

N° 33

Sensorialité

- De quelques fonctions de l'olfaction au cours du développement précoce
B. SCHAAL
- Sentir et connaître par le toucher chez le bébé
A. STRERI, H. SEGOND
- Les compétences auditives des bébés
C. BARUCH
- La perception de la parole chez le nouveau-né. Une approche expérimentale et neuropsychologique
J. BERTONCINI, G. DEHAENE-LAMBERTZ
- Le développement du système vestibulaire chez le nourrisson
F. JOUEN
- Développement du système visuel du nouveau-né
I. CARCHON
- La reconnaissance des visages dans la première année de vie
S. de SCHONEN, J. MANCINI
- Développement visuel : modèles neurobiologiques des fonctions visuelles
L. BOUTKHIL, I. OTTO, Y. BURNOD



RÉDACTION

Fondateurs

B. Dreyfus-Madelin et C.J. Madelin

Directeur de la publication

P. de Gavre

Comité scientifique

M. Basquin (France) - C. Chevrie-Müller (France) - E. Del Giudice (Italie) - T. Deonna (Suisse) - B. Ducarne (France) - M. Dugas (France) - O. Dulac (France) - B. Échenne (France) - P. Évrard (Belgique) - F. Gaillard (Suisse) - P. Lacert (France) - Y. Lebrun (Belgique) - M.-C. Mouren-Simeoni (France) - J. Narbona Garcia (Espagne) - G. Ponsot (France) - J.A. Rondal (Belgique) - M. Thomson (Royaume-Uni) - R. de Villard (France).

Comité de rédaction

Rédacteur en chef

C.J. Madelin,
15, rue Lauriston, 75116 Paris
Tél. : 33 (1) 45 00 53 01

Rédacteurs - M. Ballanger (France) - M. Barbeau (France) - S. Baudouin-Chial (France) - C. Billard (France) - A. Dumont (France) - J. Everett (Québec) - C. Gérard (France) - I. Jambaque (France) - M.-T. Le Normand (France) - I. Martins (Portugal) - N. Matha (France) - P. Messerschmitt (France) - A. Picard (France) - O. Ramos (France) - S. Stonehouse (France) - H. Szliwowski (Belgique) - J. Thomas (France) - S. Valdois (France) - A. Van Hout (Belgique) - G. Willems (Belgique).

Rubriques • **Pathologie** - *Épilepsie*: I. Jambaque / *Équipe* O. Dulac - *Autisme*: O. Ramos - *Aphasies acquises*: A. Van Hout - *Dysphasies*: C. Billard - *Dyslexies* - *Troubles de l'attention*: J. Thomas, M.-C. Nedey-Saiag - *Dyscalculies* • **Diagnostic précoce des troubles d'apprentissage**: G. Willems • **Dépistage des lésions cérébrales et prévention précoce**: A. Picard • **Développement normal et pathologique**: B. Rogé • **Techniques d'évaluation**: C. Chevrie-Müller / C. Gérard • **Technologies, prothèses et programme de rééducation**: A. Dumont • **Traitements**: C. Gérard • **Expertise et neuropsychologie**: M. Barbeau et S. Baudouin-Chial • **Neuropsychologie et psychiatrie**: P. Messerschmitt • **Explorations fonctionnelles neuro psychologiques**: N. Matha • **Histoire de la neuropsychologie**: M.-T. Le Normand • **Linguistique**: Y. Lebrun / S. Stonehouse • **Santé publique**: M. Ballanger • **Associations**: C.J. Madelin.

SOMMAIRE

Éditorial
A. PICARD 75

Introduction
H. BLOCH 76

De quelques fonctions de l'olfaction au cours du développement précoce
B. SCHAAL 78

Sentir et connaître par le toucher chez le bébé
A. STRERI, H. SEGOND 85

Les compétences auditives du bébé
C. BARUCH 89

La perception de la parole chez le nouveau-né. Une approche expérimentale et neuropsychologique
J. BERTONCINI, G. DEHAENE-LAMBERTZ 94

Le développement du système vestibulaire chez le nourrisson
F. JOUEN 99

Le développement du système visuel du nouveau-né
I. CARCHON 105

La reconnaissance des visages dans la première année de vie
S. de SCHONEN, J. MANCINI 111

