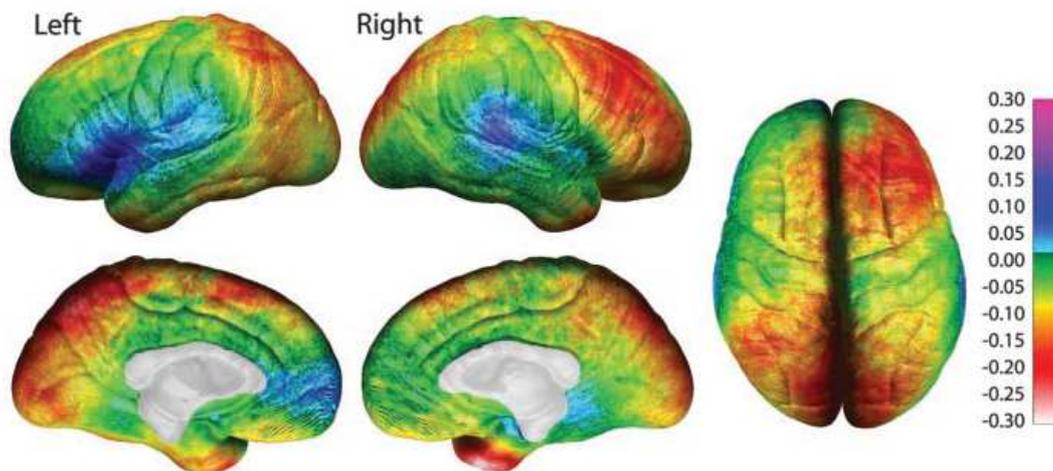


Figure 7 : Extraite de Sowell et collaborateurs (2004). Evolution de l'épaisseur de la substance grise en millimètres chez des enfants de 5 à 11 ans. Celle-ci s'observe principalement au niveau des aires frontales et pariéto-occipitales (en bleu).

Nous venons de voir que la construction des circuits neuronaux se fait avant et après la naissance, par l'intermédiaire de signaux chimiques et de contacts physiques de cellule à cellule en constante interaction avec un certain milieu. Outre les travaux décrits ci-dessus, le développement du cerveau est également caractérisé par d'autres événements. Le décalage de maturation entre certaines régions droites et gauches du cerveau, la mise en place fonctionnelle du corps calleux sont, par exemple, autant d'événements anatomo-fonctionnels qui modulent le développement des compétences et leurs substrats biologiques (Bentejac & de Schonen, 2000 ; de Schonen & Mathivet, 1989 ; Liégeois & de Schonen, 1997).

B. La plasticité cérébrale

Le cerveau d'un individu doit continuellement faire preuve de plasticité pour s'adapter à l'environnement interne (son organisme) et externe (le milieu dans lequel il évolue), ceux-ci étant de surcroît en perpétuel changement. Il ne cesse donc de se réorganiser, de se restructurer. Un exemple éloquent de sa plasticité est le fait qu'une aire cérébrale déprivée

peut être colonisée par une autre fonction. C'est le cas des aires auditives des personnes sourdes de naissance qui répondent à certaines stimulations visuelles (Bavelier, Tomann, Hutton, Mitchell, Corina, Liu, & Neville, 2000). Un autre exemple est le fait que la perception de la parole, généralement basée sur des réseaux de l'hémisphère gauche, peut se développer dans l'hémisphère droit dans le cas où le gauche est lésé (Liégeois, Connelly, Baldeweg, & Vargha-Khadem, 2008). Les développementalistes pensent, par ailleurs, que le cerveau est surtout plastique chez l'enfant et que cette capacité s'estompe avec le temps (Furl, Phillips, & O'Toole, 2000). C'est manifeste quand on observe que des réorganisations globales des champs axoniques sont possibles en phase de développement précoce mais pas à l'âge adulte, où la plasticité est réduite aux synapses. De même, il a été démontré que le fait de masquer un œil dans la petite enfance modifie profondément les connexions binoculaires des couches superficielles, alors qu'à l'adolescence ce type d'expérience ne modifie pas les circuits corticaux de manière durable. Il semble donc que le développement cérébral soit caractérisé par la présence de périodes critiques ou de périodes sensibles de développement pendant lesquelles les qualités plastiques du cerveau sont plus importantes que par la suite. Etant donné que les différentes structures du cerveau n'ont pas toutes la même vitesse de maturation et que tous les facteurs de plasticité ne disparaissent pas en même temps, on ne peut pas considérer qu'il existe une seule période de plasticité cérébrale valable pour toutes les fonctions et tous les niveaux d'intégration. Ainsi, les aires corticales de haut niveau sont généralement considérées comme étant plus longtemps plastiques que les aires corticales de bas niveau. De même, chaque aire corticale peut être caractérisée par plusieurs périodes critiques qui varient selon les individus (Atkinson, 2002). Peu importe le nombre et la longueur des périodes critiques de développement, le point crucial pour notre sujet est qu'il est possible, dans le cas où l'environnement ne peut exercer son influence précisément à ces moments-là, que certaines fonctions corticales se développent de manière anormale. Les résultats de Hubel, Wiesel et LeVay (1965) témoignent des conséquences dramatiques d'une déprivation visuelle précoce quand les systèmes sont encore en formation. Ces auteurs ont mené une expérience de déprivation visuelle dans laquelle les paupières de l'œil d'un singe ont été suturées. Ils ont observé que quand l'opération avait lieu peu après la naissance, au moment où les colonnes de dominance oculaire se distinguent au niveau du cortex strié (V1), les colonnes de l'œil ouvert étaient beaucoup plus larges que les colonnes de l'œil ligaturé. Au contraire, la couche IV du cortex strié n'était pas touchée quand la phase de ségrégation

naturelle était dépassée. Les conséquences d'une déprivation visuelle précoce totale et partielle ont également été étudiées chez l'homme, auprès de patients atteints de cataracte opaque (voir par exemple Le Grand, Mondloch, Maurer, & Brent, 2004) et chez le singe (Sugita, 2008). Nous y reviendrons.

Retenons de ce paragraphe que l'expérience visuelle est un élément crucial qui, combinée à certains facteurs génétiques, est capable de moduler les réponses ainsi que l'organisation fonctionnelle du cortex visuel, et ce à certaines périodes critiques du développement.

C. Le système visuel

Il est communément admis que le système visuel des jeunes enfants est encore immature. Ses fonctions émergent et se développent à différents rythmes. Pour l'illustrer, nous allons parcourir les différents éléments qui en font parties, de l'œil aux aires visuelles complexes capables de traiter des stimuli visuels comme les visages.

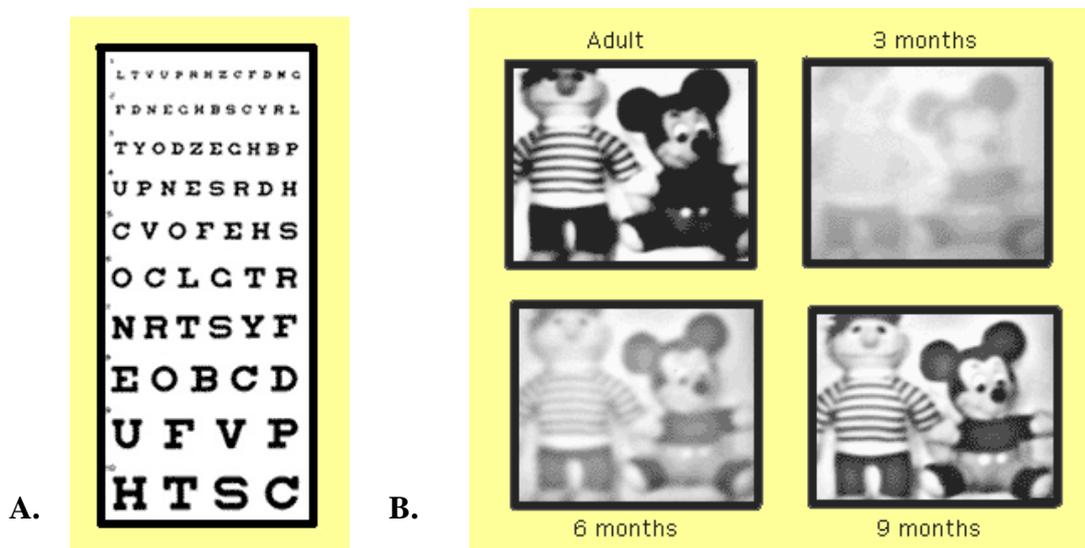


Figure 8 : A. « Snellen charts » souvent utilisés pour évaluer l'acuité visuelle à l'âge adulte. B. Simulation de l'accroissement des capacités des nourrissons à percevoir les détails d'une scène visuelle. Il est important de noter à propos de cet exemple que la scène a été manipulée par rapport à sa visibilité et sa quantité de contraste.

L'œil se compose de différentes structures dont la rétine, le cristallin, la cornée, l'iris, la pupille et les liquides. La rétine est composée de 2 couches : la couche pigmentaire (externe)

qui empêche la lumière de se diffuser dans l'œil et la couche nerveuse (interne). Cette dernière est couverte d'une centaine de millions de photorécepteurs, les cônes et les bâtonnets, ainsi que de cellules qui acheminent l'information visuelle vers le cerveau. Son rôle n'est pas seulement de transmettre les informations relatives aux différences de luminosité ou d'ombre qui la frappent, mais également d'extraire les informations à partir des différentes facettes de l'image visuelle. Les fibres nerveuses efférentes sortent de l'œil par le nerf optique. C'est à cet endroit précis que se trouve la tache aveugle jouxtée par la tache jaune et, en son centre, la fovéa, le point de la rétine où l'acuité visuelle est la plus grande. L'acuité visuelle peut être définie comme le plus petit angle visuel qui permet de considérer 2 points comme distincts. De manière générale, il apparaît que les capacités visuelles des nouveau-nés sont limitées par les qualités optiques de l'œil à la naissance, que ce soit au niveau de la cornée dont la courbure évolue au cours du temps, de la lentille ou de l'humeur vitrée (Odom & Green, 1984). L'épaisseur des gaines de myéline qui entourent les axones des nerfs et des tractus optiques augmente aussi jusqu'à 2 ans et même plus tard (Friede & Hu, 1967 ; Magoon & Robb, 1981). A la naissance, le cristallin présente de faibles capacités d'accommodation même si cette faculté s'acquiert rapidement au cours des premiers mois de vie (Banks, 1980 ; Braddick, Atkinson, Julesz, Kropfl, Bodis-Wollner, & Raab, 1989 ; Lotmar, 1976). Il s'ensuit que le nouveau-né parvient difficilement à faire converger sur sa rétine les rayons lumineux produit par un objet trop proche de lui. Le problème inverse se pose si l'objet est trop éloigné. Ceci étant, la distance focale optimale, qui assure la meilleure visibilité au nouveau-né, se situe entre 20 et 50 cm, soit celle qui le sépare du visage de sa mère quand il est au sein. On peut néanmoins se demander quelle perception il en a sous cet angle de vue. On a également observé que la rétine périphérique évolue plus rapidement que la rétine fovéale, encore immature à 15 mois (Atkinson, 2002). Les nouveau-nés sont donc à la fois plus aptes à détecter une cible qui apparaît en périphérie du champ visuel qu'en son centre (Lewis & Maurer, 1990) et moins habiles pour en détecter la couleur et les détails puisque c'est au niveau de la fovéa que l'acuité visuelle est la meilleure. Macchi Cassia, Valenza et Simion (2004) ajoutent que le champ visuel est aussi fortement réduit à la naissance, l'excentricité maximale n'étant que de 40 degrés pour le nouveau-né alors que l'adulte couvre une surface de 80 degrés et que les mouvements oculaires des tout-petits ne permettent des poursuites lisses qu'après 2 mois. A propos de l'acuité visuelle, il apparaît qu'elle est 30 fois moins bonne chez les nouveau-nés que chez les adultes mais qu'elle augmente très rapidement étant

donné que la densité des cônes double entre 45 jours et 45 mois, point auquel on considère que le stade adulte est atteint (Hubel & Wiesel, 1965). Si l'acuité de populations d'âges différents était comparée à l'aide des Snellen charts (voir Figure 8A), elle serait de 20/20 pour un adulte, de 20/30 pour un nourrisson de 8 mois et de 20/60 pour un nourrisson de 4 mois. L'acuité visuelle des nouveau-nés équivaldrait plutôt au ratio 20/120. Il en résulte que l'accès aux détails d'une scène visuelle ne se fait que progressivement (voir Figure 8B).

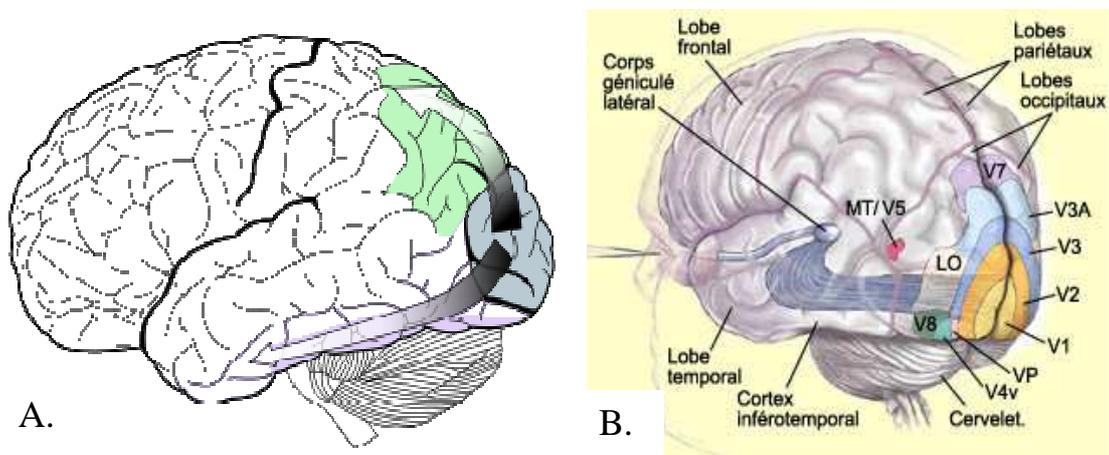


Figure 9 : A. Vue schématique de la voie ventrale (« What ? », en mauve) et de la voie dorsale (« Where ? », en vert). B. Vue détaillée des aires cérébrales impliquées dans l'organisation de ces voies visuelles.

De la rétine, l'information visuelle est véhiculée vers le cortex visuel primaire par l'intermédiaire des corps genouillés latéraux (CGL). Chacun d'eux est subdivisé en 6 couches dont l'organisation est rétinotopique. Les 2 couches ventrales (1 et 2) contiennent les plus gros neurones et forment les couches magnocellulaires, contrairement aux 4 couches dorsales (3 à 6) qui constituent les couches parvocellulaires des CGL. Cette dissociation est déjà présente au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine. Ainsi, les cellules ganglionnaires de type P se projettent exclusivement dans les couches parvocellulaires du CGL et les cellules ganglionnaires de type M dans les couches magnocellulaires du CGL. Au-delà des CGL, la voie magnocellulaire rejoint la couche IVb du cortex strié et compose ensuite la plus grande partie de la voie dorsale. A l'inverse, la voie parvocellulaire rejoint les régions intermédiaires du cortex strié situées entre les zones de taches de la couche III et c'est avec la voie magnocellulaire qu'elle compose l'input de la voie ventrale (voir Figure 9A). Les neurones de

la voie parvocellulaire ont de petits champs récepteurs et sont particulièrement sensibles à la couleur et aux détails des formes. Les neurones de la voie magnocellulaire sont dotés de larges champs récepteurs insensibles à la couleur, qui traitent l'information de faible résolution spatiale tout en étant sensibles au mouvement, aux basses fréquences spatiales, au contraste et à la luminance d'un stimulus ainsi qu'à certains aspects de la vision stéréoscopique. Quant à leur maturation, les données sont contradictoires. Pour certains auteurs (voir par exemple, Atkinson, 2002), plusieurs aspects fonctionnels de la voie parvocellulaire (P) arriveraient à maturité avant ceux de la voie magnocellulaire (M). L'auteur observe, en effet, que certaines fonctions permises par la voie P comme la perception de la couleur et des formes sont tout à fait efficaces à l'âge de 3 mois, alors que d'autres fonctions impliquant la voie M comme la perception du mouvement ou la vision stéréoscopique ne sont effectives que plus tard. D'autres auteurs pensent, au contraire, que la voie M se développe avant la voie P (Banks & Dannemiller, 1987 ; Banks, Stephens, & Hartmann, 1985 ; Slater, 1993) et qu'elle est mature dès la première année de vie (Hammarrenger, Leporé, Lippé, Labrosse, Guillemot, & Roy, 2003), au contraire de la voie P, toujours immature à l'âge de 5 et 8 ans (Gordon & McCulloch, 2000). Les données rassemblées à propos du développement de la rétine, recueillies sur la base de gratings (voir *infra*), plaident en faveur de cette dernière proposition tout autant que celles de l'Etude N°1, récoltées sur la base de visages, qui suggèrent que les nouveau-nés utilisent, pour les reconnaître, les basses fréquences spatiales principalement véhiculées par la voie M et non les hautes fréquences spatiales principalement véhiculées par la voie P.

