

Le développement de la reconnaissance des visages : modularité, apprentissage et préorganisation

Scania De Schonen*

Quelles propriétés du cerveau humain conduisent l'enfant à développer des compétences cognitives humaines (langage, mémoire, réalisation d'œuvres d'art, systèmes de connaissances, sciences, croyances, interactions avec autrui et ses représentations mentales, ses croyances, ses espoirs, etc.) ? Les questions relatives au développement des conduites sociales, des aspects émotionnels et affectifs, des représentations de soi et d'autrui, sont plus difficiles à aborder et contrôler expérimentalement que les questions relatives au développement du langage, des habiletés visuo-spatiales, du raisonnement, etc ; elles ont été traitées pendant longtemps par une approche essentiellement clinique de cas pathologiques, sans recours à une approche expérimentale du développement normal.

Mots-clés : cerveau, organisation neuronale, compétence cognitive, émotions, représentation, soi, autrui

The development of facial recognition : modularity, learning and pre-organisation. One of the fundamental questions for the cognitive neuroscience of development is to understand which properties of the human brain, which neuronal organisations make possible the development of cognitive competence (language, memory, creation of works of art, knowledge systems, beliefs, hopes etc). What properties of the human brain lead the infant to develop human cognitive capacities? These questions must be posed at all levels in the study of the brain, from genetics to behaviour. Studies bearing on the cognitive activities of the brain are a necessary approach to cerebral functioning in order to understand how the activity of a neural network constitutes what we call thought, mental states, actions, etc. Questions concerning the development of language, visuo-spatial abilities, reasoning, etc have been studied experimentally for a longer time than questions concerning the development of social behaviour, the affect and the emotions, representations of self and others, which, because they are more difficult to approach and to control experimentally, have until recently been

* Groupe Développement Neurocognitif, Laboratoire Cognition et développement, CNRS-Paris 5, et INSERM 9935, Service de Neurologie du Développement et des Maladies Métaboliques, Hôpital Robert Debré, Paris, France

restricted to a clinical approach, often psychoanalytical, of pathological cases, without recourse to an experimental approach to normal development.

Keywords : brain, neuronal organisation, cognitive competence, emotions, representation, self, others

L'une des questions fondamentales que se posent les neurosciences cognitives du développement est de comprendre quelles propriétés du cerveau humain, quelles organisations neurales permettent le développement des compétences cognitives (langage, mémoire, réalisation d'œuvres d'art, systèmes de connaissances, sciences, croyances, interactions avec autrui et ses représentations mentales, ses croyances, ses espoirs, etc.)... Quelles propriétés du cerveau humain conduisent l'enfant à développer des compétences cognitives humaines ? Ces questions doivent être posées à tous les niveaux d'étude du cerveau, de la génétique au comportement. Les études portant sur les activités cognitives du cerveau constituent une approche nécessaire du fonctionnement cérébral si l'on veut comprendre comment l'activité des réseaux de neurones constitue ce que nous appelons pensée, états mentaux, actions, etc. Les questions relatives au développement du langage, des habiletés visuo-spatiales, du raisonnement, etc., ont été étudiées expérimentalement depuis plus longtemps que les questions relatives au développement des conduites sociales, des aspects émotionnels et affectifs, des représentations de soi et d'autrui, qui, parce que plus difficiles à aborder et contrôler expérimentalement, ont été traitées pendant longtemps par une approche essentiellement clinique, souvent psychanalytique, de cas pathologiques sans recours à une approche expérimentale du développement normal.

Il existe un consensus sur un certain nombre de principes concernant les relations cerveau/états mentaux, à savoir que les propriétés structurales du cerveau sont importantes pour comprendre son fonctionnement, que les états mentaux et comportementaux correspondent à des états du cerveau, que l'activité mentale, la perception et l'action correspondent à des patterns d'activités de populations de neurones, et qu'enfin la plasticité est essentiellement une propriété de la synapse. Il existe aussi un consensus sur l'importance des effets de l'environnement sur l'organisation cérébrale : les signaux de l'environnement ont un effet sur l'organisation des réseaux de neurones (voir les changements dits « expérience-dépendants » dans la taille des neurones, les branchements dendritiques, la densité d'épines dendritiques, le nombre de synapses des neurones; pour une revue, Kolb, 1995).

En revanche il n'y a pas d'accord sur les rôles respectifs de l'organisation cérébrale et de l'environnement, sur les mécanismes des interactions cerveau/environnement. On se demande ainsi dans quelle mesure des facteurs de l'environnement cognitivo-affectif peuvent contribuer à modifier profondément la trajectoire normale de

développement, et sinon en être à l'origine, au moins en modeler l'épigenèse. Nous n'aborderons pas cette question directement ici. C'est cependant bien avec ce type de préoccupations en tête que nous examinerons l'exemple du développement du traitement des visages chez le nourrisson et le jeune enfant en espérant montrer la complexité des mécanismes d'interaction et la nécessité d'une approche expérimentale pluridisciplinaire. Les études actuelles sur les troubles mentaux chez l'adulte ont considérablement bénéficié des connaissances acquises sur les activités cognitives normales. A l'heure actuelle se développent également des méthodes et un corpus de connaissances sur les troubles mentaux chez l'enfant, fondés sur une approche empruntée aux études du développement neuro-cognitif normal.

Dans ce qui suit nous aborderons, à travers l'exemple du développement du traitement des visages par le très jeune enfant, des questions relatives à la nature des organisations « cognitives innées », à l'effet de l'environnement dans la petite enfance et les mécanismes d'interaction cerveau/environnement, au guidage par des pré-organisations neuronales de l'utilisation des offres environnementales, à la capacité du cortex à réorganiser ses connexions et ses fonctions selon l'âge de survenue des agressions (plasticité corticale fonctionnelle), à l'existence de plusieurs trajectoires de développement.

PRÉORGANISATIONS, MODULES COGNITIFS ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

Certains aspects des structures et des mécanismes neurobiologiques anticipent l'environnement avec lequel ils interagissent et sont modifiés par cette interaction même. Le problème du développement neuro-cognitif dans une espèce animale doit être conçu comme un ensemble de transformations en cascade, un ensemble d'histoires en « boules de neige » qui constitue l'épigenèse cognitive de l'espèce. Le cerveau n'interagit pas seulement avec des molécules, mais à un certain point de son développement avec des sons, des formes, des objets, du langage, des croyances, des concepts, des émotions, etc. Comment ces interactions deviennent-elles possibles au cours du développement ? La notion d'apprentissage n'est pas essentielle ici : toutes les espèces sont capables d'apprentissages, mais toutes les espèces n'ont pas les mêmes compétences cognitives. Grâce aux méthodes de la psychologie expérimentale et aux techniques d'imagerie cérébrale, on commence à constituer une anatomie fonctionnelle des activités mentales en localisant chez l'adulte certains des réseaux neuronaux impliqués dans les émotions, les connaissances sur les objets, celles sur les visages ou leurs expressions, les différentes sortes de mémoire, l'attention, etc...