Le développement visuel : modèles neurobiologiques des fonctions visuelles
L. BOUTKHIL, I. OTTO, Y. BURNOD 118

CONTENTS

Editorial
A. PICARD 75

Introduction
H. BLOCH 76

Some functions of olfaction in early human development
B. SCHAAL 78

How a baby senses and becomes acquainted with its environment through touch
A. STRERI, H. SEGOND 85

Infant's auditory competences
C. BARUCH 89

Speech perception in the new-born baby. An experimental and neuropsychological approach
J. BERTONCINI, G. DEHAENE-LAMBERTZ 94

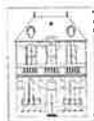
The development of the vestibular system in young babies
F. JOUEN 99

The development of the ocular system in the new-born child
I. CARCHON 105

Face processing in the first year of life
S. de SCHONEN, J. MANCINI 111

Visual development: a neuro-biological model of ocular function
L. BOUTKHIL, I. OTTO, Y. BURNOD 118

ÉDITEUR



PDG COMMUNICATION
30, rue d'Armaillé
75017 PARIS
Tél. : 33 (1) 40.55.05.95

Président,
directeur de la publication :
Patrick de GAVRE

Fax : 33 (1) 45 74 65 67

Publicité : Liliane LEPERT

Fax : 33 (1) 40 55 90 70

TARIFS 1995

Abonnement annuel (5 numéros)

- France-DOM :
Établissements-Associations . 680 F
Médecins 495 F
Étudiants en médecine⁽¹⁾ -
Infirmiers⁽¹⁾ 340 F
(1) joindre un justificatif

- CEE-TOM 840 F
- Tous autres pays⁽²⁾ 1 150 F

(2) expédition par « AVION » tous suppléments inclus.

Modalités - Le paiement à facturation est accepté pour les établissements et associations. Dans tous les autres cas, joindre le règlement à la commande. Commande et chèque à rédiger à l'ordre de : « ANAE » (à l'exclusion de toute autre mention).

Les règlements par  sont acceptés. Voir nos bulletins d'abonnements à l'intérieur de la publication.

Changement d'adresse - Pour tous les abonnés, joindre la dernière étiquette d'expédition, ou indiquer les références exactes de l'abonnement, avec votre nouvelle adresse et envoyer à : « ANAE ».

Adressez vos envois à : ANAE
30, rue d'Armaillé - 75017 PARIS
Tél. : 33 (1) 40 55 05 95
Fax : 33 (1) 45 74 65 67

Ventes des numéros déjà parus

Prix unique de l'exemplaire
(port inclus) 190 F
(Métropole uniquement - étranger nous consulter)

Pour toute commande, joindre votre règlement à l'ordre de : « ANAE ».

Librairies - Réassort

Chez l'éditeur - Fax : 33 (1) 45 74 65 67

N° d'inscription à la commission des publications et agences de presse : n° 71 554. Tirage C.P.P.A.P. : 1 200 ex. - Tirage spécial : 1 350 ex. Composition : PPC, 36, av. des Ternes - 75017 Paris. Imprimerie : Barnéoud (Bonchamp-lès-Laval) n° 10184

ANAE, analysée par l'INIST-CNRS est référencée dans la base de données PASCAL. Accès minitel : 36 29 36 01.

Editorial

Ce numéro spécial sur « La Sensorialité et la Perception chez le Nourrisson » nous paraissait important pour les lecteurs d'*A.N.A.E.*, et ce, à plusieurs titres. Tout d'abord, les connaissances sur les compétences du nourrisson ont beaucoup évolué ces vingt dernières années, et donc une mise à jour nous a paru utile. Ensuite, certaines de ces connaissances remettent en question l'hypothèse d'un appareil psychologique unitaire : par exemple, le développement indépendant des capacités perceptives de lecture labiale, de reconnaissance des visages et celle des expressions faciales émotionnelles. Enfin, dans certains domaines comme celui de la perception de la parole, l'étude d'enfants souffrant de lésions cérébrales précoces permet de montrer des anomalies d'installation. Cela ouvre la voie à l'étude du développement pathologique du nourrisson, tout d'abord des perceptions, puis des autres processus cognitifs, permettant le développement de la neuropsychologie du nourrisson.