Les fréquences spatiales peuvent être sommairement définies comme le nombre de cycles par unité de distance projeté sur la rétine, soit le nombre d'alternance de bandes blanches et noires par cycle par degré d'angle visuel (cpd) quand on a affaire à des gratings (voir Figure 10A). La perception des fréquences spatiales est dépendante de la quantité de contraste, comme l'indique la « Contrast Sensitivity Function » (CSF, voir Figure 10B). On accepte généralement l'idée que les nouveau-nés ne perçoivent que les fréquences spatiales basses (de 0 à 1 cpd) de gratings et qu'ils ont besoin de 10 fois plus de contraste que les adultes pour les traiter (voir Figure 10B). Toujours en regard des gratings, les aptitudes des très jeunes enfants évoluent rapidement de la naissance à l'âge de 6 mois de telle sorte que les nourrissons commencent, dès cet âge, à répondre aux fréquences spatiales moyennes de

contraste important (> 5 cpd ; Maurer, Mondloch, & Lewis, 2007). La sensibilité aux hautes fréquences spatiales émerge graduellement après l'âge d'un an (Maurer et al., 2007).

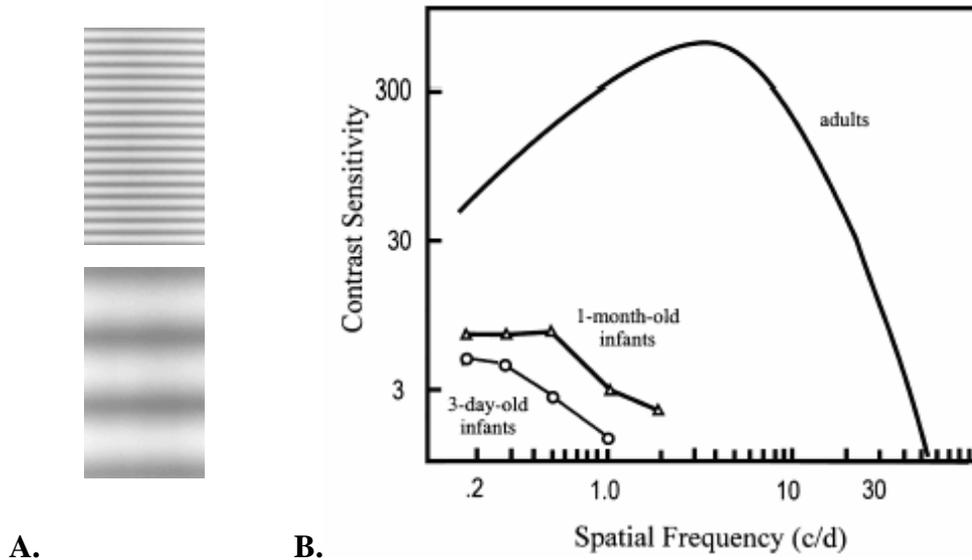


Figure 10 : A. Gratings ne révélant que les hautes (haut) et basses (bas) fréquences spatiales. B. Courbe de sensibilité au contraste (« CSF ») pour les adultes, les nourrissons d'un mois (Banks & Salapatek, 1978) et les nouveau-nés (Acerra, Burnod, & de Schonen, 2002).

Les quelques études relatives au développement du cortex visuel primaire humain font état de la présence de cartes rétinotopiques au niveau de V1, V2, V3, V3a (Figure 9B) chez les enfants de 7 à 12 ans. Ces cartes sont fort similaires à celles que l'on retrouve chez l'adulte (Conner, Sharma, Lemieux, & Mendola, 2004). A 4 mois, V1 atteint son volume adulte, bien plus tôt que le reste du cerveau (Garey, 1984 ; Garey & de Courten, 1983 ; Huttenlocher & de Courten, 1987 ; Lemire, Loeser, Leech, & Alvord, 1975). La densité synaptique y atteint son maximum à l'âge de 4 ans et à 11 ans dans les aires visuelles plus complexes (Huttenlocher, 1994 ; Huttenlocher, & Dabholkar, 1997). Ben-Shachar, Dougherty, Deutsch et Wandell (2007) ont, pour leur part, démontré, chez des enfants de 7 à 12 ans, que V1, V3a et MT sont sensibles aux contrastes. V3a est aussi moins sensible au mouvement qu'à l'âge adulte quand son activité est évaluée chez des enfants de 5-6 ans (Klaver, Lichtensteiger, Bucher, Dietrich, Loenneker, & Martin, 2008). Lewis, Kingdon, Ellemberg et Maurer (2007) ont proposé que la capacité à discriminer l'orientation se

développe lentement et plus lentement encore quand on modifie le contraste plutôt que la luminance des gratings. Selon Grill-Spector, Golarai et Gabrieli (2008), les aires visuelles primaires arrivent à maturité après 7 ans mais pas en l'absence d'une certaine quantité d'expérience visuelle. Les colonnes de dominance oculaire dans V1 ainsi que l'acquisition de la vision binoculaire, par exemple, ne peuvent pas se développer sans contact avec le monde visuel (Hubel, Wiesel, & LeVay, 1977).

Tout comme pour les aires visuelles primaires, l'état de maturation des voies ventrale et dorsale a généralement été étudié au travers de l'état de maturité des fonctions qu'elles sous-tendent. Ce n'est pas le cas d'un nombre restreint de recherches, dites structurelles et de surcroît en lien avec la fonction de reconnaissance des visages, qui ont notamment montré que ces voies existaient déjà à l'âge de 2-3 mois chez l'homme (Izard, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2008 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2002) et que leurs structures évoluaient encore pendant l'enfance (Sowell et al., 2004). Du point de vue fonctionnel, on attribue généralement à la voie ventrale le traitement de la couleur, des objets et des visages et à la voie dorsale le mouvement. Quand leurs fonctions sont prises dans leur ensemble, aucun décalage de maturation n'est observé entre les 2 voies (Parrish, Giaschi, Boden, & Dougherty, 2005) alors qu'une plus grande vulnérabilité aux troubles neuro-développementaux est attribuée à la voie dorsale par rapport à la voie ventrale (Braddick, Atkinson, & Wattam-Bell, 2003). Puisque nous exposerons en détails les études neurofonctionnelles relatives à la mise en place de la fonction de reconnaissance des visages (voir par exemple, Golarai, Ghahremani, Whitfield-Gabrieli, Reiss, Eberhardt, Gabrieli, & Grill-Spector, 2007), nous allons dès à présent exposer quelques résultats relatifs à l'état de maturation de fonctions connexes à la reconnaissance des visages. En ce qui concerne le mouvement par exemple, qui intervient quand un visage est dynamique, Parrish et collaborateurs (2005) rapportent que le point de maturation de la perception du mouvement global se situe à l'âge de 3-4 ans quand aucun distracteur n'est présent, et à 7-8 ans quand plusieurs distracteurs sont présents. Selon Klaver et collaborateurs (2008), la perception d'objets en 3 dimensions composés de points au mouvement cohérent n'est pas encore mature à l'âge de 5-6 ans. La fonction qui permet à un individu de détecter des différences de texture est stable à 11-12 ans, plus ou moins au même moment que celle qui lui permet de traiter la couleur de stimuli en basses fréquences spatiales qui se stabilise, elle, vers 12-13 ans (Parrish et al., 2005). Bien que les trajectoires développementales d'autres

fonctions puissent être évoquées ici, nous nous contenterons d'ajouter que, comparativement aux adultes, les enfants présentent davantage de difficultés à reconnaître des objets incomplets (Gollin, 1960).

3. Conclusions

Nous avons vu que le système visuel se construit au carrefour de contraintes imposées tant par le patrimoine génétique de l'individu que par l'expérience qu'il fait du monde. Les études menées sur le développement des propriétés visuelles de bas niveau qui impliquent le système visuel avant le cortex strié (V1) sont nombreuses. Elles révèlent une maturation progressive des structures en jeu condensée sur la première année de vie. Toute référence à un décours temporel précis reste difficile à l'heure actuelle car les résultats des recherches sont parfois contradictoires, ne sont pas toujours menées sur des humains et n'impliquent pas forcément les mêmes techniques d'investigation.

En revanche, relativement peu d'études se sont intéressées à la maturation des voies ventrale et dorsale chez l'homme. Il n'est pas faux d'avancer qu'elles sont déjà grossièrement fonctionnelles vers 2-3 mois et qu'elles évoluent encore pendant l'enfance et même jusqu'à la puberté. Nous espérons que, dans les années à venir, les informations disponibles seront plus nombreuses, notamment grâce à l'application systématique de techniques non invasives d'imagerie cérébrale à des enfants de plus en plus jeunes. Si cet espoir s'avère fondé, nous devrions assister, dans le domaine de la psychologie du développement cognitif, à la réinscription progressive des fonctions cérébrales dans un substrat neuronal. Dans le domaine de la reconnaissance des visages, c'est déjà le cas de la plupart des recherches menées sur l'adulte mais trop peu pour celles qui concernent les enfants.

Avant de poursuivre, gardons à l'esprit que même si ces circuits ne deviennent que graduellement fonctionnels, les nouveau-nés répondent déjà aux stimulations de l'environnement de manière très précoce, notamment à l'égard des visages. Ils sont capables de détecter des stimuli de grande dimension, où les contrastes sont importants, dont les fréquences spatiales sont basses et qui leur sont présentés à moins d'un demi-mètre de distance. L'ensemble de ces éléments est donc à prendre en considération lorsque l'on crée des tâches visant à étudier les capacités de reconnaissance des enfants à cet âge de la vie.

CHAPITRE III

Perspective fonctionnelle : le développement du système de reconnaissance des visages de la naissance à l'âge adulte

1. Introduction

Passons à présent à la revue des recherches qui ont marqué et marquent encore le champ du développement de la reconnaissance des visages. Celle-ci sera présentée par rapport aux étapes du développement normal de l'enfant. Nous aborderons brièvement certains cas où la fonction se met en place de manière anormale, comme dans l'autisme et la prosopagnosie congénitale/développementale. On aurait pu évoquer les difficultés des patients atteints du syndrome de Williams ou de Turner mais avons préféré nous centrer sur le décours temporel de la fonction de reconnaissance des visages quand elle se développe normalement. Nous espérons que cette section sera la plus exhaustive et la plus objective possible. Nous la ponctuerons toutefois de points de vue personnels, résultat de nos lectures et des expériences que nous avons menées sur le sujet.

2. Décours temporel de la fonction de reconnaissance des visages

A. Les nouveau-nés

a) D'incroyables capacités

Les capacités des nouveau-nés en reconnaissance des visages sont testées depuis les années 60 (Fantz, 1963 ; Goren et al., 1975 ; Stechler, 1964) et jusqu'à ce jour par le biais des paradigmes de préférence et d'habituation visuelle décrits plus haut. De manière générale, on a pu observer que ces capacités sont présentes très tôt au cours du développement de l'enfant puisque les nouveau-nés suivent davantage des visages en mouvement dont les traits sont à leur place que des visages en mouvement aux traits mélangés (Johnson, Dziurawiec, Ellis, & Morton, 1991 ; Johnson & Morton, 1991 ; Morton & Johnson, 1991 ; voir Figure 11), et ce déjà après 2 heures (Mondloch, Lewis, Budreau, Maurer, Dannemiller, Stephens, & Kleiner-Gathercoal, 1999) et 9 minutes de vie (Goren et al., 1975). Ils préfèrent également orienter leur regard et regardent plus longuement le schéma d'un visage qu'un pattern qui n'y ressemble pas (Maurer & Young, 1983 ; Simion, Valenza, & Umilta, 1998), ainsi qu'un visage réel dont la configuration est normale plutôt qu'anormale (Valenza, Simion, Macchi Cassia, & Umilta, 1996) et dont les yeux les regardent plutôt qu'ils ne les évitent (Farroni, Csibra, Simion, & Johnson, 2002). Il est également intéressant de constater que les nouveau-nés ne présentent pas de préférence visuelle pour un visage de $\frac{3}{4}$ qui les regarde directement par rapport à un visage de $\frac{3}{4}$ qui regarde ailleurs (Farroni, Menon, & Johnson, 2006). Ils ne sont donc pas sensibles à la direction du regard mais bien à un pattern particulier dont le visage et les yeux apparaissent de face.

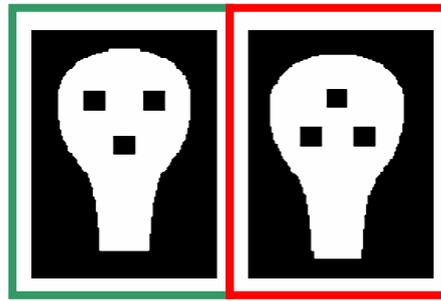


Figure 11 : Configurations schématiques qui ressemblent (« facelike stimulus », à gauche) ou pas (« non facelike stimulus », à droite) à un visage (voir Johnson & Morton, 1991). Le nouveau-né préfère regarder la configuration de gauche (en vert).

A l’instar de ces capacités de détection précoce, les nouveau-nés témoignent aussi de capacités de reconnaissance. Ils marquent, en effet, une préférence pour le visage de la mère quand celle-ci est présentée à côté du visage d’une étrangère (Bushnell, 2001 ; Bushnell, Sai et Mullin, 1989 ; Field, Cohen, Garcia, & Greenberg, 1984 ; Pascalis, de Schonen, Morton, Deruelle, & Fabre-Grenet, 1995 ; Walton, Bower, & Bower, 1992). Cet effet disparaît quand la ligne de démarcation front/cheveux est masquée (Bushnell, 2001 ; Pascalis et al., 1995), probablement parce que cette ligne comporte des contrastes importants dont les nouveau-nés ont besoin, avec la peau du front qui renvoie plus de lumière que les cheveux dont la texture naturelle a plutôt tendance à absorber la lumière. La reconnaissance du visage de la mère est encore possible après un délai de 15 minutes (Bushnell, 2001), ce qui suggère que la mémoire de ce visage est relativement stable. La robustesse de la représentation du visage familial semble liée à la quantité d’expérience accumulée avec ce visage puisque le degré de préférence marqué par le nouveau-né en dépend (Bushnell, 2003). Quant aux visages non familiers, les nouveau-nés sont capables de les reconnaître sur base de leurs traits internes et externes, même si un avantage est observé pour les traits externes. En effet, ils ne reconnaissent pas le visage non familial sans chevelure s’ils sont préalablement habitués à un visage avec chevelure, alors qu’ils reconnaissent la chevelure sans le visage (Turati, Macchi Cassia, Simion, & Leo, 2006). Outre les traits externes, la région des yeux, dont le contraste est également important, influence les capacités de reconnaissance des nouveau-nés de manière notable (Gava, Valenza, Turati, & de Schonen, 2008). Nous détaillerons cette étude par la suite. De manière plus générale, même si les nouveau-nés sont très vite capables de se représenter un visage non familial, les représentations construites à la naissance sont encore

fragiles puisqu'elles sont sensibles à la présence de certains indices internes et externes (Turati et al., 2006) mais résistantes puisqu'elles se maintiennent à travers certains degrés de rotation du visage (Turati, Bulf, & Simion, 2008) et après un délai de 2, 5 ou 15 minutes (Pascalis & de Schonen, 1994).

b) La question de l'innéité et de la spécificité des représentations faciales

La précocité des préférences marquées par les nouveau-nés pour les visages a souvent été utilisée comme argument pour défendre l'hypothèse que les origines du système de reconnaissance des visages sont innées, déterminées phylogénétiquement. L'existence de représentations faciales prédéterminées et sélectionnées au cours de l'évolution des espèces est tentante puisqu'il est utile pour le tout jeune enfant d'être capable de reconnaître ses congénères ainsi que les signaux véhiculés par leurs visages, plus encore avant que le langage ne soit acquis. Comme nous le verrons par la suite, ces représentations sont probablement innées sans être spécifiques à la catégorie des visages (Simion, Valenza, Macchi Cassia, Turati, & Umiltà, 2002). L'autre argument le plus souvent invoqué par les auteurs pour appuyer la thèse de l'innéité est l'existence de cas de prosopagnosie, notamment chez l'enfant. Adam en est le cas le plus illustre. Le fait qu'il ait subi, à l'âge d'un jour, une lésion au niveau de la voie ventrale engendrant des difficultés à reconnaître les visages mais pas les objets a été interprété comme la preuve de l'existence de 2 réseaux distincts (Farah, Rabinowitz, Quinn, & Liu, 2000). Il faut cependant préciser qu'Adam était presque aveugle quand les tests lui ont été administrés. Nelson (2001) ajoute que les régions atteintes chez cet enfant restent à ce jour inconnues, qu'il présentait certains déficits non négligeables de traitement des objets et que ses temps de réaction n'ont jamais été rapportés. Les plus grands défenseurs de la thèse de l'innéité sont Johnson et Morton (1991), Morton et Johnson (1991) et Johnson (2000 ; 2005). Ces auteurs ont développé un modèle attribuant aux nouveau-nés un mécanisme attentionnel à la fois inné, CONSPEC (conspecific recognition of our own species) et spécifiquement dédié à la détection de la visagéité. Celui-ci fonctionnerait sous le contrôle de structures sous-corticales opérant en basses fréquences spatiales : le colliculus supérieur et le pulvinar (Atkinson, 1984). A l'âge de 2 mois, après avoir acquis suffisamment d'expérience avec les visages, ce mécanisme céderait sa place à un mécanisme cortical plus adulte, CONLERN (a system that acquires and retains specific information about the visual

characteristics of conspecifics), capable d'apprendre et de différencier les visages au niveau individuel.