On parle de « modules cognitifs » chez l'adulte pour désigner des systèmes cérébraux dédiés, qui traitent et produisent des informations spécifiques. L'un des arguments importants en faveur de ces modules fonctionnels est le fait qu'une partie des réseaux de neurones activés au cours d'une activité mentale donnée ne sont pas les mêmes que ceux impliqués dans une autre activité mentale. Fodor (1983) proposait le système de traitement des visages comme un bon exemple de module cognitif dédié à une fonction précise. Chez certains patients qui ont subi un accident cérébrovasculaire à l'âge adulte, on peut observer un déficit dans le traitement des visages avec préservation du traitement d'autres objets; le tableau inverse peut être observé avec des lésions situées dans une région différente (Campbell et al., 1986; Young et al., 1993; Moscovitch, et al., 1997). Ces doubles dissociations entre déficits et localisations de la lésion confirment la spécificité des réseaux impliqués dans la représentation des visages d'une part, des objets d'autre part. De même, on a observé que certains patients prosopagnosiques demeurent capables de reconnaître les expressions émotionnelles sur un visage sans être capables ni de le reconnaître comme familier, ni d'apprendre de nouveaux visages (Hécaen & Angelergues, 1962). L'imagerie cérébrale fonctionnelle (IRMf ou TEP avec H₂ 015, MEG) au cours de tâches cognitives montre que l'activité cérébrale liée à la présentation de visages est augmentée dans des réseaux situés dans le gyrus fusiforme moyen de l'hémisphère droit; d'autres régions sont activées par d'autres sortes d'objets (MacCarthy et al., 1997; Kanwisher et al., 1996; Gauthier et al., 2000a,b). Par ailleurs les troubles acquis de la reconnaissance des visages (en particulier la prosopagnosie) sont associés chez l'adulte à une lésion bilatérale ou à une lésion unilatérale postérieure de l'hémisphère droit, mais non à une lésion unilatérale de l'hémisphère gauche (de Renzi et al., 1994).

Enfin les informations visuelles codées organisées et utilisées pour reconnaître rapidement un visage particulier sont différentes de celles qui permettent de reconnaître un objet : « configurales » - concernant donc les relations spatiales et les distances entre les éléments - pour un visage (Young et al., 1987; Tanaka et Farah, 1993), locales - concernant donc les détails - pour les objets. L'hémisphère droit est plus sensible à l'information configurale qu'à l'information locale (pour une revue voir Hellige, 1993). Chez l'adulte le gyrus fusiforme droit est plus activé lorsqu'il doit comparer des visages complets que lorsqu'il doit en comparer les éléments. Inversement, le gyrus fusiforme gauche est plus activé quand la comparaison porte sur les éléments du visage. Cette asymétrie dans le traitement de l'information visuelle s'observe pour les visages mais non pour la comparaison de maisons (Rossion et al., 2000). Cependant la représentation configurale est pratiquée par le cortex temporal droit pour des objets d'une classe donnée si de nombreux exemplaires assez semblables de cette classe ont été rencontrés et quand l'observateur en est « expert » (visages, voitures, oiseaux, etc.; Gauthier, Skudlarski et al., 2000a; Gauthier et al., 1999).

Pendant son développement postnatal, le cerveau construit ou développe des outils grâce auxquels il interagit avec certains aspects de l'environnement avec lesquels il ne pouvait interagir dans un état antérieur de sa maturation. La capacité de traiter des visages représente l'un de ces outils. Au fur et à mesure que se développent et opèrent les réseaux impliqués dans le traitement des visages, l'information qu'ils traitent se modifie et se spécifie éventuellement. Le caractère rapide, facile et automatique avec lequel nous reconnaissons des visages individuels (en 50 ms notre cerveau sait qu'il y a un visage présent là, et en quelques dizaines de millisecondes de plus, ce visage est reconnu comme familier ou non), contraste avec les difficultés rencontrées par ceux qui tentent de fabriquer une machine qui reconnaisse des visages. Comment ce système sophistiqué se développe-t-il ? Comment se développe la spécialisation de certains réseaux du gyrus fusiforme pour cette compétence ? Existe-t-il un système pré-organisé de traitement des visages ?

**SENSIBILITÉ SÉLECTIVE AUX VISAGES CHEZ LE NOUVEAU-NÉ ?
A QUELLE INFORMATION VISUELLE LE NOUVEAU-NÉ EST-IL
SENSIBLE ?**

De la naissance à l'âge de deux mois, le nourrisson est plus sensible à l'amplitude du signal visuel qu'à la structure du signal (il fixe plus longtemps le stimulus de plus grande amplitude : pour une revue, Kleiner, 1993). Mais un nouveau-né âgé de quelques minutes discrimine entre différentes formes. Il suit des yeux et de la tête un schéma de visage (vu de face) sur un angle de déplacement plus grand qu'un schéma portant un signal de même amplitude mais n'ayant pas la structure d'un visage (Goren et al., 1975; Johnson et al., 1991). Cette préférence visuelle disparaît vers l'âge de 6 semaines (Mondloch, Lewis et al., 2000).

Il est possible que cette préférence visuelle précoce pour le visage soit pilotée par une structure sous corticale spécifique (Morton et Johnson, 1991; Johnson et Morton, 1991; Simion et al., 1998a,b; Valenza et al., 1996). Cependant, à côté de ce système sous cortical, s'il existe, un certain nombre de traitements corticaux pourraient contribuer à la préférence pour les visages dès la naissance. En effet, un nourrisson de trois jours discrimine entre des grilles d'orientation différente, ce qui suggère fortement que le cortex visuel traite déjà ces signaux au moins partiellement (Atkinson & Braddick, 1989; Slater et al. 1988; Atkinson, 1998).

Par ailleurs, la préférence visuelle pour le visage schématique pourrait en fait provenir du fonctionnement plus précoce de certaines cellules corticales spécialisées dans le traitement d'une orientation. A l'âge de trois jours, le nourrisson fixe plus longtemps (préférence visuelle spontanée) des barres horizontales que des barres verticales; il fixe plus longtemps les stimuli qui comportent plus de contrastes

dans leur partie supérieure qu'inférieure (par exemple les formes T ou U-inversé sont fixées plus longtemps que leur version inversée de 180°) (Simion et al., 2000). Or, ces propriétés « géométriques » qui maintiennent la fixation visuelle du nouveau-né sont précisément présentes dans les schémas de visages vus de face utilisés pour tester le nouveau-né : les deux yeux constituent une barre horizontale bien contrastée, située dans la partie supérieure du schéma, alors que dans le schéma inversé qui est moins regardé, la barre horizontale des yeux est située dans la partie inférieure du stimulus. La préférence pour le schéma de visage serait alors la conséquence d'un état temporaire du fonctionnement des neurones dû à une maturation de certaines cellules corticales avant d'autres. D'un point de vue fonctionnel, ce système aurait le même résultat que s'il existait un système spécifique de détection des visages. La question n'est pas encore résolue aujourd'hui.

L'APPRENTISSAGE D'UN VISAGE

Le nourrisson de 3 jours traite certains aspects de la configuration des visages. Il regarde plus longtemps des photographies de visages de femmes considérés comme attrayants par les adultes par opposition à ceux qui sont classés comme non attrayants (Slater et al., 1998, Slater et al., 2000). On ignore actuellement quelles sont les caractéristiques qui distinguent ces deux classes de visages pour le nourrisson. Les données sur l'imitation de la protrusion de la langue et du gonflement des joues ne peuvent être retenues dans la mesure où l'existence de ces réponses imitatives est contestée chez le nouveau-né jusqu'à l'âge de deux mois (Anisfeld, et al., 2001). On a également montré qu'un nourrisson de 3 jours reconnaît le visage de sa mère et le discrimine sur la base d'indices purement visuels d'une étrangère même s'il n'a pas vu le visage de sa mère pendant un intervalle de trois minutes avant le test (Bushnell, et al., 1989; Pascalis et al., 1995). De même, à trois jours, le nourrisson peut mémoriser au-delà de quelques minutes un visage qui lui a été présenté seulement visuellement (Pascalis & De Schonen, 1995).