A. Picard
Service de neurologie et de rééducation infantile
hôpital Raymond-Poincaré,
92380 Garches

Introduction

H. BLOCH*

* Laboratoire de psychobiologie du développement, EPHE - CNRS, Paris

Les recherches consacrées à la prime enfance ont profondément modifié le regard que porte l'adulte sur le bébé. De nombreuses compétences lui sont maintenant reconnues. Pourtant, le bébé continue d'apparaître, à première vue, démuné de beaucoup des moyens qui, chez l'enfant ou l'adulte, assurent des échanges efficaces avec le milieu. Ses conduites, ses buts, les objectifs de ses mouvements ou de ses actes opposent à l'observation naturaliste une sorte d'opacité que la seule intuition ne peut réduire. Si le tout-petit nous est devenu plus intelligible qu'il ne l'a longtemps été, c'est grâce à la fois au concours de disciplines diverses et à des méthodes de contrôle systématique. Les premières ont permis des hypothèses que l'observation des comportements ne pouvait seule permettre de formuler. Tous les articles qui suivent montrent ce que la psychologie du développement doit aux avancées neuro-anatomiques et neurophysiologiques. Les secondes ont apporté les validations nécessaires et ont aussi permis de comprendre que les chemins empruntés au début de la vie ne participent pas au développement de façon uniforme. On trouvera aussi, dans la suite de ce numéro, plusieurs exemples de fonctionnements initiaux vite abandonnés au profit de modes plus puissants et d'ajustements transitoires : la modalité visuelle en fournit un exemple avec la poursuite saccadique qui, si elle est encore dominante dans les premiers jours de vie, se transforme très vite au profit d'un mode composite de fonctionnement proche de celui de l'adulte.

A sa naissance, le bébé est déjà riche d'une protohistoire à laquelle nous n'avons encore que des accès brefs, malaisés et tardifs. Suffisants cependant pour montrer que la naissance s'inscrit dans une continuité dont pourront témoigner certaines conduites, comme les préférences olfactives ou les discriminations auditives. Dans d'autres domaines, où il est plus difficile d'envisager l'existence d'une expérience prénatale et d'effets transposables à la vie postnatale, on possède désormais de solides indices d'une préparation aux modes de réponse du bébé : les mouvements des yeux repérés chez le fœtus à partir de la 26^e semaine témoignent d'une motricité oculaire qui sera d'emblée disponible au nouveau-né, fût-il prématuré, pour se montrer actif à l'égard de son environnement et distinguer des stimulations visuelles. Le passage d'un milieu confiné et étroit, souvent décrit comme particulièrement pauvre, à un milieu largement ouvert ne semble pas commander un ordre de succession dans l'apparition des réponses, qui tiendrait à une

suprématie initiale des stimulations proximales. On avait en effet pu croire que les stimulations de contact, reçues dans l'utérus maternel, étaient mieux perçues et traitées par le nouveau-né que les stimulations de sources distales. Une telle hypothèse, encore défendue par Birch en 1962, n'a pas reçu les confirmations attendues. La modalité tactile n'est d'abord exercée activement que dans la zone buccale. Cela ne veut pas dire que le nouveau-né ne soit pas sensible aux contacts et caresses sur d'autres régions corporelles, mais il n'est pas sûr que ces excitations servent pareillement à la connaissance. La sensibilité tactile manuelle, quant à elle, se développe plus lentement et ne devient réellement active que vers le 4^e mois. A cet âge encore l'acuité tactile manuelle apparaît faible au regard de celle d'autres modalités. En mettant la main de bébés en contact avec des textures de plus en plus ou de moins en moins rugueuses, nous avons, avec P. Cougnot, montré qu'à 4 mois un gradient nettement perçu par l'adulte ne l'est pas par l'enfant. Comme le lecteur pourra s'en convaincre, le nouveau-né exerce autant, si ce n'est plus, ses sensibilités téléocéphales que les autres. Cela conduit à penser que, s'il y a continuité, sans doute celle-ci ne se manifeste-t-elle pas seulement par les effets d'une expérience prénatale.