Le modèle de de Schonen et Mathivet (1989), adapté aux nourrissons, est moins strict même s'il confère aussi aux visages une dimension très spéciale dès la naissance. Il s'inscrit dans la perspective cognitiviste des neurosciences qui considère que les structures cognitives sont spécifiques mais qu'elles émergent graduellement de l'interaction entre des contraintes innées et la structure de l'input fourni par l'environnement de l'espèce (voir aussi de Schonen, 2002 ; Elman, Bates, Johnson, Karmiloff-Smith, Parisi, & Plunkett, 1996 ; Karmiloff-Smith, 1992). Selon ces auteurs, la mise en place du système de reconnaissance des visages est donc possible à la naissance car les nouveau-nés disposent d'un mécanisme attentionnel général à la recherche de certaines caractéristiques visuelles dont les visages disposent. Le fruit de cette heureuse rencontre couplée à un environnement visuel relativement stable permet aux représentations faciales de devenir de plus en plus spécifiques. Dans le même sens, des auteurs comme Nelson (2001) et Turati (2004) pensent que le système de reconnaissance des visages se construit sous l'influence de l'environnement et de contraintes innées mais générales. Ces contraintes sont multiples et peuvent être comprises au moyen de l'hypothèse sensorielle et de l'hypothèse structurale. Selon l'hypothèse sensorielle, les visages sont préférés par les nouveau-nés non parce qu'il s'agit de visages au sens strict mais parce que leurs propriétés psychophysiques (ou la quantité d'énergie qu'ils dégagent, « amplitude spectrum ») conviennent à l'état de maturation du système visuel à la naissance. En d'autres termes, un visage ne serait pas préféré à tout autre stimulus suffisamment visible à plusieurs dimensions (Banks & Ginsburg, 1985 ; Banks & Salapatek, 1981 ; Kleiner, 1987 ; 1990). A elle seule, l'hypothèse sensorielle ne permet pas d'expliquer l'ensemble des préférences témoignées par les nouveau-nés puisque ceux-ci préfèrent les patterns qui ressemblent à des visages même quand ceux-ci sont comparés à des stimuli de visibilité égale (Johnson et al., 1991) ou plus grande (Valenza et al., 1996). C'est donc conjointement aux contraintes imposées par l'hypothèse structurale (relative à la distribution d'énergie au sein du stimulus, « phase spectrum ») que ces préférences doivent être comprises. Par rapport à cette dernière hypothèse, on a montré que les nouveau-nés préféreraient les lignes horizontales plutôt que verticales (Slater & Sykes, 1977 ; Slater, Morison, & Rose, 1985), même quand celles-ci sont composées d'éléments distincts (Farroni, Valenza, Simion, & Umiltà, 2000 ; voir Figure 12).

Cette préférence pour l'horizontalité a été interprétée comme une conséquence des capacités oculomotrices restreintes des nouveau-nés à balayer l'axe vertical (Salapatek, 1968 ; Salapatek & Kessen, 1966 ; Slater & Sykes, 1977).

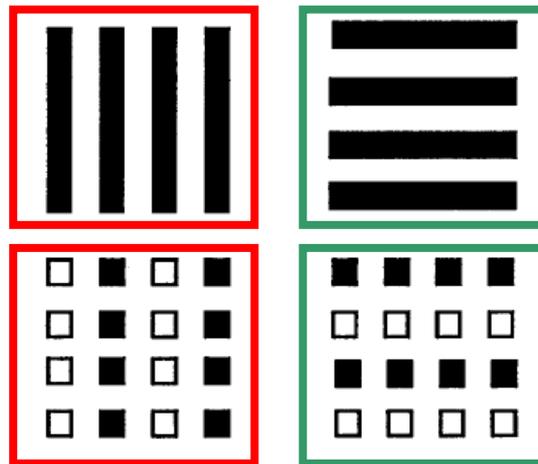


Figure 12 : Préférence des nouveau-nés pour les lignes horizontales plutôt que verticales, que les lignes soient pleines (à gauche) ou composées d'éléments (à droite) (voir Farroni, Valenza, Simion & Umiltà, 2000).

Un nombre impressionnant d'expériences menées dans le laboratoire de Francesca Simion (Padoue, Italie) a appuyé l'idée que les préférences marquées par les nouveau-nés sont conditionnées par la présence de propriétés structurales et relationnelles non spécifiques aux visages. Ce groupe a d'ailleurs démontré que les nouveau-nés préfèrent regarder des patterns non visages (« non facelike ») dont l'organisation présente une asymétrie haut/bas avec davantage d'éléments dans la partie supérieure que dans la partie inférieure (« Up-down Asymmetry » ou « Top-heavy Patterns » ; Simion, Valenza, Macchi Cassia, Turati, & Umiltà, 2002 ; voir Figure 13A). Les mêmes résultats ont été obtenus avec des stimuli ressemblant encore davantage à des visages (« facelike ») (voir Figure 13B ; Macchi Cassia, Valenza, Pividori, & Simion, 2002 ; Macchi Cassia, Valenza, Simion, & Leo, 2008). Un autre facteur qui détermine la préférence des nouveau-nés est celui de la congruence entre la distribution des traits internes et la forme du visage. En d'autres mots, l'effet de congruence (« congruency effect ») impose davantage d'éléments dans la partie la plus large du stimulus pour que la préférence ait lieu. Ce résultat pourrait être expliqué par le fait que les cellules de V1 répondent préférentiellement aux patterns congruents (voir Acerra, Burnod, & de Schonen, 2002). Notons au passage que ces propriétés sont cumulatives en ce sens qu'un

pattern est d'autant plus regardé qu'il cumule les propriétés d'asymétrie haut/bas et de congruence (Macchi Cassia et al., 2008). Les nouveau-nés préfèrent aussi regarder un visage à l'endroit par rapport à un visage à l'envers, même s'il est partiellement masqué, à moins que les yeux ne soient occultés (Gava et al., 2008). Par contre, après habitude avec un visage de face dont les yeux sont masqués par deux barres verticales, les nouveau-nés montrent, au travers d'une préférence pour le stimulus familier, qu'ils distinguent ce visage d'un visage nouveau dont les yeux sont également occultés. L'absence des yeux ne bloque donc pas l'apprentissage du visage mais le perturbe ou le ralentit. Au caractère important des yeux s'ajoute celui de la polarité du contraste dans le visage (Farroni, Johnson, Menon, Zulian, Faraguna, & Csibra, 2005). Plus précisément, la préférence visuelle pour un visage à l'endroit plutôt qu'à l'envers ne se manifeste que si la zone des yeux est plus sombre que le reste du visage. En revanche, les négatifs de visages dont les yeux apparaissent comme des taches plus claires que le reste du visage ne sont pas plus regardés à l'endroit qu'à l'envers. Le dispositif de détection des visages dans les premiers jours de vie n'est donc pas seulement sensible à des propriétés purement géométriques mais aussi à des propriétés visuelles plus globales.

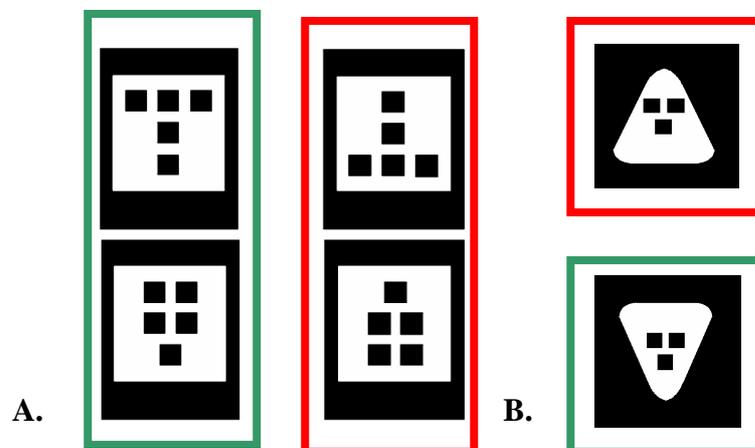


Figure 13 : A. Effet d'asymétrie haut/bas (voir Simion, Valenza, Macchi Cassia, Turati & Umilata, 2002). Préférence pour les patterns de la colonne de gauche, entourés de vert, qui disposent de davantage d'éléments dans la partie supérieure que dans la partie inférieure du champ. B. Effet de congruence (voir Macchi Cassia, Valenza, Pividori, & Simion, 2002 ; Macchi Cassia, Valenza, Simion, & Leo, 2008). Préférence pour le pattern du bas, entouré de vert, dont la relation spatiale entre les traits internes et le contour est congruente.

Il faut ajouter aux facteurs de préférence énoncés ci-dessus celui d'attractivité. Le nouveau-né regarde plus longtemps les visages jugés par l'adulte comme attractifs que ceux

qu'il juge comme non attractifs (Slater, Bremner, Johnson, Sherwood, Hayes, & Brown, 2000a ; Slater, Quinn, Hayes, & Brown, 2000b ; Slater, von der Schulenburg, Brown, Badenoch, Butterworth, Parsons, & Samuels, 1998). Les facteurs en jeu ici semblent davantage liés à la préférence pour la symétrie qu'à la notion de visage moyen (voir *infra*). Cet effet persiste chez le nourrisson de 2-4 mois (Langlois, Ritter, Roggman, & Vaughan, 1991 ; Langlois & Roggman, 1990 ; Langlois, Roggman, Casey, Ritter, Rieser-Danner, & Jenkins, 1987 ; Samuels, Butterworth, Roberts, & Graupner, 1994 ; Samuels & Ewy, 1985) et n'est pas limité aux visages humains puisque les nourrissons de 4 mois préfèrent aussi les visages de chats et de tigres jugés plus attirants (Quinn, Kelly, Lee, Pascalis, & Slater, 2008). Selon de Haan, Johnson, Maurer et Perrett (2001), ce phénomène pourrait s'appuyer sur la préférence pour un visage moyen puisque les nourrissons de 3 mois (et non plus jeunes) fabriquent un prototype moyen à partir des visages qui leur sont présentés. Enfin, le caractère enfantin d'un visage attrayant pourrait être un autre facteur déterminant la préférence des nouveau-nés bien que Geldart, Maurer et Henderson (1999) aient suggéré qu'il n'est pas effectif chez les nourrissons de 5 mois.

Dans la ligne de Johnson (2000), nous pensons que les nouveau-nés subissent effectivement l'influence d'un mécanisme attentionnel qui biaise continuellement l'input fourni à la voie visuelle ventrale en faveur des visages. Ce mécanisme s'appuierait sur des bases phylogénétiques ; il aurait été sélectionné au cours de l'évolution des espèces même si l'on ne peut pas exclure la possibilité qu'une seule heure d'expérience visuelle soit suffisante pour déterminer les préférences marquées par les nouveau-nés. L'exposition fréquente et continue à cette catégorie visuelle amorcerait la trajectoire développementale de la fonction de reconnaissance des visages et provoquerait une spécialisation structurelle et fonctionnelle progressive des circuits corticaux. Comme nous venons de le voir, certains auteurs (Johnson & Morton, 1991, Morton & Johnson, 1991 et Johnson, 2000 ; 2005) prônent l'existence de CONSPEC, un mécanisme attentionnel à la recherche exclusive de visages. Le degré de visagité (ex : paires d'yeux, visages schématiques, visages réels, visages dégradés) auquel CONSPEC réagit n'est pas clairement défini. Nous trancherions plutôt, comme de Schonen (2002), Macchi Cassia et collaborateurs (2008) et Turati (2004), en faveur d'un mécanisme unique de reconnaissance actif dès la naissance et sensible à certaines propriétés visuelles générales, comme un plus grand nombre d'éléments dans la partie supérieure du champ par

rapport au champ inférieur (effet d'asymétrie haut/bas) et une relation congruente entre les éléments et la forme du contour (effet de congruence). Il y en a d'autres et toutes sont loin d'être connues. Il se fait qu'à l'heure actuelle celles qui ont été découvertes sont caractéristiques des visages auxquels les nouveau-nés sont le plus souvent exposés, que ce soit de manière directe ou en combinaison avec d'autres stimulations (voix, manipulations, nourriture ; voir aussi Bushnell, 1998). Ainsi, même si elles sont générales, ces propriétés visuelles contraignent les nouveau-nés à s'orienter de manière spécifique vers la catégorie des visages puisque ce sont les seuls stimuli qui les rassemblent tout en apparaissant à une distance raisonnable. En avant-goût des sections suivantes, nous pensons que ces propriétés générales inhérentes aux visages, combinées à un système visuel encore immature, donnent lieu à des représentations faciales grossières qui s'affinent avec le temps pour acquérir de plus en plus de spécificité.

c) Quand l'expérience précoce avec les visages fait défaut

Comme nous venons de le voir, les nouveau-nés disposent d'un mécanisme leur permettant de s'orienter naturellement vers les visages humains qui apparaissent de manière récurrente dans l'environnement visuel. Le cortex visuel reçoit donc suffisamment d'informations relatives aux visages pour se construire dans les premières semaines de vie. Plusieurs auteurs (voir Geldart, Mondloch, Maurer, de Schonen, & Brent, 2002 ; Le Grand, Mondloch, Maurer, & Brent, 2001 ; 2004 ; Mondloch, Le Grand, & Maurer, 2003) ont examiné le rôle de l'expérience visuelle précoce dans le développement de l'expertise adulte à reconnaître les visages en testant une population privée d'inputs visuels à la suite d'une cataracte congénitale opaque présente depuis la naissance et opérée 3 à 6 mois plus tard. La cataracte est une opacité de la lentille de l'œil qui, dans le cas des patients sélectionnés pour ces études, est suffisamment importante et dense pour empêcher toute information visuelle d'atteindre la rétine. Les patients présentés ici ont donc été privés d'expérience précoce avec les visages de la naissance à l'opération. Leurs scores ont été comparés à ceux de sujets contrôles appariés selon l'âge, la race (caucasienne), la latéralité (droite) et le sexe. Il est apparu que leurs capacités de traitement holistique de visages individuels étaient inférieures à celles du groupe contrôle (Mondloch et al., 2003) : les patients ne présentaient pas d'effet de composite (voir *infra*), à la différence des adultes n'ayant pas été privés d'expérience avec les

visages. Les auteurs ont conclu de cette observation que la mise en place d'un mécanisme efficace de traitement holistique des visages nécessite une certaine quantité d'expérience visuelle précoce. Les capacités d'identification des visages de ces patients ont été évaluées sur base de visages manipulés au niveau des traits (ex : forme des yeux) et des distances entre ces traits (ex : distance entre les yeux). Il est ressorti des résultats que les patients atteints de cataracte bilatérale éprouvaient des difficultés à reconnaître des visages modifiés au niveau de leurs distances relatives mais pas au niveau des traits ou du contour externe du visage. Ainsi, comme le prédit le scénario de de Schonen et Mathivet (1989), l'absence d'input visuel pendant la petite enfance engendre un développement anormal de la sensibilité aux distances relatives, et ce même après 2 mois de déprivation. Les données de Mondloch et collaborateurs (2003) suggèrent enfin que ce type de traitement est régi par l'hémisphère droit (HD) puisqu'une cataracte unilatérale de l'œil gauche impliquant majoritairement l'HD est dramatique pour le traitement des distances relatives, à la différence d'une cataracte unilatérale de l'œil droit impliquant majoritairement l'hémisphère gauche (HG).