Cependant si les cheveux et la frontière front/cheveux de la mère et de l'étrangère sont masqués avec un foulard, le nourrisson ne manifeste plus de reconnaissance du visage de sa mère (Pascalis et al., 1995). La représentation visuelle de la tête-visage de la mère (ou de la personne qui s'occupe du nourrisson) formée pendant les 3 premiers jours de vie inclut donc le contour de la tête et des cheveux comme élément critique. Il n'y a donc pas encore traitement des différences entre visages individuels à proprement parler.

Ce n'est que vers l'âge de 6-8 semaines que l'on constate des signes de reconnaissance du visage de la mère malgré le masquage du contour de la tête (Bartrip et al., sous presse). Ce n'est pas la limitation de la sensibilité visuelle (acuité et sensibilité au contraste) qui empêche le traitement des configurations de visages individuels jusqu'à 6 semaines. Nous pensons plutôt que pendant les toutes

premières semaines de vie, les réseaux impliqués dans le traitement des visages comme de tout autre pattern visuel traitent et représentent essentiellement les variations entre contours de tête-visage. On aurait ainsi, dans les premiers jours, formation d'une représentation ou d'un prototype de visages comportant la configuration générale d'un faciès et de certaines particularités de contrastes et/ou de dimension, et, formation de représentations des variations possibles entre visages fondées essentiellement sur le contour du visage. Après quelques semaines de vie les représentations se modifieraient.

Même à l'âge de deux mois où le nourrisson commence à traiter les configurations internes des visages, le traitement des visages individuels est relativement grossier. Par exemple, reconnaître un visage sous un point de vue différent des points de vue sous lesquels il a été appris n'apparaît qu'à l'âge de 3-4 mois (Pascalis et al., 1998).

En résumé, les effets d'apprentissage observés chez le nourrisson de trois jours montrent que même dans un état relativement peu mature, le cortex conserve des traces des interactions avec l'environnement. Savoir si ces traces ont un effet à long terme ou non, sur l'organisation du cortex et savoir si ce sont ces traces qui constituent progressivement soit un système de traitement des visages, soit une région corticale privilégiée pour la comparaison et le stockage des visages, sont des questions différentes.

LOCALISATION CORTICALE ET SPÉCIALISATION FONCTIONNELLE CHEZ LE NOURRISSON.

Une étude par tomographie avec émission de positons (PET) et de l'eau marquée (H₂ O₁₅) a été réalisée sur des nourrissons de 2 mois dans le but de développer un outil de diagnostic et de pronostic chez des nourrissons nés à risque qui permettrait de définir rapidement des procédures de rééducation (Tzourio-Mazoyer et al., soumis). Lors de l'examen à 2 mois, ces enfants n'étaient plus sous traitement médical et les signes neurologiques étaient très modérés. L'IRM anatomique était normale. Les patterns d'activation cérébrale régionale ont été comparés dans deux situations : lors de la présentation de diapositives de visages féminins neutres portant un foulard et lors de la présentation d'un pattern de deux cercles de diodes vertes et rouges s'allumant successivement à des fréquences variables.

A l'âge de deux mois, la densité synaptique dans le cortex humain est en cours d'augmentation mais est encore loin d'avoir atteint son pic (Huttenlocher & de Courten, 1987; Huttenlocher, 1990; Huttenlocher, 1994); les arborisations dendritiques sont encore peu développées (Scheibel, 1993); l'activité métabolique corticale est beaucoup plus faible qu'elle ne le sera quelques mois plus tard (Chugani, Phelps & Mazziotta, 1987). On pouvait donc s'attendre à ne pas trouver de différences d'activité métabolique dans les cortex associatifs entre les deux situations de stimulations visuelles. Nos

résultats montrent d'abord un niveau d'activité moyen cortical correspondant à ce que Chugani et al., (1987) avait observé : une activité corticale relativement pauvre, plus importante dans le cortex visuel et le cortex sensori-moteur que dans le cortex temporal et le cortex pariétal, et plus importante dans ces régions que dans le cortex préfrontal. Les structures sous corticales ont en revanche un niveau d'activité plus élevé. Malgré cette activité corticale globalement pauvre, on observe plusieurs différences régionales entre les activations liées aux conditions de stimulations. La stimulation avec des visages, mais non la stimulation avec le pattern de diodes, est associée à une activation du gyrus fusiforme moyen droit. D'autres régions étaient également activées alors qu'elles ne le sont pas chez l'adulte lors de la présentation de visages.

Le fait de ne pouvoir utiliser que deux situations de stimulations – contrainte inhérente à la méthode - ne permet pas de conclure que l'activation du gyrus fusiforme est spécifiquement liée aux visages, mais elle permet de conclure que les activateurs de cette région corticale associative incluent les visages. Les visages sont probablement la classe d'objets à laquelle les nourrissons de deux mois ont été le plus exposés et le plus exposés en corrélation avec d'autres stimulations (voix, manipulation, nourriture). Il est possible que n'importe quel pattern visuel complexe fréquemment rencontré en corrélation avec d'autres sources de stimulations plurimodales dans une zone d'intensité donnée active cette région. Ainsi, les contraintes de développement cortical font que la région du gyrus fusiforme droit est impliquée dans la représentation des visages dès le début du développement de ces traitements et alors même que le traitement des visages est encore très grossier et que ces cortex n'ont encore qu'une activité globalement pauvre.

On constate par ailleurs une activation surprenante dans le cortex auditif, associée à la présentation des visages. Il est possible que cette activation soit liée aux co-stimulations quotidiennes par les visages et les voix. L'existence de co-activations impliquerait que les régions corticales auditives reçoivent des inputs visuels et que les régions visuelles reçoivent des inputs auditifs. Ce type de projections, souvent appelées « surnuméraires », a déjà été observé (Neville, 1990). Au cours du développement normal, ces projections dites « surnuméraires » disparaissent ou bien leur activité est inhibée.

Ces données suggèrent que des réseaux de neurones du cortex temporal ventral droit sont fonctionnels très précocement. Ceci ne signifie pas que les cortex associatifs mûrent par modules pré-spécialisés « clef- en- main ». La spécialisation des réseaux est le résultat progressif de facteurs convergents qui, eux, constituent le cadre de la pré-organisation. Par exemple, les réponses électrophysiologiques à la présentation de visages à l'âge de 6 mois est beaucoup moins nette qu'à l'âge adulte : les corrélats électrophysiologiques sont les mêmes pour des visages de singes et des visages humains (de Haan, Johnson, Hatzakis, Pascalis 1999);

alors que le nourrisson de 6 mois est tout à fait capable de répondre catégoriellement en distinguant visages de primates non-humains et visages humains barbus (De Schonen et Bry, non publiés). Le gyrus fusiforme droit est donc probablement moins spécialisé à l'âge de deux mois que chez l'adulte.