A la naissance, le bébé est doté de systèmes sensoriels qui sont tous fonctionnels. Tous peuvent répondre à des stimulations de l'environnement. De ce fait, le bébé se trouve plongé dans un monde diversifié mais sur lequel il n'est pas dépourvu de tout moyen d'action. Certains systèmes, comme le système vestibulaire, se sont établis à une période précoce de la gestation. D'autres, comme l'audition et la vision, plus tardivement. Cet ordre chronologique ne paraît pas imposer un niveau de fonctionnement ; de même qu'il n'impose ni un rythme ni une durée de développement.

Quelle que soit leur date d'apparition, les systèmes sensoriels sont tous, cependant, encore immatures au terme de naissance. Ils n'atteindront leur plein développement que plusieurs mois ou années plus tard. Cette immaturité, qui varie d'un système à l'autre, donne l'image d'un organisme mosaïque, doué de niveaux de compétence divers. Il est possible que cela même protège le bébé d'un flux trop important de stimulations, comme le supposent Turkewitz et Kenny (1985). L'immaturité est aussi responsable de limitations et de contraintes qui confèrent aux réponses du bébé des traits spécifiques qu'il importe de considérer.

L'immaturité posturale, signe le plus évident dans notre espèce d'une « dépendance » du nouveau-né et du nourris-

son à l'égard de son entourage humain, limite drastiquement à la fois les mouvements corporels et le maintien de positions propices à la surveillance de l'environnement : on sait combien la verticalité de la tête est importante à cet égard. Pour évaluer les compétences perceptives du bébé, il est donc nécessaire de lui ménager des postures permettant leur actualisation, et tout d'abord favorisant le maintien de l'état d'éveil calme.

Tout exercice sensoriel réclame la mobilité soit de l'organe récepteur lui-même, comme c'est le cas pour l'œil ou la main, soit de la partie du corps qui en est le support. D'une façon générale, y compris pour les organes doués de motilité autonome, l'exercice sensoriel est en fait sensorimoteur et associe souvent plus d'un segment corporel. Une des réponses les plus précoces, la réponse d'orientation, en témoigne éloquemment. Elle permet au bébé d'orienter un système récepteur vers la source de stimulation de manière à en optimiser la perception. Cette réponse est obtenue dès les premières heures de vie. Elle témoigne d'une alerte et permet au bébé de localiser les stimuli dans l'espace environnant. Elle opère donc une distinction de régions spatiales différentes. Quand l'intensité des stimuli et leur position spatiale s'accordent à la bande passante du système sensoriel sollicité — laquelle est plus restreinte, dans la plupart des modalités, que chez l'adulte —, la réponse d'orientation peut amener à une centration du stimulus et à la perception de qualités d'objet, ce qu'il est convenu de réunir sous le terme générique de perception de forme. On sait maintenant que les deux formes de traitement — celle qui concerne la place et celle qui concerne la forme — ne sont pas assurées par les mêmes structures du système nerveux central. Les secondes font appel à des niveaux plus élevés que les premières. Leur possible coexistence a fait justice de thèses qui concevaient le développement comme un processus de hiérarchisation simple. On a cru longtemps que les actes du bébé n'étaient commandés qu'à des niveaux bas. Dans les années 70 encore, nombreux étaient ceux qui les pensaient régis par les structures sous-corticales, en particulier par le colliculus. On a de fortes raisons de considérer aujourd'hui que l'activité corticale du nouveau-né n'est pas nulle et, si le processus de corticalisation, la maturation des aires associatives, l'extension croissante des relations intracorticales sont encore à bon droit invoqués comme facteur de nombreux changements repérés au cours de la première année (Johnson, 1990) il est patent aussi que les conduites du nouveau-né impliquent l'activité, simultanée ou en série, de

plusieurs étages du système nerveux central. Les modèles connexionnistes, dont on trouvera ici, en guise de conclusion, une illustration argumentée, offrent sur ce point des hypothèses prometteuses.