La recherche de Sackett (1966) a été menée sur des singes privés de contact réel mais pas artificiel avec des visages de la naissance à l'âge de 9 mois, sans pour autant que le système ne subisse de détérioration dans les premiers mois de la vie. Des photographies de singes et de nourrissons leur étaient, en effet, proposées au quotidien. L'auteur fait état de plus d'explorations, de jeux, de vocalisations et de perturbations face aux stimuli à forte connotation sociale, comme des photographies de visages de nourrissons ou de singes menaçants, qu'en présence d'autres stimuli visuels, ce qu'il a interprété en termes de prédisposition innée de ces singes socialement naïfs à réagir à la menace. Dans une étude plus récente, Sugita (2008) a lui aussi soumis de jeunes singes privés, de la naissance à 6, 12 ou 24 mois de vie, de tout contact naturel ou artificiel avec des visages soit humains soit de singes, à différentes tâches de préférence et d'habituation visuelle impliquant des objets, des visages d'humains et de singes, et ce une semaine avant, un mois et une année après la période de déprivation. Pour compenser le fait qu'ils ne voyaient jamais de visages (cachés derrière un voile, voir Figure 14, 1, A), leur environnement visuel avait été considérablement enrichi par des fleurs et des jouets variés et colorés (voir Figure 14, 1, C et D). La période de déprivation était suivie d'une phase d'un mois pendant laquelle les bébés singes étaient confrontés soit à un autre singe, soit à plusieurs humains. Après un mois, leur environnement visuel s'enrichissait encore d'autres exemplaires des 2 types. Pendant la période de déprivation, les

jeunes singes préféraient regarder un visage qu'un objet, qu'il s'agisse d'un visage humain ou d'un visage de singe. En outre, ils ne marquaient aucune préférence pour l'un ou l'autre type de visage. En l'absence de toute expérience visuelle avec des visages, ces jeunes singes semblaient donc disposer, aux alentours de la naissance, d'un système sensible aux visages à l'endroit (voir aussi de Schonen & Mathivet, 1989 ; Morton & Johnson, 1991 ; Turati, 2004) qui n'était pas encore orienté vers une espèce (ex : primates) plutôt qu'une autre (ex : humains). Les résultats obtenus par l'intermédiaire de la technique d'habituation visuelle ont également révélé qu'ils marquaient aussi bien une préférence pour la nouveauté avec des visages humains qu'avec des visages de singes dont les traits ou les distances relatives avaient été manipulés. Indépendamment de toute expérience visuelle, les jeunes singes semblent donc capables de détecter de subtils changements induits sur des visages (voir Figure 14, 2, C et E). Par contre, après un mois, les singes regardaient de manière préférentielle l'exemplaire de la catégorie à laquelle ils avaient été directement exposés après la période de déprivation. Ainsi, les singes qui n'avaient été exposés qu'au visage d'un seul congénère montraient une préférence pour la catégorie à laquelle il appartenait, les visages de singes, qu'ils soient opposés à un objet ou à un visage humain. De surcroît, l'orientation des préférences marquant les effets de l'expérience visuelle acquise pendant la petite enfance se maintenait malgré une année d'expérience intensive avec des visages humains. Les singes montraient également des capacités discriminatives mais exclusivement pour les visages de l'espèce à laquelle ils avaient été confrontés juste après la phase de déprivation, que ces visages aient été manipulés au niveau des traits ou des distances relatives entre ces traits et que la mesure soit prise après un mois ou une année d'exposition à cette catégorie.

L'étude de Sugita (2008) permet de souligner certains points qu'il conviendra de garder à l'esprit jusqu'à la conclusion de cette section. Premièrement, la préférence pour les visages (humains ou de singes) par rapport aux objets semble exister en dehors de toute expérience avec cette première catégorie, même s'il n'est pas improbable que les bébés singes aient été confrontés à un exemplaire de visage de singe, au moins, celui de leur mère, puisqu'ils en auraient été séparés plusieurs heures après la naissance. Se pose ainsi la question du nombre d'exemplaires de visages qu'il faut avoir vu pour manifester une préférence pour les visages par rapport aux objets. Selon les résultats décrits dans cette étude, on pourrait imaginer qu'un exemplaire de visage de singe soit suffisant pour orienter une préférence à l'égard des visages

par rapport aux objets (catégories grossières) mais pas pour induire une préférence pour un visage de singe par rapport à un visage humain (catégories plus fines). Cette question est d'autant plus interpellante que, comme nous venons de le voir, ceci reste vrai après un mois de déprivation. La préférence marquée par les singes pour les visages par rapport aux objets pourrait aussi être le résultat de la plus grande nouveauté du visage présenté par rapport à l'objet présenté. En effet, il est possible que les singes aient déjà formé des catégories perceptives grossièrement définies, selon la taille ou le contour du stimulus par exemple, au contact des objets autorisés (voir Figure 14C) et que l'objet présenté ait été associé à l'une d'elles, au contraire du visage présenté. Quoi qu'il en soit, Sugita (2008) interprète cette préférence comme la preuve que l'expérience visuelle précoce et spécifique avec la catégorie des visages n'est pas nécessaire pour que le système de reconnaissance des visages se construise normalement. Par rapport à cette étude, la mise en place particulière du système de reconnaissance des visages des patients ayant souffert de cataracte congénitale opaque (voir Geldart et al., 2002 ; Le Grand et al., 2001 ; 2004 ; Mondloch et al., 2003) pourrait être expliquée par le fait que ces tests ont été pratiqués sur des humains plutôt que sur des singes privés de l'ensemble des inputs visuels et non de certains d'entre eux. Les résultats de l'étude de Sugita (2008) montrent aussi à quel point l'expérience visuelle agit comme un filtre qui modèle les représentations faciales ainsi que les mécanismes de traitement qui y sont associés (voir aussi Pascalis, de Haan, & Nelson, 2002). En effet, les singes ne sont capables de faire la différence qu'entre les visages de l'espèce à laquelle ils ont été confrontés. Enfin, cet article met en exergue l'importance qu'il y a à considérer l'existence de périodes critiques dans l'étude du développement de la fonction de reconnaissance des visages. Sugita (2008) les définit comme de courtes périodes pendant lesquelles l'expérience visuelle a une influence considérable sur la suite du développement. Il souligne qu'elles ne se situent pas forcément juste après la naissance de l'individu puisque les bébés singes récupèrent l'ensemble de leurs facultés de discrimination même après avoir été dépourvus d'expérience visuelle avec des visages pendant quelques mois après la naissance.

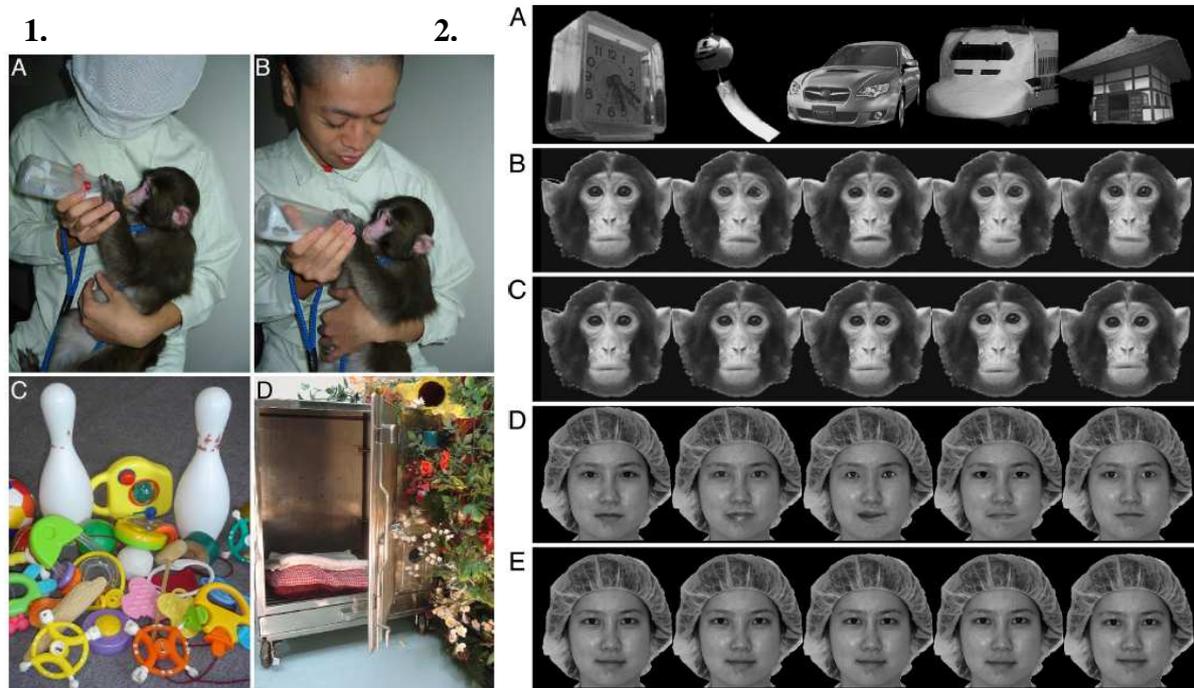


Figure 14 : Extraite de Sugita (2008). 1. Bébé singe élevé sans contact avec des visages (A) ou dans un environnement de visages (B). Jouets (C) et fleurs (D) décorant les cages des singes. 2. Objets (A), visages de singes modifiés au niveau des traits (yeux et bouche) (B) ou des distances relatives entre ces traits (yeux et bouche) (C), visages humains modifiés au niveau des traits (yeux et bouche) (D) ou des distances relatives entre ces traits (yeux et bouche) (E).

Selon nous, les représentations faciales sont probablement innées et grossièrement définies pour permettre d’appréhender les visages quels que soient leur espèce, leur race et leur genre. Les outils de traitement, qu’il s’agisse du traitement local ou du traitement de l’ensemble du visage, le sont probablement également en ce sens qu’ils sont utilisables aussi bien pour traiter des visages que des objets aux alentours de la naissance (voir Deruelle & de Schonen, 1991 ; 1995 ; 1998 ; Ghim & Eimas, 1988). Comme nous le verrons dans la discussion, ceci n’exclut pas que ces outils s’affinent à des rythmes différents avec le temps selon que le développement ait été normal (voir Mondloch, Le Grand, & Maurer, 2002) ou anormal (voir Mondloch et al., 2003). L’expérience visuelle, générale et non spécifique selon l’expérience de Sugita (2008) joue, quant à elle, un rôle fondamental en ce sens qu’elle modèle au jour le jour ces représentations ainsi que les outils de traitement qui lui sont associés.

B. Les nourrissons

a) Des capacités qui se renforcent

Avant l'âge de 1-2 mois, les capacités de reconnaissance des visages sont encore fragiles. Nous l'avons notamment illustré en montrant que les nouveau-nés ne reconnaissent pas le visage de leur mère quand leurs cheveux sont occultés (Pascalis et al., 1995). A ce propos, Bushnell (1982) rapporte que 5 semaines sont nécessaires pour que le nourrisson reconnaisse le visage de sa mère quand ses traits internes sont masqués et 19 semaines quand ses traits externes sont occultés. Bartrip, Morton et de Schonen (2001) évoquent, pour leur part, un délai de reconnaissance plus court, de 6 semaines pour reconnaître ce visage quand la ligne des cheveux est masquée par un foulard. Cette fragilité est également manifeste quand on s'aperçoit qu'à partir d'un mois les nourrissons sont capables de reconnaître le visage de leur mère quand celle-ci est présentée de face et de $\frac{3}{4}$ mais pas de profil (Sai & Bushnell, 1988). Comme pour le visage de la mère, les traits externes prévalent sur les traits internes pour les visages non familiers dans les premiers mois de la vie. Rose, Jankowski et Feldman (2008) ont, par exemple, proposé que les nourrissons de 5 mois utilisent exclusivement les traits externes de visages non familiers pour les reconnaître, contrairement aux nourrissons plus âgés, plus sensibles aux traits internes qu'aux traits externes. La reconnaissance sous différents points de vue s'acquiert aux alentours de 3 mois pour les visages non familiers et résiste alors à l'introduction d'un délai de 2 minutes à 24 heures entre les phases d'habituation et de test (Pascalis, de Haan, Nelson, & de Schonen, 1998).

Les capacités de détection des visages évoluent rapidement et diffèrent déjà entre les nourrissons et les nouveau-nés. Alors que la préférence pour les visages à l'endroit, par opposition aux visages à l'envers, est présente à 3 mois comme elle l'était à la naissance (Macchi Cassia, Kuefner, Westerlund, & Nelson, 2006 ; mais voir Mondloch, Lewis, Budreau, Maurer, Dannemiller, Stephens et Kleiner-Gathercoal, 1999), la préférence pour les schémas géométriques comportant plus d'éléments contrastés dans leur partie supérieure s'atténue dans les premier mois. La préférence pour les visages à l'endroit dont les yeux sont positionnés verticalement plutôt qu'horizontalement dans la partie supérieure du visage disparaît à l'âge de 3 mois, par exemple (Turati, Valenza, Leo, & Simion, 2005). D'autres

changements s'opèrent jusqu'à 12 semaines comme en témoigne l'observation que seuls les nourrissons de cet âge préfèrent regarder un visage schématique à contraste positif qu'un même visage à contraste négatif (Dannemiller & Stephens, 1988 ; Mondloch et al., 1999).

On a démontré que l'ensemble de ces résultats témoigne de l'influence de multiples facteurs actifs dans la petite enfance comme l'inhibition des voies corticales, les relations conflictuelles entre les voies sous-corticales et corticales (Johnson, Farroni, Brockbank, & Simion, 2000) et, plus largement, la lente maturation du système visuel à certains égards (voir aussi Atkinson, Hood, Wattam-Bell, Anker, & Tricklebank, 1988).

b) La question du traitement holistique/configural des visages

Certaines études ont montré que, dès la naissance, les nouveau-nés sont sensibles au fait que le visage est présenté à l'endroit plutôt qu'à l'envers (Acerra, Burnod, & de Schonen, 2002 ; Fantz, 1961 ; Mondloch et al., 1999 ; Simion, Macchi Cassia, Turati, & Valenza, 2003) alors que d'autres ont plutôt appuyé l'idée que cette caractéristique émerge à 2-4 mois (Bhatt, Bertin, Hayden, & Reed, 2005 ; Haaf, 1974). Outre ces études, les recherches menées auprès de nourrissons se sont principalement focalisées sur la présence possible de capacités de traitement holistique/configural des visages à cet âge de la vie. La variabilité des découvertes à ce propos (voir *infra*) résulte fort probablement à la fois de la technique utilisée, de l'âge du plus jeune groupe d'âge testé et du type de manipulation induite sur les visages. Ceci dit, la première étude qui atteste ce type d'habileté dans la petite enfance est celle de Roder, Bates, Crowell, Schilling et Bushnell (1992). Les auteurs y démontrent que les nourrissons de 6 mois et demi sont sensibles à l'inversion de visages schématiques. Comme nous le verrons, l'effet d'inversion des visages a été attribué à l'impossibilité de traiter les visages à l'envers de manière holistique/configurale. En utilisant le paradigme d'habituation, Turati, Sangrigoli, Ruel et de Schonen (2004) ont montré que cet effet est déjà présent chez les nourrissons de 4 mois. Par ailleurs, on a envisagé que les 2 hémisphères cérébraux traitent des informations visuelles différentes et fabriquent, par conséquent, des représentations différentes de l'environnement sur base de la même offre environnementale. Ainsi, l'hémisphère droit (HD) du nourrisson serait plutôt sensible aux informations visuelles liées à la localisation relative des éléments au sein d'un pattern et aux distances entre ces éléments, alors que l'hémisphère

gauche (HG) serait plus sensible à la forme des éléments locaux, que les stimuli utilisés soient des visages photographiés, des schémas de visages ou des patterns géométriques (voir de Haan & Nelson, 1997 ; 1999 ; Deruelle et de Schonen, 1991 ; 1995 ; 1998 ; de Schonen, Deruelle, Mancini, & Pascalis, 1993 ; de Schonen, Gil de Diaz & Mathivet, 1986 ; de Schonen & Mathivet, 1990). Plus récemment, Cohen et Cashon (2001) et Cashon et Cohen (2003) ont aussi fait état des capacités des nourrissons à traiter les distances entre les traits d'un visage à l'aide du paradigme de substitution. Ces auteurs ont, en effet, montré qu'à 4, 7 et 10 mois, ils regardent plus longtemps un visage composé des traits internes d'un visage familial et des traits externes d'un autre visage familial qu'un visage entièrement familial. Ce résultat a été interprété comme témoignant de leur sensibilité à la manière dont ces 2 parties du visage interagissent. L'étude de Schwarzer, Zauner et Jovanovic (2007), suivant celle de Schwarzer et Zauner (2003), évoque la possibilité que cette période de la vie soit caractérisée par le passage d'un mode de traitement analytique à un mode de traitement plus global. Nous reviendrons plus longuement sur ces études dans la discussion. A l'inverse, Bartrip, Morton et de Schonen (2001) suggèrent que vers 6 semaines le nourrisson passe d'un traitement holistique à un traitement soit moins holistique et plus local, soit holistique mais portant sur une autre partie du visage, puisque ce n'est qu'à cet âge qu'il présente une préférence pour le visage de la mère et une reconnaissance de son visage même si la coiffure et la ligne de démarcation visage/cheveux sont masquées par un foulard. Plus classiquement, les capacités de traitement holistique/configural des visages des nourrissons ont également été étudiées au travers de leur sensibilité aux distances relatives entre les différents éléments qui constituent un visage. Thompson, Madrid, Westbrook et Johnson (2001) ont montré, par exemple, que les nourrissons de 7 mois y étaient déjà sensibles puisqu'ils préféraient regarder un visage non manipulé, plus proche de la moyenne des visages (voir Quinn, Yahr, Kuhn, Slater & Pascalis, 2002 ; Valentine, 1991), qu'un visage dont les distances relatives étaient modifiées. Bhatt, Bertin, Hayden et Reed (2005 ; voir aussi Bertin & Bhatt, 2004) ainsi qu'Hayden, Bhatt, Reed, Corbly et Joseph (2007) ont respectivement étendu ce type de sensibilité aux nourrissons de plus de 3 mois en utilisant des visages schématiques et aux nourrissons de plus de 5 mois en utilisant des photographies de visages réels dont les manipulations respectent celles que l'on retrouve dans la population (voir normes de Farkas, 1994).