Les résultats de cette étude par imagerie cérébrale suggèrent que la maturation fonctionnelle corticale ne procède pas région par région, mais plutôt par vagues successives affectant des réseaux dans l'ensemble du cortex. Le schéma de maturation fonctionnelle apparaît ainsi plus fonctionnel que strictement régional.

POURQUOI LE TRAITEMENT DES VISAGES UTILISE-T-IL UNE INFORMATION CONFIGURALE DANS L'HÉMISPHERE DROIT CHEZ L'ADULTE ?

A partir de l'âge de trois mois au moins, les deux hémisphères sont capables de reconnaître la catégorie perceptive des visages (De Schonen et Bry, 1987). Pourtant, l'avantage de l'hémisphère droit dans le traitement des visages particuliers est présent dès l'âge de 4-5 mois. A cet âge, l'hémisphère droit reconnaît mieux un visage particulier que l'hémisphère gauche (De Schonen, Gil de Diaz & Mathivet, 1986; De Schonen & Mathivet, 1990; de Haan & Nelson 1997; de Haan & Nelson, 1999). L'avantage de l'hémisphère droit n'est pas dû à une meilleure capacité de traiter les formes en général mais au fait que les deux hémisphères traitent des informations visuelles différentes (Deruelle & De Schonen, 1991, 1995, 1998). Comme chez l'adulte, l'hémisphère droit du nourrisson est sensible à une information visuelle sur la configuration, la localisation relative des éléments d'un pattern, les distances entre éléments alors qu'il n'est pas sensible à la forme des éléments locaux. L'hémisphère gauche est sensible à la forme des éléments locaux et moins aux aspects configuratifs. Cette différence est observée lorsqu'il s'agit de reconnaître et différencier des patterns géométriques aussi bien qu'avec des visages photographiés. A partir d'une offre environnementale identique, les deux hémisphères traitent des informations différentes et fabriquent des représentations différentes de l'environnement. A côté de la contribution de mécanismes sous corticaux et/ou corticaux à la sélection des visages, il existe donc aussi d'autres contraintes dans l'organisation corticale, qui diffèrent entre hémisphères et déterminent la manière dont les visages sont représentés dans le cortex. Ces différences de traitement entre hémisphères ne sont pas spécifiques des visages, on trouve les mêmes pour des formes géométriques.

Le caractère bilatéral de la reconnaissance de la catégorie perceptive « visages » qui s'oppose à l'avantage unilatéral de la reconnaissance des visages particuliers, suggère que se forment pendant les deux-trois premiers mois de vie deux systèmes distincts, l'un traite du visage en général et l'autre des visages particuliers.

Un scénario a été proposé pour rendre compte de l'origine des différences entre les deux hémisphères dans le traitement des visages et des formes géométriques. Certains réseaux de neurones temporaux pourraient devenir spécialisés très tôt dans le traitement des visages à cause de la convergence de plusieurs mécanismes (De Schonen & Mathivet, 1989; De Schonen, 1989) :

- 1) Des réseaux corticaux des régions associatives temporales qui intègrent diverses informations d'origine visuelle deviendraient fonctionnels dans l'hémisphère droit avant ceux de l'hémisphère gauche (pour une discussion et les arguments en faveur de l'hétérochronie de maturation, voir Geschwind & Galaburda, 1985; De Schonen, Deruelle, Mancini, Pascalis, 1993; De Schonen & Mathivet, 1989; Turkewitz, 1989).
- 2) Ces réseaux reçoivent, pendant les deux ou trois premiers mois de vie, des informations visuelles qui proviennent des voies apportant des fréquences spatiales basses, fonctionnelles avant voies apportant des fréquences spatiales hautes (Atkinson & Braddick, 1989; Banks & Dannemiller, 1987; Banks, Stephens, & Hartmann, 1985; Slater, 1993). Le résultat est que les patterns visuels qui peuvent être appris, reconnus et donc stabilisés d'une occurrence à l'autre, correspondent à l'information configurale contenue dans le pattern plutôt qu'à l'information locale (l'information locale d'un pattern, parce que traitée en fréquence basse, est compatible avec de trop nombreux autres patterns et inversement peut ne rien conserver de commun à travers différentes présentations). De plus, il est aussi possible que la croissance plus rapide des réseaux droits aboutisse à une architecture dendritique et une organisation synaptique différentes à droite et à gauche, favorisant le codage d'information configurale par rapport au codage d'information locale.
- 3) Les réseaux recevant suffisamment de signaux visuels pour représenter des visages (sans être spécialisés encore dans ce traitement) et connectés à d'autres traitements tels que les traitements de signaux provenant de la voix, commenceraient ce type d'activité dans l'hémisphère droit avant l'hémisphère gauche, en traitant essentiellement des fréquences spatiales basses.
- 4) L'avantage du traitement configural (imposé par la maturation plus précoce des voies pour les fréquences spatiales basses) sur le traitement local est qu'il donne lieu à des représentations invariantes à travers un grand nombre de transformations d'un visage : changements de lumière, de points de vue, d'expressions, de mouvements des lèvres ou des yeux. Les représentations sur la base d'informations

configurales auraient ainsi plus de chances d'être réactivées à chaque occurrence d'un même visage.

Le fait que l'hémisphère droit conserve un avantage dans la reconnaissance des visages peut ainsi être du, non pas à l'existence d'un système spécifique pour le traitement des visages au début du développement, mais au fait que l'information visuelle disponible précocement et traitée par l'hémisphère droit est particulièrement sujette à stabilisation pour la représentation et la reconnaissance de patterns complexes comme des visages. L'information traitée par l'hémisphère gauche résisterait à des variations d'un autre type que celles de l'hémisphère droit : par exemple les variations locales de formes des lèvres pendant la parole seraient mieux représentées par l'hémisphère gauche (Campbell et al., 1986). Rien n'exclut que d'autres raisons, comme le développement éventuellement précoce des connexions avec les systèmes émotionnels positifs, contribuent à la stabilisation de ces traitements.

Aussi longtemps que rien n'interfère pour modifier le processus de stabilisation, il n'y a pas de raison que l'hémisphère droit cesse de traiter les visages sur la base de l'information configurale. A un moment de son développement, ce processus deviendrait spécifique de l'hémisphère droit.

En résumé, ce type de scénario suggère que des réseaux de neurones peuvent ne pas être spécialisés pour telle ou telle tâche, mais leur spécialisation résulte de la convergence, au cours du développement, d'une série de mécanismes. D'un certain point de vue, cela revient à postuler une préorganisation et une modularité. Mais notre version comporte une marge plus importante de plasticité fonctionnelle puisque chacun des mécanismes qui vont être coordonnés pour constituer un module est susceptible d'être modifié indépendamment des autres à des moments différents de la maturation cérébrale. Il en résulte qu'un module n'est pas simplement absent ou présent mais qu'il peut prendre plusieurs formes anormales : plusieurs trajectoires anormales de développement sont possibles.