Comme on pourra en juger, les comportements du très jeune bébé offrent ample matière à réflexion. Il ne suffit pas de pouvoir réaffirmer ses capacités perceptives initiales pour déterminer comment elles se développeront : dans bien des cas, les changements qui se produisent au cours des premiers mois rapprochent, pourrait-on dire, le bébé de l'enfant et de l'adulte. Cela ne signifie pas toujours un progrès dans l'ordre des performances. On en verra un exemple dans la reconnaissance des sons de parole. Le progrès de performance s'accompagne souvent d'un changement dans le mode d'activité déployé, dans la stratégie utilisée. Il est difficile d'en rendre compte sans prendre en considération des notions d'attention, d'objectif, de but, de signification. Toutes notions qui situent les fonctionnements perceptifs dans la sphère cognitive et suggèrent que l'expérience ne se résout pas à une simple fonctionnalité. Cela incite à interroger l'expérience précoce non seulement en termes de pré-requis précis à des émergences ultérieures, mais encore à se demander si elle n'importe pas plus par la cohérence — le mot revient dans tous les articles de ce numéro — qu'elle procure. Autrement dit, en exerçant ses sensibilités, en organisant ses perceptions, le bébé n'acquiert-il « que » des connaissances sur le monde extérieur, ou bien n'apprend-il pas surtout à utiliser au mieux ses moyens propres ? La manne, c'est-à-dire la revue d'ensemble des capacités perceptives précoces, était trop abondante pour que cette question soit abordée ici. Elle surgit des conclusions présentées et ouvre, pensons-nous, la voie à des champs d'investigation nouveaux ou renouvelés.

RÉFÉRENCES

- [1] BIRCH (H.G.) : « Dyslexia and the maturation of visual function », in J. Money (ed.), *Reading disability*, Baltimore, Johns Hopkins Press, 1962.
- [2] JOHNSON (M.H.) : « Cortical maturation and perceptual development », in H. Bloch & B.I. Bertenthal (eds.), *Sensory-motor organization and development in infancy and early childhood*, Dordrecht: Kluwer Publ., 1990, pp. 145-162.
- [3] TURKEWITZ (G.), KENNY (P.) : « The role of developmental limitations of sensory input on sensory/perceptual organization », *Developmental and Behavioral Pediatrics*, 6, 1985, pp. 302-306.

De quelques fonctions de l'olfaction au cours du développement précoce

B. SCHAAL

Laboratoire de comportement animal, CNRS URA 1291, Station de physiologie de la reproduction, 37380 Nouzilly, France

RÉSUMÉ : *De quelques fonctions de l'olfaction au cours du développement précoce.*

Le nouveau-né humain se montre réactif à une grande variété de stimulations olfactives, en particulier celles qui ont été investies d'une signification psychologique au contact de la mère ou de l'aliment. L'implication potentielle de l'olfaction est envisagée dans plusieurs domaines fonctionnels de la vie quotidienne de l'enfant : la modulation du niveau de vigilance, la régulation de la préparation à la prise alimentaire et de la prise alimentaire elle-même, le sommeil, l'apprentissage, l'expression émotionnelle et l'attachement à la mère. Quelques implications cliniques de l'olfaction sont discutées.

Mots clés : Nouveau-né humain — Olfaction — Alimentation — Sommeil — Relation mère-enfant — Développement cognitif — Développement émotionnel.

SUMMARY: *Some functions of olfaction in early human development.*

Human newborns are sensitive to a variety of odour stimuli, especially those deriving from the maternal body or to which reinforcing power has been attached through previous interactions. Several functional domains of the infant's daily life are surveyed, in which olfactory regulation may be involved; these include: modulation of arousal, feeding-preparatory responses and feeding itself, sleep, cognitive and emotional responses, and attachment. Several potential clinical implications of early olfaction are discussed.

Key words: Human newborn — Olfaction — Arousal and sleep — Breast-and bottle-feeding — Mother-infant relationship — Cognitive development — Emotional development.