- c) L'impact de l'expérience visuelle précoce

A partir de 3 mois déjà, les résultats des nourrissons témoignent de l'impact de l'expérience sur la mise en place du système de reconnaissance des visages. L'étude de Fagan (1972) sur des nourrissons de 5-6 mois l'illustre bien : ceux-ci reconnaissent mieux les visages à l'endroit auxquels ils sont confrontés tous les jours que les mêmes visages à l'envers. Comme nous l'avons vu, cette observation s'étend aussi aux nourrissons de 4 mois (Turati et al., 2004). Outre la présence d'un effet d'inversion des visages, l'étude de Sangrigoli et de Schonon (2004) témoigne de la présence d'un effet de race à l'âge de 3 mois encore malléable puisqu'il a pu être annulé par la simple habitude des nourrissons de cet âge à 3 exemplaires de visages d'une autre race. Kelly, Quinn, Slater, Lee, Ge et Pascalis (2007) situent plutôt l'émergence de cet effet entre 6 et 9 mois. A cet âge, les nourrissons montrent aussi un effet de genre déterminé par le sexe des visages présents dans leur environnement. Ainsi, si ces visages sont principalement féminins, ils marqueront une préférence pour les visages féminins par rapport aux visages masculins (Leinbach & Fagot, 1993 ; Quinn, Yahr, Kuhn, Slater, & Pascalis, 2002). Un dernier témoin de l'influence de l'expérience visuelle est l'effet d'espèce que Pascalis, de Haan et Nelson (2002) situent à 9 mois mais pas à 6 mois. Seuls les nourrissons de 9 mois présentent, en effet, de meilleures performances avec les visages humains qu'avec les visages de singes. Parallèlement à cette étude, il est intéressant de constater que Myowa-Yamakoshi, Yamaguchi, Tomonaga, Tanaka et Matsuzawa (2005) ont mis en évidence un effet d'espèce chez des jeunes singes âgés de 4 à 8 semaines, même si les deux travaux ne sont pas directement comparables.

Tout comme le suggère Nelson (2001), il semble que l'exposition prolongée d'un individu, et par conséquent de son système de reconnaissance, à certaines catégories de visages engendre une spécialisation progressive de ses habiletés perceptives. Déterminant les effets évoqués ci-dessus, les représentations s'affinent petit à petit en fonction des visages présents dans l'environnement : des visages d'une orientation donnée (à l'endroit, le plus souvent), d'une espèce donnée (humaine, le plus souvent), d'une race donnée (asiatique en Asie), d'un âge donné (davantage de visages adultes et/ou d'enfants) et d'un genre donné (davantage de visages masculins et/ou féminins). Comme nous le verrons, le rétrécissement de la fenêtre perceptuelle n'empêche pas le système de reconnaissance des visages de rester plastique, même à l'âge adulte. Il est possible, par exemple, de développer un effet perceptif

typique des visages pour une catégorie d'objets appris à l'âge adulte. C'est le cas des experts canins présentés par Diamond et Carey (1986), qui montrent un effet d'inversion aussi bien pour les visages humains que pour les visages de chiens. C'est aussi le cas des institutrices, dont l'expérience intensive avec des visages d'enfants influence le degré de traitement holistique qui leur est appliqué (voir Etude N°4). Nous y reviendrons.

C. Les petits et grands enfants

a) Position du problème

Malgré les capacités précoces dont témoignent les nouveau-nés et les nourrissons pour reconnaître les visages, de nombreuses études montrent que l'expertise adulte n'est atteinte qu'à l'adolescence (voir par exemple, Carey, 1992 ; Carey, Diamond et Woods, 1980). Si cette observation fait globalement l'unanimité, la question tourne plutôt aujourd'hui autour de la nature des mécanismes de traitement qui pourraient expliquer le fait que les enfants sont effectivement moins bons pour reconnaître les visages que les adultes. Pour certains, la réponse tient dans le fait que les jeunes enfants utilisent des traitements différents de ceux appliqués par les enfants plus âgés ou les adultes (voir par exemple, Carey et Diamond, 1977). Dans cette optique, les meilleures aptitudes des adultes pour reconnaître les visages s'expliquent par leurs capacités soudaines à recourir à un mécanisme de traitement spécifique aux visages, le traitement holistique/configural. De manière plus modérée, des auteurs comme Mondloch, Le Grand et Maurer (2002) évoquent la possibilité que ce traitement spécifique aux visages se mette en place plus lentement au cours du développement de l'enfant que le traitement de l'information locale. A l'inverse, d'autres chercheurs refusent d'expliquer les performances plus faibles des enfants en reconnaissance des visages par un facteur spécifique aux visages et insistent sur l'influence potentiellement négative de facteurs généraux comme l'attention, la mémoire (voir par exemple Mckone & Boyer, 2006; Pascalis, Demont, de Haan, & Campbell, 2001 ; Pellicano, Rhodes, & Peters, 2006).

Pour trancher entre ces deux positions, il peut être intéressant de comparer les trajectoires développementales du traitement des visages d'une part, et de stimuli contrôlés, d'autre part. Si seuls des facteurs généraux influencent les capacités des enfants à reconnaître

les visages, les trajectoires associées à ces 2 catégories visuelles devraient être identiques. En revanche, si un ou plusieurs facteur(s) spécifique(s) à la reconnaissance des visages sont impliqués, une interaction entre l'âge et la capacité à traiter les visages et les stimuli contrôles devrait être observée. Les visages à l'envers sont les stimuli contrôles les plus souvent utilisés car ils sont identiques aux visages à l'endroit en termes de propriétés de bas niveau et de complexité avec, pour seule différence, une inversion de la phase des images. L'expertise pour les visages à l'endroit ne se généralise pas non plus aux visages à l'envers de sorte que, quelles que soient les causes de l'effet d'inversion des visages (Rossion, 2008), les visages à l'envers constituent de très bons stimuli contrôles.

b) L'amélioration des performances avec l'âge

Parallèlement à l'investigation d'un objectif propre, nombreuses sont les études qui ont montré que les performances des enfants en reconnaissance de visages à l'endroit s'améliorent avec l'âge (voir par exemple, Brace, Hole, Kemp, Pike, Van Duuren, & Norgate, 2001 ; De Sonnevile Vershoor, Njiokiktjien, Op het Veld, Toorenarr, & Vranken, 2002 ; Itier & Taylor, 2004 ; Mondloch et al., 2002 ; Pascalis, Demont, de Haan, & Campbell, 2001 ; Pellicano & Rhodes, 2003 ; Tanaka, Kay, Grinnell, Stanfield, & Szechter, 1998). Depuis les années soixante, d'autres chercheurs se sont intéressés de manière plus directe à l'évolution de ces performances. Goldstein et Chance (1964) ont, par exemple, démontré que les performances des enfants de 6, 9 et 14 ans augmentent avec l'âge en utilisant une tâche dans laquelle des visages doivent être mémorisés et ensuite retrouvés parmi un ou plusieurs distracteurs. Quelques années plus tard, Saltz et Sigel (1967) ont observé que même les résultats des adolescents sont plus faibles que ceux des adultes. Feinman et Entwisle (1976), ont indiqué pour leur part que, si les performances des enfants en reconnaissance de visages s'améliorent entre 8 et 11 ans, âge auquel elles avoisinent celles des adultes, cette amélioration est encore plus impressionnante entre 6 et 8 ans. Au même moment, Carey et Diamond (1977) ont avancé que les scores des enfants de 6, 8 et 10 ans augmentent régulièrement quand il s'agit de reconnaître des visages à l'endroit (respectivement 69%, 81% et 89%). Blaney et Winograd (1978) se sont ralliés à cette conclusion en rapportant des taux de 58%, 62% et 72% pour des enfants de 6, 8 et 10 ans. A l'heure actuelle, outre l'étude de Bruce, Campbell, Doherty-Sneddon, Import, Langton, McAuley et Wright (2000) qui indique

l'évolution des performances d'enfants de 4 à 11 ans dans des tâches impliquant l'identité et l'expression faciale, l'étude la plus souvent rapportée pour évoquer le fait que les scores des enfants en reconnaissance des visages s'améliorent avec l'âge est celle de Carey et collaborateurs (1980). Ces auteurs montrent que les performances des enfants de 6 à 16 ans au test de Benton et Van Allen (1968) augmentent de manière non linéaire avec un plateau entre 10 et 14 ans. Dans le même ordre d'idées, Lawrence, Bernstein, Pearson, Mandy, Campbell et Skuse (2008) ont soumis des enfants de 6 à 16 ans au test de Warrington (1984). Sur base de leur pourcentage de réponses correctes, ils ont mis en évidence un accroissement linéaire des performances entre 6 à 10 ans, une phase plateau entre 10 et 13 ans et des résultats qui continuent à croître après 13 ans. Pour terminer, il est important de souligner que la préadolescence a à la fois été décrite comme une période où les performances se stabilisent (Carey et al., 1980 ; Lawrence et al., 2008) et s'affaiblissent (voir Figure 15 ; Carey, 1992 ; Ellis, 1992 ; Ellis & Flin, 1990 ; Flin, 1980 ; 1985, Flin & Dziurawiec, 1989) (pour une revue à ce sujet, voir Chung & Thomson, 1995). Enfin, l'âge exact auquel les performances des enfants avoisinent celles des adultes n'est, à ce jour, pas encore déterminé (10 ans, Carey, 1992 ; 11 ans, Feinman & Entwisle, 1976 ; 16 ans, Carey et al., 1980).

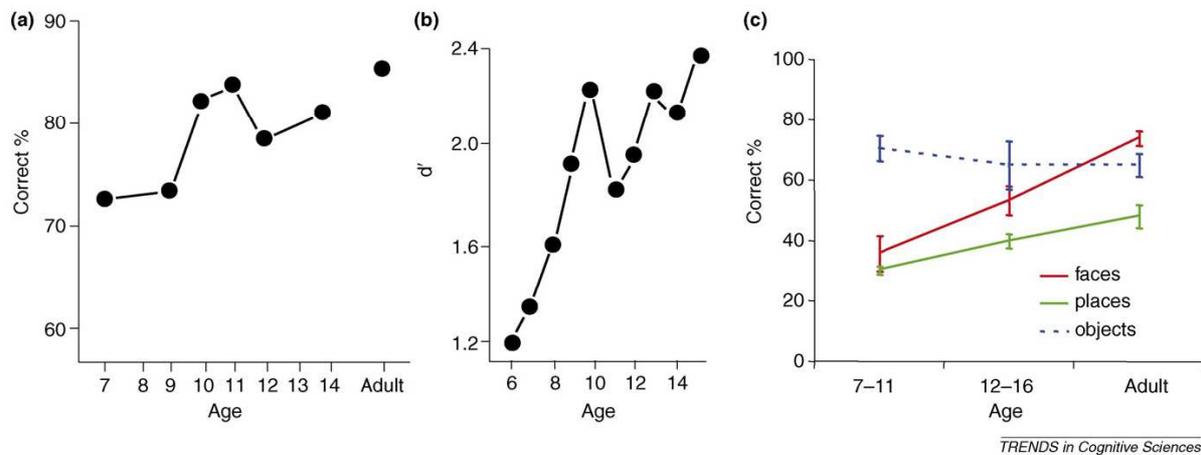


Figure 15 : Extraite de Grill-Spector, Golorai et Gabrieli (2008). Carey (1992 ; a) et Flin (1980 ; b) rapportent une augmentation des performances avec l'âge en reconnaissance de visages à l'endroit ainsi qu'une chute des performances à la puberté. Golorai et collaborateurs (2007) démontrent que les capacités de reconnaissance augmentent pour les visages (rouge) et les lieux (vert) mais pas pour les objets (bleu).

c) Les effets de l'expérience visuelle

Les recherches se sont principalement axées sur 2 effets pour illustrer l'impact de l'expérience visuelle sur le système de reconnaissance des visages dans l'enfance et à l'âge adulte. Il s'agit de l'effet d'âge (« Other-age effect », OAE) et de l'effet de race (« Other-race effect », ORE) des visages. Le premier a été indirectement investigué dans l'Etude N°4 consacrée à l'influence de l'environnement visuel sur le système adulte de reconnaissance des visages. Le second a directement été utilisé dans l'Etude N°3 qui illustre l'influence d'un changement radical d'environnement de visages sur l'effet de race d'enfants asiatiques adoptés dans des familles européennes.

L'effet d'âge est l'un des témoins de l'influence continue de l'expérience visuelle sur le système de reconnaissance des visages. Il est probablement moins documenté que l'effet de race parce qu'il est difficile de trouver des individus dépourvus d'expérience avec des visages d'enfants, d'autant plus qu'ils ont eux-mêmes été enfants et ont donc été en contact avec cette catégorie de visages. On trouve cependant des individus dont l'expérience avec les visages d'enfants est quotidienne : les institutrices, par exemple. Il a été montré qu'elles traitent aussi bien les visages d'enfants que les visages d'adultes, contrairement aux adultes qui ne sont

jamais en contact avec cette première catégorie de visages (Kuefner, Macchi Cassia, Picozzi, & Bricolo, 2008). Toujours à propos de l'effet d'âge, il apparaît que les adultes estiment l'âge de visages adultes photographiés avec une marge d'erreur de 2 à 4 ans (voir par exemple, Burt & Perrett, 1995 ; George & Hole, 1995 ; 2000 ; Sörqvist & Eriksson, 2007). Dans une revue récente, Rhodes (sous presse) avance que l'on se base principalement sur des traits globaux comme la forme du crâne, des traits internes du visage comme les yeux, la texture et la couleur de la peau ainsi que des informations de distance entre les traits du visage pour estimer correctement l'âge de personnes photographiées. D'un autre côté, elle insiste sur l'importance de l'âge de l'observateur. En effet, les adultes plus âgés reconnaissent mieux les visages d'adultes plus âgés que ceux d'enfants (Anastasi & Rhodes, 2005) ou ceux d'adultes plus jeunes (Backman, 1991 ; Lamont, Stewart-Williams, & Podd, 2005). Les jeunes adultes, eux, reconnaissent mieux les visages de jeunes adultes que les visages d'adultes plus âgés (Backman, 1991). De même, les enfants de 5 à 8 ans reconnaissent mieux les visages d'enfants de cet âge que les visages de jeunes adultes et d'adultes plus âgés (Anastasi & Rhodes, 2005 ; voir aussi George & Hole, 2000 ; Lamont et al., 2005 ; Weinberger, 1979). Ce dernier résultat n'a pas toujours été répliqué puisqu'il a aussi été montré que des enfants de 8 ans reconnaissent aussi bien des visages d'enfants que des visages adultes (Mondloch, Maurer, & Ahola, 2006). La contradiction s'étend plus loin encore quand on s'aperçoit qu'un effet d'âge est observé chez de jeunes adultes mais pas chez des adultes plus âgés (Bartlett & Leslie, 1986 ; Fulton & Bartlett, 1991 ; Wright & Stroud, 2002) et, à l'inverse, chez des adultes plus âgés mais pas chez des adultes plus jeunes (Anastasi & Rhodes, 2006 ; Lamont et al., 2005 ; Perfect & Harris, 2003).