SPÉCIALISATION HÉMISPHERIQUE ET COMMUNICATION INTERHÉMISPHERIQUE

L'interaction interhémisphérique joue un rôle important dans diverses compétences cognitives adultes. Entre 7 et 11 mois on n'observe pas de signes de transfert d'information précise sur l'environnement entre hémisphères (Deruelle & De Schonen, 1991). Ce n'est qu'à l'âge de 24 mois qu'on voit apparaître un transfert interhémisphérique (attention simultanée à deux stimuli, comparaison de deux stimuli présentés chacun dans un champ visuel) (Liégeois & De Schonen, 1997; Liégeois, Bentejac & De Schonen, 2000). Ceci n'exclut pas qu'il existe des communications interhémisphériques, par voie sous corticale, qui coactiveraient ou modèleraient l'activité de réseaux sans transfert d'information précise

(ceci pourrait expliquer des cas de transfert très précoce portant sur la « catégorie visage ») (De Schonen et Bry, 1987). L'absence de coordination inter-hémisphérique par voie calleuse composée à des coordinations sous corticales contribue peut-être à stabiliser les spécialisations fonctionnelles des deux hémisphères.

En résumé, chaque région corticale recevant des inputs visuels contribuerait à l'aide de ses propriétés spécifiques à traiter des visages. A la naissance, la pauvreté ou l'absence d'activité des réseaux du gyrus fusiforme laisse au cortex visuel V1 qui est une région qui filtre essentiellement les inputs visuels, un rôle prédominant. Le cortex V1 continuera d'intervenir dans le traitement des visages même quand le gyrus fusiforme commencera lui aussi à transformer les signaux, en fournissant au gyrus fusiforme des signaux pertinents. Dans les tous premiers mois, les signaux fournis par V1 au gyrus fusiforme quand un visage se présente devant le regard constituent une information très élémentaire qui deviendra de plus en plus complexe avec l'organisation progressive de V1 et du gyrus fusiforme. Les réseaux concernés démarrent ainsi leurs interactions avec l'offre environnementale avec une information relativement simple et grossière qui va en se complexifiant. Mais cette complexification n'est pas pilotée uniquement par les propriétés de l'environnement. Même au cours de la complexification des représentations des visages, les propriétés de l'organisation neuronale contribuent largement à sélectionner et organiser les signaux provenant des visages (pour une tentative de modélisation d'un processus d'apprentissage développemental de ce type voir, Acerra et al., sous presse).

Les études qui suivent mettent en lumière les contraintes venant de l'organisation corticale et de son développement.

EFFET À LONG TERME DES LÉSIONS PRÉCOCES ET PLASTICITÉ POST LÉSIONNELLE.

Les effets des lésions cérébrales précoces sur le développement cognitif sont différents de ceux observés chez l'adulte. Chez l'enfant, la destruction de tissu neural survient dans un environnement neural encore peu ou non fonctionnellement spécialisé. La réponse cellulaire et moléculaire à la lésion varie avec l'état de maturation fœtal et postnatal (Marret et al., 1995, 1996; Redeker et al., 1998). Dans ces conditions, la plasticité neurale, quand elle est possible, peut être bénéfique ou au contraire totalement inadaptée si les connexions qui se forment ne permettent pas de réponses adaptatives à l'environnement. Selon l'état de maturation fonctionnelle de l'environnement neural, selon l'état de sensibilité aux facteurs neuroprotecteurs, donc selon l'âge d'occurrence, les conséquences d'une lésion cérébrale peuvent être drastiquement différentes.

Nous avons vu plus haut que la localisation des réseaux impliqués dans le traitement des visages est précoce. De plus, chacun des deux hémisphères traite l'information visuelle de façon différente en

agrégeant ensemble de façon différente les informations visuelles de bas niveau. Dans ces conditions, une lésion droite postérieure périnatale empêchera-t-elle le développement de traitements du visage ou bien la reconnaissance des visages se développera-t-elle dans l'hémisphère gauche ? Dans ce dernier cas, le traitement des visages se développera-t-il sur la base d'informations configurales comme c'est le cas normalement, ou sur la base d'informations locales ?

Des enfants atteints, en période périnatale, d'une lésion cérébrale unilatérale droite ou gauche, d'origine ischémique, ont été examinés entre l'âge de 5 et 17 ans. Ces enfants n'avaient pas de déficit visuel et ont tous appris au moins à déchiffrer l'écrit. Ils avaient disposé de plusieurs années pour apprendre à reconnaître des visages. Comparés à des enfants contrôles de leur âge et de même QI, certains de ces enfants manifestèrent un déficit important dans le traitement des visages dans plusieurs tâches (mais pas de réelle prosopagnosie) de façon tout à fait indépendante de la valeur de leur QI. L'exposition à l'offre environnementale ne suffit donc pas à développer un traitement normal des visages quand le cortex normalement impliqué est endommagé, malgré le cortex développe néanmoins des procédures de traitement.

Les troubles du traitement des visages étaient associés aussi bien à une lésion postérieure droite que gauche. Malgré la latéralisation très précoce dans l'hémisphère droit des réseaux impliqués dans le traitement des visages, une lésion gauche peut donc perturber, comme une lésion droite, le développement de cette compétence (Mancini et al., 1994). De plus, dans l'un des échantillons étudiés, on a examiné les capacités à traiter l'information configurale (Mancini, De Schonen, soumis). Or que la lésion soit droite ou gauche, les enfants qui présentaient un déficit de traitement des visages présentaient aussi un déficit dans le traitement configural de formes géométriques par rapport à ceux qui ne présentaient pas de déficit dans le traitement des visages.

Il est donc possible qu'une lésion périnatale perturbe des mécanismes de bas niveau qui jouent normalement un rôle important dans la compétence de traitement des visages. Mais le déficit dans ces mécanismes n'empêche pas totalement le développement du traitement des visages. Dans la mesure où le traitement configural est perturbé, le traitement des visages se développe sur la base d'un traitement local ce qui le rend moins performant dans les tâches normalement « faciles » (mais peut être plus performant dans des tâches normalement non usuelles). On peut conclure qu'il existe au moins deux trajectoires pour le développement du traitement des visages, mais que ces deux trajectoires n'aboutissent pas exactement à des représentations identiques des visages. Le développement normal utilise l'une de ces trajectoires : celle qui repose sur le

traitement configural avec des coordinations possibles avec le traitement local.

Dans certains cas d'anomalies du développement cérébral d'origine génétique, on assiste également à une trajectoire anormale du développement du traitement des visages. Les enfants atteints de syndrome de Williams ont un déficit massif dans le traitement visuo-spatial configural mais sont capables, bien que moins performants que les enfants contrôles, de reconnaître des visages. On constate que le traitement des visages chez ces enfants repose moins sur le traitement configural et beaucoup plus sur un traitement local (Deruelle et al., 1999; Donnai & Karmiloff-Smith, sous presse; Karmiloff-Smith et al., sous presse) comme chez les enfants cérébrolésés en période périnatale.

Quand la lésion est tardive au-delà de l'âge d'un an, les conséquences sont différentes. Une enfant atteinte d'une méningite à l'âge de 14 mois, est prosopagnosique encore à l'âge de 11 ans (Young et Ellis, 1989). Cette enfant est capable de catégoriser en « visages » et « non-visages » des stimuli, de percevoir et imiter une expression faciale et d'apparier des visages si cet appariement peut se faire sur la base d'un traitement local trait par trait. Cependant malgré la préservation du traitement local, cette enfant est prosopagnosique, contrairement à nos patients cérébrolésés à la naissance cités ci-dessus. La préservation d'un traitement visuel local n'est donc pas suffisante à elle seule pour compenser un déficit qui apparaît aussi tardivement que 14 mois. Par ailleurs, la préservation de la catégorie perceptive « visages » chez la patiente de Young et Ellis confirme l'hypothèse (De Schonen et Bry, 1987; De Schonen, 1989) selon laquelle la représentation corticale de cette catégorie perceptive n'est pas formée ni au même moment, ni par l'activité des mêmes réseaux que le traitement des visages individuels.