De la même manière, il est communément admis que les individus sont meilleurs pour discriminer et reconnaître des visages de leur race que des visages d'une autre race. Ce phénomène est connu dans la littérature comme l'effet de race des visages. Sa robustesse et sa fiabilité ont été démontrées en comparant les performances de reconnaissance d'observateurs élevés dans des environnements de visages différents (voir revue de Meissner & Brigham, 2001). Il a été attribué au manque d'expérience visuelle pour traiter les visages d'une race différente de la sienne par rapport aux visages de sa propre race (voir par exemple, Le, Farkas, Ngim, Levin, & Forrest, 2002). Il n'existe cependant pas de consensus sur la manière dont l'expérience différentielle avec les visages de sa propre ou d'une autre race sous-tend l'effet

en question (Slone, Brigham, & Meissner, 2000). Certains auteurs ont émis l'idée que le système perceptif était incapable de généraliser l'expertise acquise pour traiter les visages de sa propre race aux visages d'une autre race (voir par exemple, Goldstein & Chance, 1980 ; Rhodes, Tan, Brake, & Taylor, 1989), ce qui mènerait à des représentations différentes dans l'un et l'autre cas (voir par exemple, Valentine, 1991). Dans la même ligne, des études récentes ont établi un lien entre cette différence de représentation et le fait que les traits des visages d'une autre race sont moins fortement intégrés au sein d'une représentation globale, holistique, que les traits des visages de sa propre race (Michel, Caldara, & Rossion, 2006a ; Michel, Rossion, Han, Chung, & Caldara, 2006b ; Tanaka, Kiefer, & Bukach, 2004). D'autres auteurs ont préféré une explication sociocognitive du phénomène : les performances plus faibles des individus avec les visages d'une autre race seraient dues à l'attention portée à la catégorie (la race) aux dépens de ses exemplaires (les individus) (voir par exemple, Levin, 2000). Peu d'études se sont intéressées à l'effet de race au cours du développement (Brigham, 2002). L'effet de race a été noté chez des adolescents de 13 à 16 ans (Walker & Hewstone, 2006), des adolescents de 9 à 20 ans (Corenblum & Meissner, 2006), des participants de 6 à 20 ans (Chance, Turner, & Goldstein, 1982 ; Goldstein & Chance, 1980), des enfants de 3 à 5 ans (Sangrigoli & de Schonen, 2004a), des nourrissons de 6 à 9 mois (Kelly et al., 2007b) et des nourrissons de 3 mois (Sangrigoli & de Schonen, 2004b). D'autres auteurs comme Feinman et Entwhistle (1976) et Pezdek, Blandon-Gitlin et Moore (2003) ont renforcé l'idée d'un effet de race qui émergerait pendant l'enfance en testant des enfants caucasiens et non caucasiens. C'est également le cas de Goodman et collaborateurs (2007) qui ne rapportent toutefois pas d'effet de race chez des enfants de 5 et 7 ans mais bien chez des enfants plus âgés. Parallèlement à cela, il est important de noter que les nourrissons de 3 mois, et non les nouveau-nés, préfèrent regarder des visages inconnus de leur propre race que ceux d'une autre race (Bar-Haim, Ziv, Lamy & Hodes, 2006 ; Kelly Quinn, Slater, Lee, Gibson, Smith, Ge, & Pascalis, 2005 ; Kelly, Liu, Ge, Quinn, Slater, Lee, Liu, & Pascalis, 2007a). Ce phénomène a été interprété comme étant à l'origine de la meilleure discrimination des visages de sa propre race. La courbe de développement de l'effet de race n'est toujours pas claire à ce jour. Alors que Chance et collaborateurs (1982) ainsi que Feinman et Entwhistle (1976) ont suggéré que l'effet de race augmente avec l'âge, d'autres études ont proposé que, même s'il apparaît très tôt, cet effet reste stable au travers du développement (Corenblum & Meissner, 2006 ; Pezdek et al., 2003 ; Sangrigoli & de Schonen, 2004a). Notre opinion à ce propos (voir aussi Etude

N°3) est que l'effet de race émerge tôt au cours du développement, probablement aux alentours de 3 mois (voir Sangrigoli & de Schonen, 2004b), quand suffisamment d'expérience a été accumulée avec les visages de sa propre race. Selon les résultats de l'Etude N°3, l'effet de race n'augmente pas avec l'âge mais nous ne pouvons pas exclure qu'une autre tâche l'évaluant de manière plus subtile ne puisse donner lieu à d'autres observations.

Aujourd'hui, nous imaginerions plutôt qu'au fil du temps les représentations s'affinent de plus en plus pour certaines catégories de visages, des visages d'un âge et d'une race donnée, ceci pour autant que l'environnement du sujet reste stable. Nous verrons en effet que l'effet de race des visages est modulé quand un individu subit un changement important d'environnement visuel au cours de son développement (voir l'Etude 3 qui recouvre partiellement les résultats de Sangrigoli et collaborateurs, 2005). L'idée que les représentations faciales s'ajustent au milieu est renforcée par le fait que la composante holistique du traitement des visages est grandement impliquée dans la reconnaissance des visages de sa propre race (Michel et al., 2006). Nous pensons qu'elle évolue encore pendant l'enfance et reviendrons sur ce point dans la discussion.

d) L'apport des facteurs spécifiques dans l'évolution des performances

Comme nous l'avons déjà exposé, certains auteurs font prévaloir l'idée que les enfants utilisent des mécanismes différents des adultes pour reconnaître les visages (Brace, et al., 2001; Carey et al., 1977; Mondloch, Leis, & Maurer, 2006; Schwarzer, 2000; 2002) ou qu'ils les utilisent différemment des adultes (Carey et al., 1980 ; 1992 ; 1994 ; Freire & Lee, 2001 ; Mondloch et al., 2002 ; Mondloch, Geldart, Maurer, & Le Grand, 2003; Mondloch, Dobson, Parsons, & Maurer, 2004; Mondloch, Pathman, Maurer, Le Grand, & de Schonen, 2007). L'absence ou l'immaturité de ce(s) mécanisme(s) spécifique(s) à la reconnaissance des visages expliquerait les performances globalement plus faibles des enfants dans les tâches impliquant ces stimuli.

Dans leur première étude menée auprès d'enfants de 6, 8 et 10 ans, Carey et Diamond (1977 ; voir aussi Diamond & Carey, 1977) ont rapporté que l'effet d'inversion des visages (FIE) n'émerge qu'à 10 ans, âge auquel les enfants ont donc été déclarés capables de traiter

les visages non plus uniquement sur base de leurs traits mais aussi sur base des distances entre les traits, comme les adultes. Les mêmes auteurs ont également montré que les enfants de 10 ans étaient moins perturbés que les enfants de 6 et 8 ans par la présence d'accessoires comme des lunettes ou une moustache (« paraphernalia effect »). En effet, pour retrouver le visage cible, les enfants de 10 ans basaient leur jugement sur l'identité des visages plutôt que sur la présence d'un même accessoire. Trois années plus tard, ces auteurs (voir Carey et al., 1980 ; Carey, 1992) se ravisent suite à l'observation que des enfants de 10 ans ne sont pas significativement meilleurs pour reconnaître des visages à l'envers que des enfants de 6 ans alors qu'ils le sont quand il s'agit de reconnaître des visages à l'endroit. Ils évoquent alors la possibilité que l'amélioration avec l'âge des compétences des enfants en reconnaissance de visages à l'endroit soit due à l'acquisition progressive d'un type de traitement spécifique tel que le traitement des distances relatives contenues dans un visage. Quelques années plus tard encore, Carey et Diamond (1994) abandonnent l'idée que ce phénomène soit, parallèlement ou en plus du traitement des distances relatives, attribuable au développement du traitement holistique des visages puisqu'ils trouvent un effet de composite stable de 6 ans à l'âge adulte. Nous reviendrons sur l'apparente stabilité du traitement holistique des visages quand il est mesuré au travers de l'effet de composite à propos de l'Etude N°2.

A la lumière de ces découvertes, Brooks et Goldstein (1963), Goldstein (1975), Pedelty Levine et Shevell (1985), Tanaka et collaborateurs (1998) ainsi que Young et Bion (1980) ont suggéré que les enfants arrivent plus rapidement au stade adulte de reconnaissance pour les visages à l'envers que pour les visages à l'endroit. Un autre groupe de chercheurs (Mondloch et al., 2002 ; 2003 ; 2004 ; 2007) a plus récemment repris l'idée que le traitement des distances relatives, en tant que traitement appliqué de manière spécifique aux visages, pouvait expliquer l'amélioration des performances des enfants avec l'âge. Selon ces auteurs, ce type de traitement se met lentement en place au cours du développement de l'enfant à l'opposé du traitement de l'information locale présent dès la naissance (Turati & Simion, 2002). Dans leur étude initiale (2002), Mondloch et collaborateurs ont comparé les performances d'adultes et d'enfants de 6, 8 et 10 ans en reconnaissance de visages à l'endroit et à l'envers. Concrètement, les participants étaient confrontés à un visage présenté à l'endroit ou à l'envers pendant 200 ms et ensuite à un autre visage qui différait du premier au niveau du contour externe, des traits internes (yeux et bouche) ou des distances entre ces traits (voir Figure 16).

Le niveau adulte était atteint à 6 ans pour le set de visages qui impliquait des modifications au niveau du contour et à 10 ans pour celui qui impliquait des modifications locales. Au contraire, bien que supérieurs au niveau du hasard, les enfants de 10 ans continuaient à obtenir des scores plus faibles que les adultes pour les visages manipulés au niveau des distances relatives. McKone et Boyer (2006) ont contesté ces résultats en soulignant l'absence d'égalisation du seuil de difficulté entre les 3 conditions ainsi que l'hétérogénéité de la disposition du bonnet dans la condition contour. Une année plus tard, Mondloch et collaborateurs (2003) confirment pourtant leurs observations auprès d'enfants de 6, 8 et 10 ans en utilisant des tâches plus écologiques. Ils avancent que seule la tâche d'appariement sur base de l'identité malgré un changement d'orientation de la tête, qui implique le traitement de distances relatives, est affectée par l'inversion et pas tout à fait mature à l'âge de 10 ans. En 2004, les mêmes auteurs ajoutent que des manipulations au niveau de la salience des stimuli, du temps de présentation des visages ou de l'aspect grotesque des visages n'influencent que modérément les résultats des enfants puisque l'hypothèse d'une lente mise en place du traitement des distances relatives est confirmée quand ces variables sont contrôlées. Dans une autre étude publiée à ce propos, Mondloch, Leis et Maurer (2006) ont proposé que les enfants de 4 ans ne sont pas sensibles aux manipulations induites sur les distances entre les traits d'un visage car ils obtiennent des scores inférieurs au niveau du hasard quand les visages sont manipulés à ce niveau. Une nouvelle étude (Mondloch, Maurer, & Ahola, 2006) leur a notamment permis d'ajouter que la sensibilité aux informations de distance est spécifique aux visages humains puisque les adultes y sont plus sensibles que quand de telles manipulations apparaissent sur des visages de singes. A la lumière de l'article de Carey et Diamond (1994), Mondloch, Pathman, Maurer, Le Grand et de Schonen (2007) ont enfin éliminé la composante holistique comme seule source de l'amélioration des performances des enfants avec l'âge car les enfants de 6 ans marquent un effet composite comparable à celui des adultes. Selon ces auteurs, le traitement holistique est donc nécessaire mais pas suffisant pour acquérir l'expertise adulte en reconnaissance de visages.



Figure 16 : Visages de « Jane » extraits de Mondloch, Le Grand et Maurer (2002). Le visage original se retrouve au début de chaque ligne parmi ses « sœurs » différant du visage original par la distance relative entre les traits (A), la forme des traits (B) ou le contour externe (C).

L'idée de l'implication d'un facteur spécifique aux visages pour expliquer les moindres performances des enfants a récemment été soutenue à différents degrés par d'autres auteurs. Les conclusions de Schwartz (2000 ; 2002) sont radicales et rappellent celles de Carey et Diamond (1977), avec l'idée d'un passage d'un mode de traitement (analytique/local) à un autre (holistique/configural). Dans ses 2 études, elle a proposé à des adultes et à des enfants de 7 et 10 ans (2000) ainsi qu'à des enfants de 2 à 5 ans (2002) de catégoriser des visages schématiques à l'endroit et à l'envers. Les catégories sont construites de manière à ce que la catégorisation se fasse sur une base analytique (en se focalisant sur un trait du visage) ou holistique (en tenant compte de la globalité du visage). L'auteur a observé d'une part que les enfants de 2 à 5 ans et les enfants de 7 ans traitent les visages à l'endroit et à l'envers de manière analytique, d'autre part que, de l'âge de 10 ans à l'âge adulte, la catégorisation s'opère sur une base de plus en plus holistique, et ce au détriment du traitement analytique. Dans le même sens, Brace et collaborateurs (2001) ont suggéré que le traitement holistique/configural n'apparaît qu'à l'âge de 5 ans puisque des enfants de 2 à 4 ans, testés

dans une courte tâche de reconnaissance de visages à l'endroit et à l'envers, présentent un effet d'inversion inversé, soit des temps de réaction plus courts quand il s'agit de reconnaître des visages à l'envers que des visages à l'endroit. Freire et Lee (2001) ont, plus simplement, suggéré que même si les enfants de 4 à 7 ans sont sensibles aux modifications réalisées sur les traits et les distances entre ces traits, ils pourraient marquer un avantage pour ce premier type de traitement.

e) L'apport des facteurs généraux dans l'évolution des performances

A l'inverse, pour d'autres auteurs, l'évolution des habiletés à reconnaître les visages à l'endroit sont attribuables à des facteurs généraux puisque les enfants utilisent les mêmes traitements que les adultes pour reconnaître les visages, et dans la même mesure. Même s'ils ne spécifient pas toujours le type de traitement dont il s'agit, les défenseurs de cette perspective utilisent comme argument de prédilection l'observation que les fonctions de reconnaissance de visages à l'endroit et à l'envers suivent des trajectoires développementales similaires ; ils suggèrent par conséquent que rien n'est spécifique aux visages à l'endroit (Flin, 1985). Pour Pedelty et collaborateurs (1985), les enfants et les adultes utilisent des informations comparables dans les tâches de jugement de visages même si les jeunes enfants appréhendent moins de traits de manière simultanée que les adultes. Il est vrai qu'un certain nombre de données montrent une absence de modification des effets de l'expérience, comme l'effet d'inversion des visages ou l'avantage du tout sur les parties, entre 3 et 8 ans, ce qui pourrait suggérer que seuls des facteurs généraux (mémoire, attention, par exemple) entrent en compte dans le développement des compétences liées aux visages. Pellicano et Rhodes (2003 ; voir aussi Pellicano, Rhodes, & Peters, 2006), par exemple, ont confronté des enfants de 4 à 6 ans à des visages à l'endroit et à l'envers et ont observé qu'ils marquaient un avantage du tout sur les parties ainsi qu'un effet d'inversion qui n'évoluaient pas avec l'âge. De même, Gidchrist et McKone (2003) ont suggéré que les enfants de 7 ans et les adultes montrent un effet d'inversion comparable quand les visages sont manipulés au niveau des traits (ex : l'épaisseur des sourcils) et au niveau de leur distances relatives (ex : distance entre les yeux). McKone et Boyer (2006) ont étendu ces résultats aux enfants de 4 ans. Itier et Taylor (2004) ont également constaté que les capacités de reconnaissance des visages à l'endroit et à l'envers suivent la même trajectoire développementale de 8 ans à l'âge adulte,

tout en étant constamment influencées et à des degrés croissants par la mémoire de travail. Enfin, Pascalis et collaborateurs (2001 ; voir aussi Want et al., 2003) ont suggéré que les performances d'enfants de 5 et 8 ans n'évoluaient pas différemment pour les visages de leur propre espèce (humaine) ou d'autres espèces (moutons, singes), ce qui indique selon eux qu'aucun facteur spécifique à la reconnaissance des visages humains n'est impliqué dans la faiblesse des performances des enfants par rapport aux adultes.

f) Quelle position adopter ?