Ainsi selon notre scénario, les caractéristiques adultes du traitement des visages proviendraient des caractéristiques de mécanismes de bas niveau se développant précocement et se combinant, plutôt que des caractéristiques d'un processeur, pré-organisé d'emblée, spécifiquement dédié aux visages.

Les traitements des visages ne peuvent se développer que grâce à un état donné des réseaux de neurones. Une fois passé cet état, le même type de traitement ne peut plus se développer. Il est possible qu'apprendre à reconnaître des visages exige, comme on l'a signalé plus haut, que l'organisation des réseaux au cours de leur développement soit partiellement modelée par des inputs « simples » puis de plus en plus complexe dans le temps. Il y a probablement au moins deux moyens de développer le traitement des visages, l'un fondé d'abord sur un traitement configural qui se combinerait ensuite à un traitement local, l'autre fondé d'emblée sur un traitement plus local. Après cette période, l'architecture neuronale, les caractéristiques de l'activité des réseaux ne permettraient plus à cette capacité de se développer spontanément dans toute sa complexité.

Le décours de la plasticité corticale pour le traitement des visages est plus restreint dans le temps que celui pour le traitement du langage pour lequel il semble exister une plasticité neuronale de durée beaucoup plus longue (Bates et al., 1997; Wittelson, 1995; Vargha-Khadem & Polkey, 1992). Comme pour le traitement des visages, l'organisation nécessaire pour développer le langage n'est probablement pas localisée exclusivement dans l'hémisphère gauche. Mais la cascade des événements aboutissant à la spécialisation de réseaux corticaux dans le langage favorise l'hémisphère gauche en période péri- et post- natale.

PLASTICITÉ FONCTIONNELLE ET PRIVATION SENSORIELLE PRÉCOCE.

Les enfants atteints de cataracte congénitale bilatérale opaque, opérée après une privation visuelle de 2 à 22 mois, sont une source d'information remarquable pour comprendre les effets de l'expérience visuelle précoce. Dans une étude récente (Mondloch et al., 1998; Mondloch et al. 2000), les capacités de traitement des visages de ces enfants ont été testées après l'âge de 10 ans et comparées à des enfants contrôles voyants depuis la naissance. Diverses tâches de traitement des visages sont parfaitement réussies par ces patients. Mais une tâche d'identification de visage à travers des modifications de point de vue, révèle chez eux un déficit. Or, on constate dans d'autres tâches que ces patients sont sensibles à l'information locale et globale, mais beaucoup moins à l'information configurale des visages. Il est possible que la reconnaissance des visages sous différents points de vue requière un traitement configural comme nous l'avons suggéré plus haut. Ainsi la privation de lumière structurée à partir de la naissance pendant une période de quelques mois à deux ans, modifie les caractéristiques du traitement des visages sans empêcher totalement son développement. La privation de vision affecte l'intervention de l'un des mécanismes de traitement de bas niveau dans le développement du système de traitement des visages.

En conclusion il y a intérêt pour l'étude du développement mental comme pour l'étude du fonctionnement mental adulte, à décomposer les compétences en mécanismes les composant et à examiner le développement de ces mécanismes et leur conjugaison. Nous avons vu par exemple qu'il n'y a pas un système unique qui traite toute information relative aux visages, mais des systèmes distincts se développant à des moments différents (traitement configural, local, global, traitement de l'identité, des expressions émotionnelles...). L'expérience précoce contribue à modeler certaines caractéristiques du fonctionnement neuronal (voir l'effet de la privation visuelle temporaire chez le nourrisson), mais on ne connaît ni les limites, ni l'étendue des effets de cette expérience à l'heure actuelle.

La maturation corticale périnatale et postnatale procède par vagues successives affectant divers réseaux de neurones qui deviennent fonctionnels avant d'autres et interagissent avec l'offre environnementale avant d'autres. Le développement cérébral et cognitif semble procéder par réorganisations successives préservant l'indépendance entre certains grands domaines fonctionnels. Ces décalages temporels pourraient être un facteur important d'organisation cognitive et de spécialisations fonctionnelles des réseaux. L'implication de réseaux localisés et spécialisés dans une compétence précoce ne signifie pas que ces réseaux contiennent un modèle réduit de la dite compétence, mais qu'ils constituent plutôt des pré-requis qui vont guider les interactions avec leur environnement neuronal et modifier par-là même leur propre fonctionnement. La localisation corticale précoce d'un réseau intervenant dans une compétence ne signifie pas que seule cette région est capable de développer la compétence considérée. La spécialisation fonctionnelle d'une région peut dépendre d'un état de fonctionnement à un moment donné et de son interaction avec l'offre de l'environnement (neuronal ou extérieur à l'organisme) à cette période là. Le fait que le substrat neuronal d'une compétence soit localisé précocement ne signifie pas que ce substrat est fonctionnellement spécialisé d'emblée, et n'exclut pas l'existence possible d'autres trajectoires de développement réalisant une compétence analogue mais pas toujours identique dans un autre ensemble de réseaux (si les afférences et efférences le permettent). Mais, inversement, la possibilité d'autres trajectoires de développement n'exclut pas l'existence de contraintes sur la localisation et la spécialisation fonctionnelle, de telle sorte que les trajectoires possibles de développement n'aboutissent pas au même résultat. Le développement d'une compétence peut impliquer, à un moment donné de son développement, l'activité et la collaboration de réseaux qui fonctionneront ultérieurement de façon indépendante mais coordonnée.

Références

- Anisfeld M., Turkewitz G., Rose S.A., Rosenberg F.R., Sheiber F.J., Couturier-Fagan DA., Ger JS et Sommer I. (2001). No compelling evidence that newborns imitate oral gestures. *Infancy*, 2, 111-122.
- Atkinson, J., et Braddick, O. (1989). Development of basic visual functions. In A. Slater and G. Bremner (Eds.), *Infant Development*. London : Lawrence Erlbaum.
- Atkinson, J. (1998). The visual system in early development. In : F. Simion & G. Butterworth, *The Development of Sensory, Motor and Cognitive Capacities in Early Infancy : From Perception to Cognition* (pp. 1-24). Hove, Sussex : Erlbaum
- Banks, M.S., et Dannemiller, J.L. (1987). Infant visual psychophysics. In P. Salapatek and L. Cohen (Eds.), *Handbook of infant perception* (Vol. 1). Orlando : Academic Press, pp. 115-184.