Comme nous venons de le voir, les positions soutenues par les auteurs sont généralement tranchées. Elles vont dans le sens de l'implication de facteurs spécifiques ou généraux, même si certains (voir par exemple Mondloch et al., 2002) proposent de concilier ces deux sources d'influence. Nous pensons, quant à nous, qu'il est préférable d'adopter une position plus nuancée qui s'appuie sur ces 2 perspectives. Plus exactement, nous pensons que la trajectoire développementale de la fonction de reconnaissance des visages se caractérise par la mise en place graduelle d'un outil de traitement spécifique, le traitement holistique, entraînant inéluctablement la capacité à extraire les informations de distance contenues dans les visages. Nous n'excluons toutefois pas l'influence de variables cognitives générales telles que la mémoire, l'attention, les critères de décision ou même, dans une moindre mesure, la motivation générale et les capacités langagières de l'enfant. Nous reviendrons longuement sur ce point dans la discussion. Nous allons à présent discuter de l'apport des travaux relatifs à l'autisme et à la prosopagnosie congénitale/développementale pour comprendre la manière dont se met en place de la fonction de reconnaissance des visages au cours du temps. Nous passerons ensuite en revue les études d'électrophysiologie et d'imagerie cérébrale fonctionnelle susceptibles d'apporter des réponses à ce propos.

g) La prosopagnosie congénitale/développementale

La prosopagnosie congénitale/développementale est généralement définie comme un trouble de la reconnaissance des visages présent depuis la naissance (congénitale) ou la petite enfance (développementale) en l'absence de lésion cérébrale apparente et de troubles neuro-développementaux concomitants. Les termes « congénital » et « développemental » associés à

ces cas de prosopagnosie non-lésionnelles sont pourtant le plus souvent employés de manière interchangeable (Le Grand, Cooper, Mondloch, Lewis, Sagiv, de Gelder, & Maurer, 2006). Depuis peu, la littérature abonde d'études sur le sujet (voir par exemple Duchaine, & Nakayama, 2006 ; Kennerknecht, Plüempe, & Welling, 2008) alors que la prosopagnosie congénitale/développementale était jugée il y a peu comme une pathologie rare (voir Kress & Daum, 2003). Ce phénomène a récemment donné lieu à des recherches portant sur des groupes de sujets (Barton, 2003 ; Behrmann & Avidan, 2005 ; Le Grand, 2006). Or celles-ci n'ont pas la rigueur des investigations par cas uniques que l'on retrouve dans l'étude des patients atteints de prosopagnosie acquise à la suite d'une lésion cérébrale. Quand elles ont été menées auprès d'enfants de 5 à 15 ans après une lésion unilatérale pré- ou péri-natale occipito-temporale droite ou gauche, les déficits observés se sont révélés importants et indépendants du côté de la lésion, ce qui suggère une solidarité entre les deux hémisphères dans le développement de leur spécialisation fonctionnelle (de Schonen, Mancini, Camps, Maes, & Laurent, 2005). Pour en revenir à ces études de groupe, elles ne se sont pas non plus avérées concluantes pour mettre en évidence des facteurs explicatifs communs aux cas de prosopagnosie congénitale/développementale. Faute d'études approfondies sur le sujet, il est difficile de déterminer à partir de quel moment on doit considérer qu'une personne qui se plaint de difficultés à reconnaître les visages depuis la naissance est prosopagnosique. Enfin, le trouble s'est révélé hétérogène, qu'il soit analysé au niveau de la population des prosopagnosiques congénitaux/développementaux ou au niveau même des individus (voir Thonon, Busigny, & Rossion, 2008). Pour toutes ces raisons, nous pensons qu'il est encore trop tôt pour tirer profit de ces travaux si l'objectif est de rendre compte de l'émergence et du développement normal de la fonction de reconnaissance des visages à travers le temps. Il faut néanmoins signaler qu'en étudiant une famille composée de nombreux individus prosopagnosiques congénitaux/développementaux, Kennerknecht et collaborateurs (2008) ont observé des résultats compatibles avec l'idée d'une hérédité autosomale dominante.

h) L'autisme

La littérature regorge de travaux qui décrivent la présence de comportements sociaux atypiques chez les enfants qui seront diagnostiqués plus tard comme autistes. Ces enfants présentent des stéréotypies, peu de confrontations visuelles avec les personnes qui les

entourent, peu d'orientations vers les visages, peu de sourires sociaux, un manque d'expressions faciales et de réponses à la voix des parents, peu de tentatives de jeux ou d'interactions sociales ainsi qu'un manque d'imitation spontanée (pour une revue, voir Volkmar, Chawarska, & Klin, 2005). Dans le but d'éclaircir les déficits cognitifs et sociaux des autistes, les recherches expérimentales se sont notamment focalisées sur leurs capacités à traiter les visages (Schultz, 2005). Qu'elles aient testé leurs aptitudes à reconnaître les visages familiers (voir par exemple Boucher, Lewis, & Collins, 1998) ou non familiers (voir par exemple Boucher & Lewis, 1992), leurs capacités à apparier les expressions faciales (voir par exemple Celani, Battacchi, & Arcidiacono, 1999), la présence d'habiletés holistiques/configurales (Langdell, 1978) ou un avantage du traitement de la bouche sur le traitement des yeux (voir par exemple Joseph & Tanaka, 2003), les études présentent des résultats mitigés attribués à l'hétérogénéité des patterns observés au sein même de la population étudiée (Jemel, Mottron, & Dawson, 2006). Il est toutefois important de noter que les autistes semblent éprouver des difficultés à reconnaître les visages, surtout quand ils sont présentés en basses fréquences spatiales (LSF). L'autisme ne serait donc pas un trouble spécifiquement lié aux visages en tant qu'objets sociaux mais plutôt un trouble impliquant des anomalies du développement de certains traitements appliqués tant aux visages qu'aux objets (Deruelle, Rondan, Gepner, & Tardif, 2004). Comme pour la prosopagnosie congénitale/développementale, il est encore difficile à l'heure actuelle d'utiliser les recherches réalisées sur les personnes autistes pour mettre en lumière la façon dont se met habituellement en place la fonction de reconnaissance des visages.

i) Les études en électrophysiologie

Telle qu'elle a été appliquée aux nourrissons, la technique des potentiels évoqués cognitifs nous offre des éléments de réponse qui penchent en faveur de la spécialisation progressive des circuits corticaux impliqués dans la reconnaissance des visages. Bien que l'interprétation qui suit ne fasse pas l'unanimité, il semble tout de même possible de distinguer au moins 2 composantes différentes, sensibles aussi bien à la présence d'un visage humain qu'à l'inversion d'un visage, et ce pendant la première année de vie (Halit, de Haan, & Johnson, 2003 ; de Haan, & Nelson, 1999 ; de Haan, 2001 ; de Haan, Humphreys, & Johnson, 2002 ; de Haan, Pascalis, & Johnson, 2002). Il s'agit de la « N290 » (composante

négative induite environ 290 ms après l'apparition du stimulus) et de la « P400 » (composante positive induite après 400 ms), qui sont maximales au niveau des régions occipito-temporales du scalp. De Haan, Johnson et Halit (2003) ont émis l'hypothèse que la spécificité fonctionnelle de la N170 adulte émergerait de ces 2 composantes. Alors que les fixations visuelles des nourrissons de 3 à 6 mois sont plus importantes pour les visages à l'endroit qu'à l'envers (Simion, données non publiées), la N290 n'est pas affectée par l'inversion d'un visage mais est plus ample pour les visages humains que pour les visages de singes entre 3 et 6 mois (de Haan et al., 2002 ; Halit et al., 2003 ; Macchi Cassia et al., 2006). Ce n'est qu'entre 7 et 12 mois que cette composante est modulée par l'inversion de la même manière que la N170 (de Haan et al., 2002 ; Halit et al., 2003). A l'inverse, la P400 des nourrissons de 3 à 6 mois est affectée par l'inversion mais ne répond pas de manière spécifique aux visages humains puisque elle est aussi ample pour cette catégorie que pour les visages de singes (de Haan et al., 2002 ; Halit et al., 2003). En outre, la P400 pointe déjà plus précocement pour les visages que pour les objets à l'âge de 6 mois (de Haan & Nelson, 1999). Ce n'est qu'à 12 mois que l'on peut véritablement considérer que la N290 et la P400 répondent de manière comparable à ce que l'on observe sur la N170 adulte, notamment au niveau des effets induits par l'inversion (de Haan, Johnson, & Halit, 2003 ; Halit et al., 2003). Outre la N290 et la P400, la littérature fait également état d'une composante attentionnelle, la « Nc » (« Negative component ») et d'une composante mnésique, la « PSW » (« Positive Slow Wave »), révélées dans des tâches impliquant des visages familiers (Carver et al., 2003 ; de Haan & Nelson, 1997 ; 1999 ; Pascalis, de Haan, Nelson, de Schonen, 1998). Il est difficile d'utiliser ces données pour expliquer le développement de la fonction de reconnaissance des visages en référence à des facteurs spécifiques ou généraux car ces études ne se sont pas véritablement centrées sur les modes de traitement utilisés par les nourrissons. Néanmoins, elles laissent apparaître que leurs traitements perceptifs progressent en se spécifiant au fil du développement. Les traitements changent, deviennent plus performants pour une catégorie plus spécifique d'objets, tant au niveau comportemental qu'au niveau de l'électrophysiologie (voir aussi Nelson 2001).

Inversément, les données des études électrophysiologiques menées sur les enfants (pour l'essentiel, voir Itier & Taylor, 2002 ; 2004a ; 2004b ; 2004c ; 2004d ; 2004e ; 2004f ; Taylor, McCarthy, Saliba, & Degiovanni, 1999 ; Taylor, Edmonds, McCarthy, & Allison, 2001 ; Taylor, Chevalier, & Lobaugh, 2003 ; Taylor, Batty, & Itier, 2004) penchent plutôt en faveur

de l'importance des facteurs généraux pour expliquer le développement de la reconnaissance des visages, même si les auteurs ne sont pas toujours clairs sur l'interprétation qu'ils font de leurs propres résultats. A la lecture des différents articles, il apparaît premièrement que dès l'âge de 4 ans les enfants présentent une N170, cette composante spécifique à la reconnaissance de visages à l'endroit que l'on retrouve chez l'adulte. Ceci laisse présager que les mêmes mécanismes neuronaux sous-jacents à la reconnaissance des visages pourraient être impliqués dans l'enfance et à l'âge adulte. En outre, la latence de la N170 décroît globalement de l'âge de 4 ans à l'âge adulte (voir aussi Henderson, McCulloch, & Herbert, 2003), de manière identique pour les visages à l'endroit et les visages à l'envers (voir Figure 17). L'amplitude de la N170 présente, quant à elle, de fortes modulations par rapport à l'âge des sujets, avec un pattern adulte qui n'émerge qu'à l'adolescence (voir Figure 17). De manière générale, les auteurs rapportent 3 sources d'influence sur la latence de la N170 : l'âge du participant (directement corrélé au degré de maturation du cerveau), la tâche (et sa difficulté) et le type de stimuli en présence (des visages ou des objets) (Taylor et al., 2004). Il est, par ailleurs, intéressant de constater qu'au niveau de l'amplitude de la N170 les changements sont les plus impressionnants entre 4 et 10 ans. On observe ensuite que cette composante a plutôt tendance à se stabiliser avec l'âge (voir Figure 17). Ceci peut s'expliquer par le fait que les données recueillies auprès des plus jeunes enfants sont naturellement plus hétérogènes que si les enfants sont plus âgés. Quoique moins souvent rapportée, la P1 est une autre composante marquée par le développement de l'enfant. Elle traduit le traitement des propriétés de bas niveau des stimuli visuels comme le contraste, la luminance ou l'orientation des contrastes. Son évolution avec l'âge renforce l'idée d'une composante maturationnelle et générale pour expliquer le développement des capacités à reconnaître les visages avec l'âge (voir Figure 17).

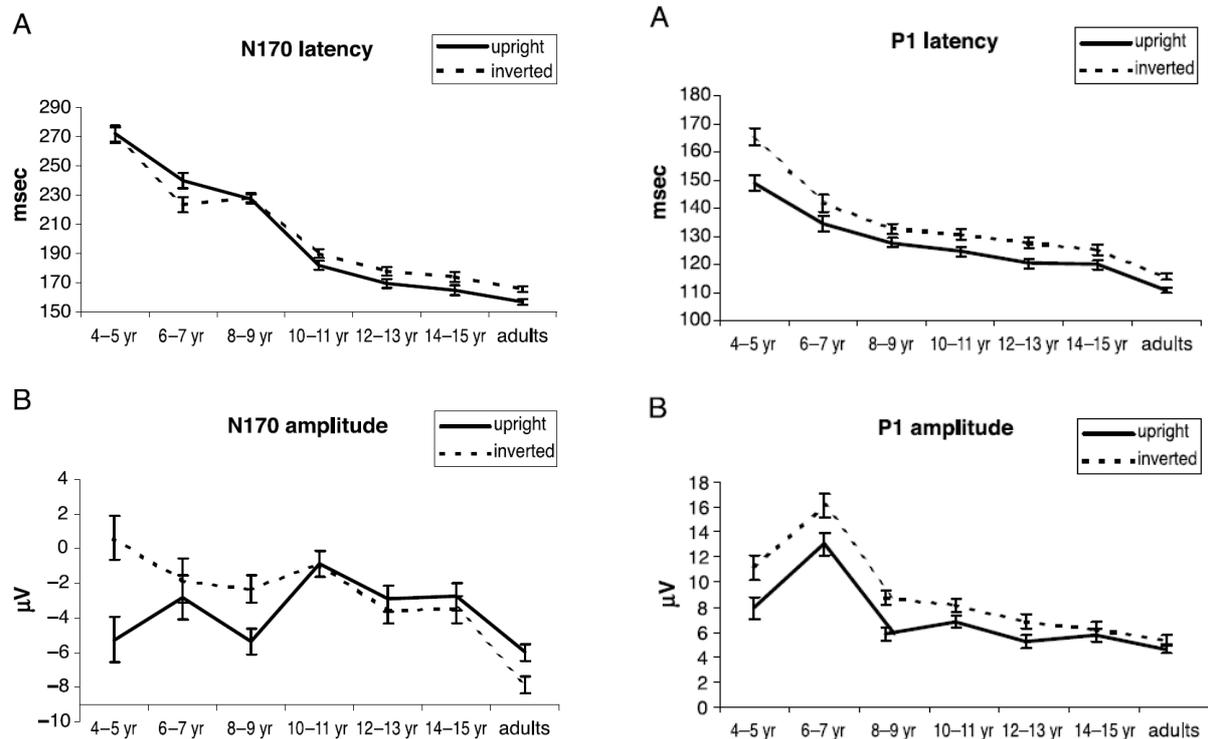


Figure 17 : Extraite de Taylor, Batty et Itier (2004). Latence (A) et amplitude (B) de la N170 (à gauche) et de la P1 (à droite) au cours du développement de l'enfant.

j) Les études en neuroimagerie

A ce jour, il existe très peu d'études menées en neuroimagerie (TEP ; IRMf) avec des enfants pour les raisons éthiques et pratiques évoquées dans le premier chapitre. On a cependant pu en dégager 2 patterns distincts appuyant plutôt l'idée que quelque chose de spécifique à la reconnaissance des visages se met en place au cours du développement de cette fonction, même si, dans ce cadre, l'attention se porte plus sur les régions fonctionnellement actives lors de tâches impliquant des visages que sur les traitements qui leur sont appliqués. Chronologiquement, la première recherche menée en IRMf avec des enfants a fait état d'un réseau largement distribué qui se rétrécit et se spécialise avec le temps (Passarotti, Paul, Bussiere, Buxton, Wong et Stiles, 2003). Dans la même ligne, certains auteurs ont ensuite supposé l'existence d'un saut pendant l'enfance, au terme duquel certaines régions commencent à répondre de manière spécifique aux visages (Ghatters, Bhatt, Corbly, Farley, & Joseph, 2004 ; Aylward, Park, Field, Parsons, Richards, Cramer, & Meltzoff, 2005 ; Scherf, Behrmann, Humphreys, & Luna, 2007). Les études plus récentes révèlent que les enfants,

comme les adultes, disposent d'aires corticales qui répondent préférentiellement aux visages mais que celles-ci s'élargissent au cours du temps, en termes d'étendue et par conséquent de neurones répondant de manière spécifique aux visages (Golorai et al., 2007). Cette particularité rappelle les études comportementales qui indiquent que certains types de traitement appliqués aux visages ne se développent que lentement (voir par exemple Carey et al., 1980 ; 1992 ; Mondloch et al., 2002 ; 2003 ; 2004 ; 2007).

La première étude développementale réalisée en neuroimagerie fonctionnelle avec des nourrissons de 2 mois est celle de Tzourio-Mazoyer et collaborateurs (2002). En utilisant la tomographie par émission de positrons, son objectif était de développer un outil de diagnostic et de pronostic efficace pour diriger des nourrissons à risque vers des procédures de rééducation. Dans l'échantillon retenu pour examiner la localisation des réseaux activés par les visages, les nourrissons n'étaient plus sous traitement médical, leurs signes neurologiques étaient modérés et leur IRM anatomique était normale. Leurs patterns d'activation ont été comparés lorsqu'ils étaient confrontés à des visages féminins portant un foulard et à 2 cercles de diodes vertes et rouges s'allumant successivement à des fréquences variables. Les auteurs rapportent une activité significative au niveau du gyrus fusiforme et du sulcus occipitotemporal en réponse aux visages, plus forte à droite qu'à gauche. Ils n'excluent pas que cette activation soit plus généralement liée à la simple présence de patterns visuels complexes bien que les nourrissons, testés avant l'examen, aient préféré regarder des visages plutôt que des objets complexes. Ce résultat renvoie directement à celui de Rodman, Gross et Scialidhe (1993) qui situe à 2 mois l'apparition des cellules répondant de manière sélective aux visages chez des bébés macaques. Tzourio-Mazoyer et collaborateurs (2002) concluent de cette étude que la maturation corticale fonctionnelle se distribue par larges réseaux plutôt qu'aire par aire, que les activités sont peu dispersées dans le cerveau des nourrissons de 2 mois et que, malgré le métabolisme moyen peu important des régions occipito-ventrales à cet âge de la vie, il existe une activité fonctionnelle qui pourrait être le point de départ d'un processus de spécialisation.