- Banks, M.S., Stephens, B.R., et Hartmann, E.E. (1985). The development of basic mechanisms of pattern vision. Spatial frequency channels. *Journal of Experimental Child Psychology*, 40, 501-527.
- Bartrip, J., Morton, J. and De Schonen, S. (in press). Face processing in one-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*
- Bates, E., Thal, D., Trauner, D., Fenson, J., Aram, D., Eisele, J. & Nass, R. (1997). From first words to Grammar in children with focal brain injury. *Developmental Neuropsychology*, 13, 275-344.
- Bushnell, I.W.R., Sai, F. & Mullin, J.T. (1989). Neonatal recognition of the mother's face. *British Journal of Developmental Psychology*, 7, 3-15.
- Cabeza, R. & Nyberg, L. (1997). Imaging cognition : An empirical review of PET studies with normal subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 1 1-26
- Campbell, R., Landis, T. et Regard, M. (1986). Face recognition and lipreading : a neurological dissociation. *Brain*, 109, 509-521.
- Chugani, H.T., Phelps, M.E., & Mazziotta, J.C. (1987). Positron emission tomography study of human brain functional development. *Annals of Neurology*, 22, 487-497.
- De Haan, M. & Nelson, C. (1997). Recognition of the Mother's Face by Six-month-old Infants : a Neurobiological Study. *Child Development*, 68, 187-210.
- De Haan, M., Johnson, M., Hatzakis, H.A. & Pacalis, O. (1999). Does face specificity develop ? A high-density ERP study. *IX European Conference on developmental Psychology, Spetses, Greece, September 1-5*, p. 344
- De Haan, M., & Nelson, C. (1999). Brain activity differentiates face and object processing in 6-months-old infants. *Developmental Psychology*, 35, 1113-1121
- De Renzi, E. Prabi, D. Carlesimo, G.A., Siveri, M.C. & Fazio, F. (1994). Prosopagnosia can be associated with damage confined to the right hemisphere - an MRI and PET study and a review of the literature. *Neuropsychologia*, 32, 893-902
- De Schonen, S. & Bry, I. (1987). Interhemispheric communication of visual learning : A developmental study in 3-6- month-old infants. *Neuropsychologia*, 25, 601-612.
- De Schonen, S. (1989). Some reflections on brain specialisation in facedness and physiognomy processing. In A. Young & H.D. Ellis (Eds), *Handbook of research on face processing* (pp. 379-389). Amsterdam : North-Holland.
- De Schonen, S., & Mathivet, E. (1989). First come first serve : A scenario about the development of hemispheric specialization in face processing in infancy. *European Bulletin of Cognitive Psychology (CPC)*, 9, 3-44.
- De Schonen, S., & Mathivet, E. (1990). Hemispheric asymmetry in a face discrimination task in infants. *Child Development*, 61, 1192-1205.
- De Schonen, S., Deruelle, C., Mancini, J., Pascalis, O. (1993). Hemispheric differences in face processing and brain maturation. In B. de Boysson-Bardies, S. De Schonen, P. Juszyk, P. MacNeilage, & J. Morton (Eds.), *Developmental Neurocognition : Speech and Face Processing in the First Year of Life* (pp. 149-163). Dordrecht : Kluwer.

- De Schonen, S., Gil de Diaz, M., & Mathivet, E. (1986). Hemispheric asymmetry in face processing in infancy. In H.D. Ellis, M.A. Jeeves, F. Newcombe & A. Young (Eds), *Aspects of face processing* (pp. 199-210). Dordrecht : Martinus Nijhoff.
- De Schonen, S., Mathivet, E., & Deruelle, C. (1989). A timing puzzle. *European Bulletin of Cognitive Psychology (CPC)*, 9, 147-159.
- Deruelle C. et De Schonen S. (1995). Pattern processing in infancy : hemispheric differences in the processing of shape and location of visual components. *Infant Behavior and Development*, 18, 123-132.
- Deruelle C. et De Schonen S. (1998). Do the right and left hemispheres attend to the same visuo-spatial information within a face in infancy ? *Developmental Neuropsychology*, 14, 1998, 535-554.
- Deruelle, C., & De Schonen, S. (1991). Hemispheric asymmetries in visual pattern processing in infancy. *Brain and Cognition*, 16, 151-179
- Deruelle, C., Livet, M.O., Mancini, J., Cassé-Perrot, C. & De Schonen, S. (1999). Configural and local processing of faces in children with Williams syndrome. *Brain and Cognition*, 41, 276-298
- Donnai, D. & Karmiloff-Smith, A. (in press) Williams syndrome : From genotype through to the cognitive phenotype. *American Journal of Medical Genetics : Seminars in Medical Genetics*.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA : MIT Press
- Fontaine, R. (1984). Imitative skills between birth and six months. *Infant behavior and Development*, 7, 323-333.
- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J.C. & Anderson, A.W. (2000a). Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nat. Neurosci.* 3, 191-197
- Gauthier, I., Tarr, M.J., Moylan, J., Skudlarski, P., Gore, J.C., Anderson, A.W. (2000). The fusiform "face area" is part of a network that processes faces at the individual level. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12, 495-504.
- Gauthier, I., Tarr, M.J., Anderson, A.W., Skudlarski, P., Gore, J.C. (1999). Activation of the middle fusiform 'face area' increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature Neuroscience*, 6, pp.568-573.
- Geschwind, N., & Galaburda, A. (1985). Cerebral lateralisation : biological mechanisms, associations and pathology. *Archives of Neurology*, 42, 428-459..
- Goren, C.C., Sarty, M. & Wu, P.Y.K. (1975). Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants. *Pediatrics*, 56, 544-549.
- Hécaen, H.T. & Angelergues, R. (1962). Agnosia for faces (prosopagnosia). *Archives of Neurology*, 92-100.
- Hellige, J.B. (1993). *Hemispheric asymmetry. What's right and what's left*. Harvard University Press : Cambridge, Mass., London
- Huttenlocher, P.R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*, 28, 517-527.
- Huttenlocher, P.R. & de Courten, C. (1987). The development of synapses in striate cortex of man. *Human Neurobiology*, 6, 1-19.
- Huttenlocher, P.R. (1994). Synaptogenesis, synapse elimination and neural plasticity in human cerebral cortex. In C.A. Nelson (Ed.) *Threats to optimal development : Integrating biological, psychological, and social*

- risk factors. *Minnesota Symposium on Child Psychology*, Vol. 27. Hillsdale NJ : Lawrence Erlbaum Associates, pp. 35-54.
- Iverson, P. & Kuhl P.K. (2000). Perceptual magnet and phoneme boundary effects in speech perception : do they arise from a common mechanism ? *Percept Psychophys.*, 62, 874-86.
- Johnson, M. et Morton, J. (1991). *Biology and Cognitive Development : The Case of Face Recognition*. Oxford : Blackwells.
- Johnson, M.H., Dziurawiec, S., Ellis, H.D. & Morton, J. (1991). Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline. *Cognition*, 40, 1- 19.
- Kanwisher, N., McDermott, J., Chun, M.M. (1996). A module for the visual representation of faces ? *Neuroimage*, 3, S361.
- Karmiloff-Smith, A., Brown, J.H., Grice, S. & Paterson, S. (In Press) Dethroning the myth : Cognitive dissociations and innate modularity in Williams syndrome. *Developmental Neuropsychology* (in press).
- Kleiner, (1993). Specific versus non-specific face recognition device ? In B. de Boysson-Bardies, S. De Schonen, P. Juszyk, P. MacNeilage, J. Morton (Eds.), *Developmental Neurocognition : Speech and Face Processing in the First Year of Life*. Dordrecht : Kluwer, 125-134.
- Liegeois, F. & De Schonen, S. (1997). Simultaneous attention in the two visual hemifields and interhemispheric integration : A developmental study on 20- to 26-month-old infants. *Neuropsychologia*, 35, 381-385.
- Liegeois, F. Bentejac, L., De Schonen, S. (2000). When does interhemispheric integration of visual events emerge in infancy ? A developmental study on 19- to 28-month-old infants. *Neuropsychologia*, 38, 1382-1389.
- Mancini, J., De Schonen, S., Deruelle, C. & Massoulier, A. (1994). Face recognition in children with early right or left brain damage. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 36, 156-166.
- Marret, S., Gressens, P., Evrard, P. (1996). Neuronal migration disorders induced by ibotenate in the neocortex. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 17 : 543-551.
- Marret, S., Mukendi, R., Gadiisseux, J.F., Gressens, P., Evrard, P. (1995). Effect of ibotenate on brain development : an excitotoxic mouse model of microgyria and posthypoxic like lesions. *J. Neuropathol. Exp. Neurol.*, 54 : 358-370.
- McCarthy, G., Puce, A., Gore, J.C., & Allison, T. (1997). Face specific processing in the human fusiform gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 605-610.
- Mondloch, C. Lewis, T.L., Budreau, D.R., Maurer, D., Dannemiller, J.L., Stephens, B.R. & Kleiner, K.A., (2000). Face perception during early infancy. *Psychological Science*
- Mondloch, C., Geldart, S., Maurer, D., De Schonen, S., Lewis, L., Brent, H.P. (1998). The importance of early visual experience for the development of face processing. *Poster presented at the European Research Conference : « Brain development and Cognition in Human Infants »*, San Feliu de Guixols, September 1998.
- Mondloch, C., Maurer, D. LeGrand, R., Geldart, S., De Schonen, S., Lewis, L., Brent, H.P., Levin, A.V. (2000). The effects of early visual