Passarotti et collaborateurs (2003) ont été les premiers à scanner des enfants en IRM en les soumettant simultanément à des tâches impliquant des visages. Ils ont montré que, tout comme les adultes, les enfants de 10-12 ans activent davantage la FFA en réponse aux visages

ordinaires qu'aux visages dont les traits sont mélangés. Leur réseau est néanmoins plus distribué que celui des adultes. Trois ans plus tard, le même groupe (Passaroti, Smith, DeLano, & Huang, 2006) rapporte des profils d'activation similaires à l'étude précédente en réponse aux visages à l'endroit, chez des adultes (20-30 ans), des adolescents (13-17 ans) et des enfants (8-11 ans), surtout au niveau de l'hémisphère droit (HD). A l'inverse, les activations associées aux visages à l'envers semblent décroître avec l'âge, surtout dans le gyrus fusiforme latéral droit, mais seulement chez les adultes et les adolescents alors que les enfants montrent plus d'activation pour les visages à l'envers que pour les visages à l'endroit dans la même région. Pour leur part, Ghaters et collaborateurs (2004), Aylward et collaborateurs (2005) et Scherf et collaborateurs (2007) ont proposé l'idée d'une modification importante de l'activité entre la 8^{ème} et la 10^{ème} année de vie de l'enfant, qui marquerait le passage de l'absence d'activation spécifique aux visages à la présence de réponses corticales tout à fait spécifiques à cette catégorie visuelle. Selon eux, l'étendue de ces régions diminuerait également avec le temps.

Les études présentées ci-dessus ont fait appel à différentes tâches et à différents critères pour définir les aires fonctionnellement impliquées dans la reconnaissance des visages. Elles ont fait usage d'analyses de groupe qui ne permettent pas vraiment de dissocier les changements développementaux dans l'étendue des activations. Par ailleurs, elles n'ont, le plus souvent, pas tenu compte de la maturation anatomique du cerveau alors que le gyrus fusiforme pourrait être plus petit chez les enfants que chez les adultes (sauf dans l'étude de Tzourio-Mazoyer et al., 2002). Elles ne permettent pas non plus de déterminer si les changements développementaux observés sont spécifiques aux visages ou causés par des différences non spécifiques liées à l'âge qui pourraient affecter le signal BOLD de manière générale. Conscients de ces paramètres, Golorai et collaborateurs (2007) ont défendu l'idée que les aires corticales de la voie ventrale sont caractérisées par différentes trajectoires développementales. Pour le démontrer, ces auteurs ont d'abord identifié les aires logées au niveau occipitotemporal qui répondent préférentiellement aux objets (« Lateral Occipital Complex », LOC), aux visages (« Fusiform Face Area », FFA) et aux lieux (« Parahippocampal Place Area », PPA), et ce auprès d'adultes (18-35 ans), d'adolescents (12-16 ans) et d'enfants (7-11 ans). Ils ont ensuite montré que les aires corticales fonctionnellement impliquées dans la reconnaissance des visages (FFA) et des lieux (PPA)

étaient plus petites chez les enfants mais présentaient des activations d'amplitude et de sélectivité comparables à ce que l'on retrouve chez les adultes (voir Figure 18A et 18C). Quant à la taille de l'aire impliquée dans la reconnaissance des objets (LOC), elle ne dépendait pas de l'âge des participants et montrait des signes de maturité très précoces (voir Figure 18B). Ces résultats ont été contrôlés d'une part pour la taille du gyrus fusiforme et du gyrus parahippocampique, qu'ils ont montré être identique chez les enfants et les adultes, d'autre part pour le signal BOLD qui, même s'il était plus important chez les enfants, n'influaient pas sur les résultats (voir « Matched », Figure 18). En outre, il est également apparu que la FFA et la PPA des enfants, de taille réduite, étaient entourées de cortex fonctionnellement immature qui ne répondait de manière sélective ni aux visages ni aux lieux. De manière moins cruciale pour notre propos, les auteurs ont également indiqué que les aptitudes de l'ensemble des sujets en reconnaissance de visages et de lieux étaient d'une part corrélées à leur âge, d'autre part à la taille de la FFA droite et de la PPA gauche. Inversement, leurs aptitudes en reconnaissance d'objets n'étaient corrélées ni à leur âge, ni à la taille de LOC. L'intérêt de cette étude est double. Premièrement, elle démontre que, contrairement à LOC, la taille de la FFA droite et de la PPA gauche augmente de l'âge de 7 ans à l'âge adulte. La voie visuelle ventrale se mettrait donc en place de façon graduelle, particulièrement pour les visages et les lieux dont les fonctions se développeraient encore jusqu'à l'adolescence. Deuxièmement, les auteurs font l'intrigante observation que les neurones du cortex environnant les petites FFA et PPA ne répondent pas de manière spécifique aux visages et aux lieux dans l'enfance. Leur spécialisation ne serait que progressive et résulterait de l'expansion spatiale de la FFA et de la PPA dans des régions corticales adjacentes. A l'heure actuelle, on ne sait pas encore si ce phénomène s'explique en termes de nombre de neurones qui répondent de manière sélective à une catégorie visuelle (ex : les visages) ou en termes de degré de sélectivité de leur réponse (ex : neurones qui répondent aux visages et aux objets et qui se spécialisent ensuite pour les visages).

En résumé, l'ensemble des études présentées ci-dessus indique que l'organisation basique des circuits neuronaux qui sous-tendent la reconnaissance des visages est, a minima, partiellement présente à l'âge de 2 mois et se développe de la petite enfance à l'adolescence. Seulement, à ce stade, les résultats recueillis sont contradictoires puisque l'on a d'un côté des auteurs (Aylward et al., 2005 ; Ghaters et al., 2004, Passarotti et al., 2003 ; 2006 ; Scherf et

al., 2007) qui prônent un rétrécissement progressif du réseau spécifiquement impliqué dans la reconnaissance des visages avec l'âge, et de l'autre des chercheurs (voir Golorai et al., 2007) qui considèrent que ces aires s'étendent avec l'âge et que, par conséquent, le nombre de neurones qui répondent de manière sélective aux visages augmente significativement avec le temps. Nous aurions tendance à favoriser ce dernier point de vue puisque cette étude est la seule à avoir tenu compte de paramètres comme l'état de maturation encore incomplet du cerveau des enfants, leur plus grande tendance à bouger lors des enregistrements et la plus grande variabilité de leurs réponses hémodynamiques (voir à ce sujet Grill-Spector et al., 2008). Il est également vrai qu'il est difficile de conclure à ce propos à l'heure actuelle, vu que ces recherches en sont encore à leurs balbutiements. Nous espérons donc que les prochaines années permettront d'y voir plus clair.

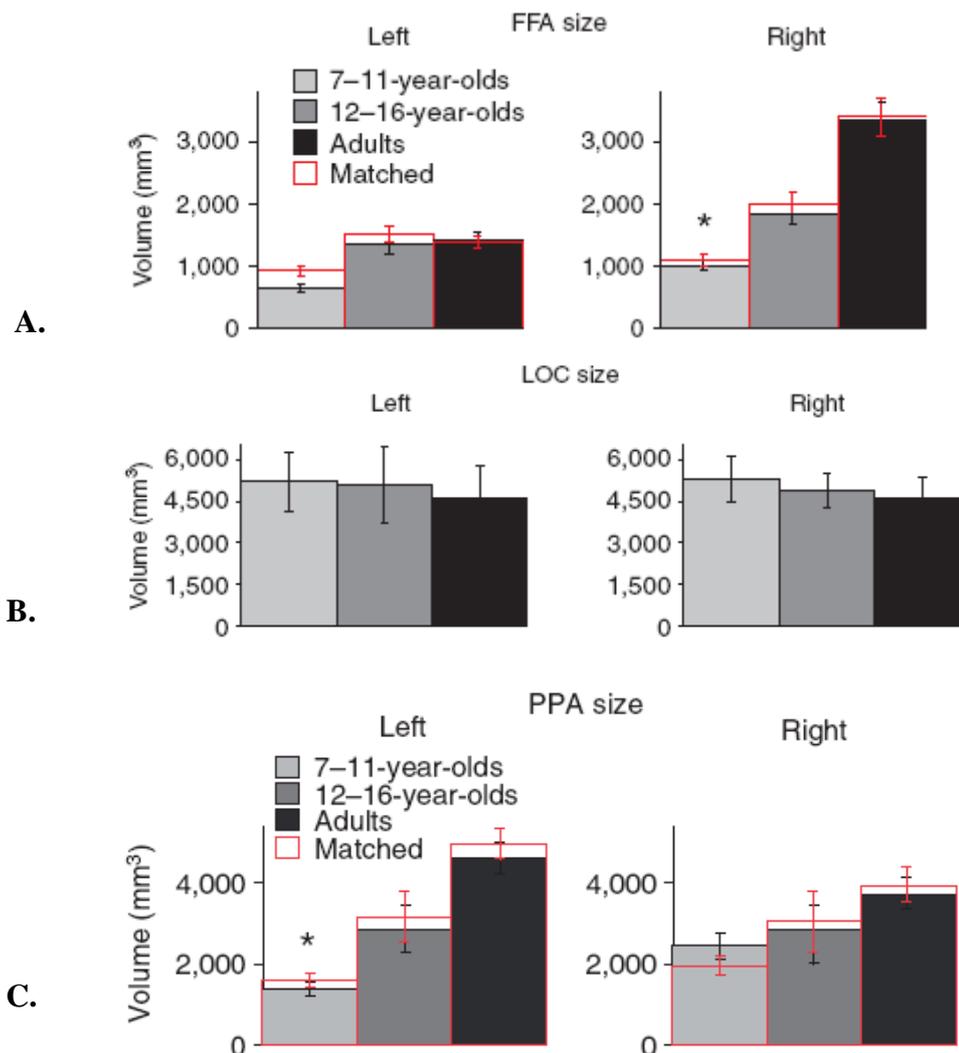


Figure 18: Extraite de Golorai, Ghahremani, Whitfield-Gabrieli, Reiss, Eberhardt, Gabrieli et Grill-Spector (2007). Volume en millimètres cubes de la FFA (A), de LOC (B) et de la PPA (C) respectivement impliqués dans la reconnaissance des visages, des objets et des lieux chez des enfants (7-11 ans), des adolescents (12-16 ans) et des adultes. Il apparaît que la taille de la FFA et de la PPA augmente avec l'âge, contrairement à la taille de LOC. Ces résultats sont maintenus quand la quantité de signal BOLD est appariée entre les participants (« Matched »).

3. Conclusions

La grande majorité des recherches présentées ci-dessus traduisent les progrès réalisés dans notre compréhension de l'interaction des facteurs génétiques et environnementaux dans le développement de la fonction de reconnaissance des visages. A ce propos, il est intéressant de relever que la notion de module de visages exposée par Fodor (1983) n'impliquait en rien une conception innéiste et laissait déjà la porte ouverte à une conception interactionniste. Aujourd'hui, c'est la compréhension de ces interactions qui a progressé et qui continue à nous faire progresser.

Les données décrites dans ce chapitre vont dans le sens d'un système qui se spécialise progressivement tout en tenant compte des contraintes qui lui sont imposées par les règles de maturation du système nerveux (~ inné) et par les contraintes de l'environnement (~ acquis). La présence d'un mécanisme attentionnel de type CONSPEC, dans la version développée par Johnson et Morton (1991) ou Simion et collaborateurs (2003), constituerait le point de départ d'un processus d'apprentissage et de spécialisation progressif. Au cours de ce processus, les contraintes de fonctionnement neuronal guideraient l'organisation du traitement. Si nous allons dans le sens de cette hypothèse, c'est qu'il est, selon nous, plus adaptatif de disposer d'un mécanisme grossièrement défini qui permet de détecter un visage peu importe son espèce, sa race, son genre ou la manière dont il est éclairé. Un tel mécanisme assurerait donc temporairement l'afflux continu d'inputs vers le système cortical chargé de traiter, à la naissance, des représentations de visages, à la fois grossières et souples puisque extrêmement sensibles à la qualité et à la quantité d'expérience visuelle disponible (voir Figure 19). Nous reviendrons sur le caractère grossier des représentations faciales des nouveau-nés dans l'Etude N°1 ainsi que dans la discussion. Nous pouvons déjà spécifier que, tout au long de la vie, les représentations faciales sont construites à partir des visages présents dans l'environnement tout en étant continuellement modifiées par ceux-ci. Quant à l'ampleur des effets de l'expérience visuelle aux différents âges de la vie, elle reste encore à définir. On a cependant montré que l'habituation de nourrissons de 3 mois à 3 exemplaires de visages d'une autre race modifie leurs capacités de discrimination des visages de cette race (Sangrigoli & de Schonen, 2004). L'exposition naturelle à un environnement de visages d'une autre race détermine aussi les préférences visuelles des nourrissons de 3 mois (Bar-Haim et al., 2006). De même,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pascalis, Scott, Kelly, Shannon, Nicholson, Coleman et Nelson (2005) ont proposé qu'entre 6 et 9 mois la supériorité du traitement des visages humains sur les visages de singes pouvait être contrariée en montrant des visages de singes aux nourrissons. L'étude de Sugita et collaborateurs (2008) renvoie, elle, à la question du poids des premiers visages dans la mise en place du système de reconnaissance des visages tout en insistant sur l'importance de l'expérience visuelle précoce (voir aussi Geldart et al., 2002 ; Le Grand et al., 2001 ; Mondloch et al., 2002 ; 2003 ; 2004). Comme l'illustre la Figure 19, nous pensons que les représentations se stabilisent ensuite en se complexifiant, se renforçant et se spécifiant avec le temps comme en témoignent les effets d'espèce, de race, d'inversion et de genre des nourrissons. Même si aucune comparaison directe n'a été faite entre ces derniers et les enfants pour des raisons techniques, il apparaît également que l'évolution des performances des individus avec l'âge est probablement liée à un ou plusieurs facteurs spécifiques aux visages ainsi qu'à plusieurs facteurs plus généraux (voir Figure 19). C'est un point que nous allons longuement développer par la suite.

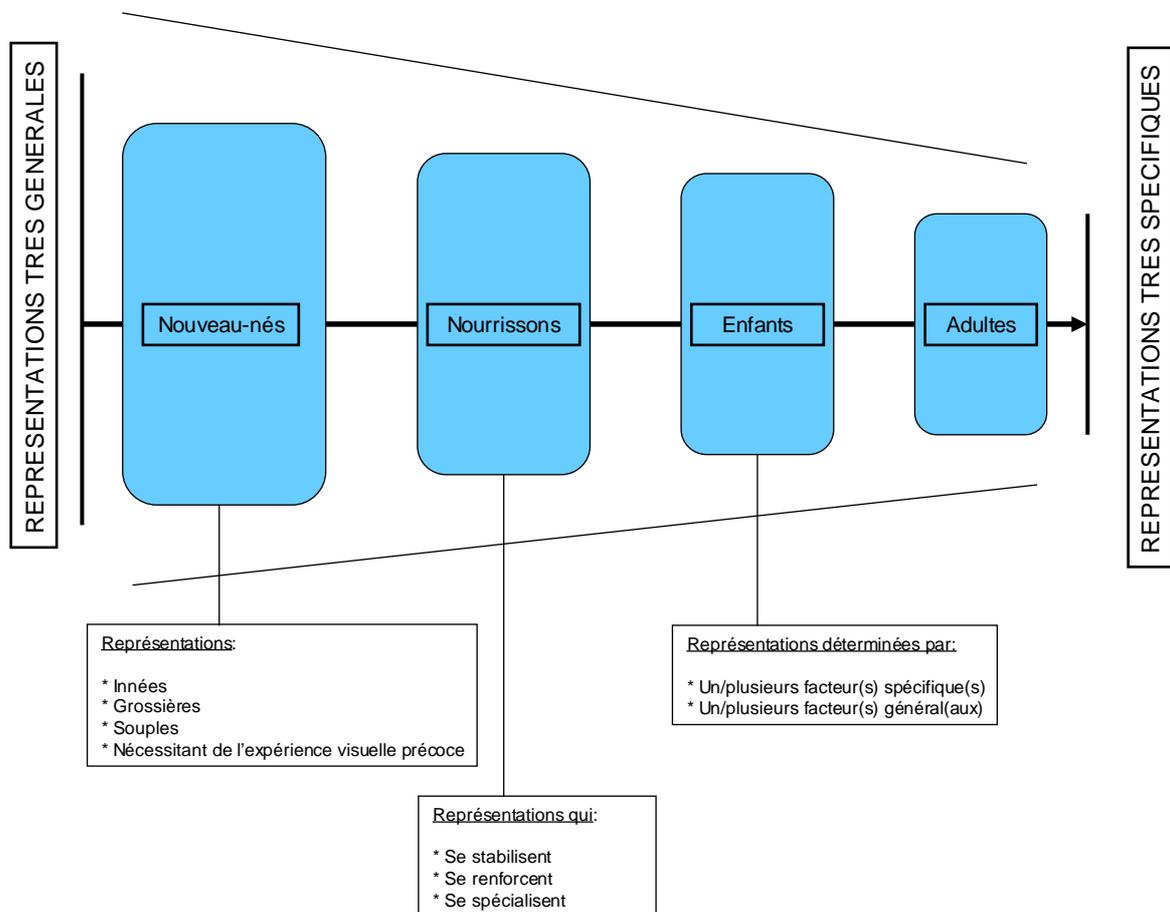


Figure 19 : Evolution des représentations faciales au travers du développement.