- deprivation on the development of cortical specialization for face perception. *Paper at the ICIS 2000*, Brighton (16-19 July) (and Submitted)
- Morton, J. et Johnson, M.H. (1991). Conspic and conlern : A two-process theory of infant face recognition. *Psychological Review*, 98, 164-181.
- Moscovitch, M., Winocur, G. & Behrmann, M. (1997). What is special about face recognition ? Nineteen experiments on a person with visual object agnosia and dyslexia but normal face recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 555-604.
- Neville, H. (1990). Intermodal competition and compensation in development. Evidence from studies of the visual system in congenitally deaf adults, In A. Diamond, (Ed.), *The development and neural bases of higher cognitive function*, (vol. 608, pp. 71-91). *Annals of the New York Academy of Sciences*. New York : New York Academy of Science Press.
- Pascalis, O. & De Schonen, S. (1995). Recognition Memory in 3-4 day-old human infants. *NeuroReport*, 5, 1721-1724.
- Pascalis, O., de Haan, M., Nelson, C. & De Schonen, S. (1998). Long term recognition memory for faces assessed by visual paired comparison in 3- and 6-month-old Infants. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 24, 249-260.
- Pascalis, O., De Schonen, S., Morton, J., Deruelle, C. & Fabre-Grenet M. (1995). Mother's face recognition by neonates : a replication and an extension. *Infant Behavior and Development*, 18, 79-85.
- Redecker, C., Hagemann, G., Marret, S., Evrard, P., Witte, O.W., Gressens, P. (1998). Long-term evolution of excitotoxic cortical dysgenesis induced in the developing rat brain. *Dev. Brain Res.*, 109 : 109-113
- Rossion, B., Dricot, L., Devolder, A., Bodart, J.M., Crommelinck, M., De Gelder, B., Zoontjes, R. (2000). Hemispheric asymmetries for whole-based and part-based face processing in the human fusiform gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 793-802.
- Scheibel, A. (1993). Dendritic structure and language development. In B. de Boysson-Bardies, S. De Schonen, P. Juszyk, P. MacNeilage, J. Morton (Eds.), *Developmental Neurocognition : Speech and Face Processing in the First Year of Life*. Dordrecht : Kluwer, 51-62.
- Simion, F., Valenza, E., Umiltà, C., Dalla Barba, B. (1998). Preferential orienting to faces in newborns : a temporal-nasal asymmetry. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* Oct ; 24(5) : 1399-405.
- Simion, F., Valenza, E., Macchi Cassia, V., Turati, C., Umiltà, C. (2000b). Newborns' preference for structural properties. *Euresco Conference on «Brain development and Cognition in human infants – II »*. La Londe-Les Maures, France, September 15-20.
- Simion, Valenza & Umiltà, (1998). Mechanisms underlying face preference; In F. Simion & G. Butterworth, *The Development of Sensory, Motor and Cognitive Capacities in Early Infancy : From Perception to Cognition* (pp. 87-101). Hove, Sussex : Erlbaum
- Slater, A.M. (1993). Visual perceptual abilities at birth : implications for face perception. In B. de Boysson-Bardies, S. De Schonen, P. Juszyk, P. MacNeilage, J. Morton (Eds.), *Developmental Neurocognition : Speech and Face Processing in the First Year of Life*. Dordrecht : Kluwer, 125-134.

- Slater, A.M., Bremner, G., Johnson, S.P., Sherwood, P., Hayes, R., Brown, E. (2000). Newborn infants' preference for attractive faces : The role of internal and external facial features. *Infancy*, 1., 265-274.
- Slater, A.M., Morison, V., et Somers, M. (1988). Orientation discrimination and cortical functioning in the human newborn. *Perception*, 17, 597-602
- Slater, A.M., Van der Schurenburg, C., Brown, E., Badenoch, M., Butterworth, G., Parsons, S. Samuels, C. (1998). Newborn infants prefer attractive faces. *Infant behavior and Development*, 21, 345-354.
- Stiles, J. & Thal, T. (1993). Linguistic and spatial cognitive development following early focal brain injury : Patterns of deficit and recovery. In M. Johnson (Ed.), *Brain development and cognition : A reader* (pp. 643-664). Oxford, England : Blackwell.
- Tanaka, J.W. & Farah, M.J. (1993). Parts and wholes in face recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46A, 225-245
- Turkewitz, G. (1989). Face processing as a fundamental feature of development. In A. Young & H.D. Ellis (Eds.), *Handbook of research on face processing* (pp. 401-404). Amsterdam : North-Holland
- Tzourio-Mazoyer, N., de Shonen, S., Quinton, O., Crivello, F., Reutter, B., Mazoyer, B. *The Right Fusiform Face Area Is Functional in Two-month Old Infants* (submitted)
- Valenza, E., Simion, F., Cassia, V.M., Umiltà, C. (1996). Face preference at birth. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.*, 22, 892-903.
- Vargha-Khadem, F., & Polkey, C.E. (1992). A review of cognitive outcome after hemidecortication in humans. In F. D. Rose & M. H. Johnson (Eds.), *Recovery from Brain Damage. Reflections and Directions.* (pp. 137-148). London : Plenum Press.
- Wittelton, S.F. (1995). Neuroanatomical bases of hemispheric functional specialization in the human brain : Possible developmental factors. In F. L. Kitterle (Ed.), *Hemispheric Communication : Mechanisms and Models.* (pp. 61-84). Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum associates.
- Young, A.W., Newcombe, F., de Haan, E.H.F., Small, M., Hay, D.C. (1993). Face perception after brain injury : selective impairments affecting identity and expression. *Brain*, 116, 941-959.
- Young, A.W. & Ellis, H.D. (1989). Childhood prosopagnosia. *Brain and Cognition*, 9, 16-29.
- Young, A.W., Hellawell, D.J. & Hay, D.C. (1987). Configural information in face perception. *Perception*, 16, 747-759.