La fonction olfactive est particulièrement importante pour les nouveau-nés de la série des mammifères. Ce groupe zoologique se caractérise par le fait que les femelles allaitent leurs petits à la mamelle, mais il pourrait tout aussi bien se définir par le fait que les nouveau-nés possèdent des aptitudes particulières pour acquérir le lait. Ils sont en effet confrontés, dès les premiers instants de leur vie post-utérine, à une cascade d'épreuves à surmonter dans un environnement peu familier. Mais, du fait de leurs capacités perceptives et de leur répertoire de réponses adaptatives, les organismes nouveau-nés sont loin d'être démunis face à ces « questions de survie ». Ainsi, les stimulations maternelles évoquent chez eux un état d'accalmie permettant l'apparition d'un tropisme vers le corps maternel ; les nouveau-nés s'orientent vers la mamelle et l'explorent, saisissent la tétine, réalisent la séquence succion-

déglutition-respiration, apprennent les caractéristiques individuelles de la mère et de la situation de tétée ; au cours des premières tétées ils améliorent l'efficacité de la prise lactée, ce qui a pour effet d'optimiser la protection immunitaire, l'équilibre émotionnel, et *in fine* la croissance. Ces adaptations multiples sont loin de résulter de la seule mécanique des réflexes dits élémentaires. Elles reposent sur la capacité du jeune organisme à accumuler des apprentissages subtils et dynamiques, où l'intégration des signaux olfactifs est importante, voire souvent cruciale. Elles reposent aussi sur le fait que le nouveau-né est, dans une certaine mesure, préparé à son environnement postnatal par son expérience antérieure, c'est-à-dire prénatale.

Le nouveau-né humain ne fait nullement exception à ce schéma général, à cette différence près qu'il est continuellement assisté par la mère dans sa quête de l'aliment premier.

Cependant, lorsqu'on lui laisse l'occasion et le temps de manifester ses orientations spontanées, ses préférences et aversions, il peut les exprimer de façon active et autonome. Nous rapporterons dans ce qui suit comment le nouveau-né humain est capable d'utiliser des indices olfactifs pour se repérer dans son environnement, en particulier celui que lui offre le corps maternel. Les études citées présentent une originalité théorique et méthodologique en ce sens qu'elles reposent sur une démarche hybride entre l'approche éthologique et celle de la psychologie expérimentale. Premièrement, elles confrontent le nouveau-né à des stimulations odorantes dérivées de sécrétions biologiques (émanant du corps maternel) ou qui ont été associées à des situations renforçantes variées. Deuxièmement, pour analyser l'activité perceptive de l'enfant, elles mettent à profit des réponses qui sont observables dans le répertoire de ses comportements individuels ou interactifs habituels. Finalement, ces stimulations odorantes à valeur écologique et ces réponses représentatives du répertoire néonatal sont confrontées dans le cadre des procédures expérimentales qui contrôlent de mieux en mieux l'influence de facteurs non olfactifs. A partir de ce gisement de résultats expérimentaux, mais aussi à partir d'hypothèses et d'observations non encore soumises à l'expérience, l'influence potentielle de l'environnement olfactif sur le comportement précoce sera illustrée dans quelques domaines fonctionnels de la vie quotidienne du nouveau-né et du très jeune enfant.

Modulation du niveau général d'activation

Une condition nécessaire préalable à l'établissement de l'interaction paisible de la tétée est que le nouveau-né soit dans un état d'activation relativement faible, qui se manifeste par un stade d'éveil où l'enfant a peu de mouvements et est capable de focaliser son attention. Les odeurs familières influencent cette phase préparatoire à la prise alimentaire. Ainsi, des nouveau-nés nourris au sein (âgés de 2 à 10 jours) réduisent l'amplitude de leurs mouvements de la tête et des bras lorsqu'ils sont exposés à un tampon de gaze porté sur le sein (Schaal et al., 1980) ou dans le cou (Schaal, 1986) par la mère. Cette réduction de l'activité motrice est plus importante en réponse aux odeurs (du sein ou du cou) de la mère par rapport à celles d'une autre mère allaitante ou par rapport à une odeur témoin (tampon de gaze inodore). Dans ces expériences, les nouveau-nés ont été testés peu avant un épisode de tétée alors qu'ils se trouvaient dans un état d'activation élevé (éveil agité ou pleurs), et l'accalmie induite par l'odeur maternelle n'a été observée que de façon transitoire. Il est intéressant de noter que lorsqu'ils sont confrontés à l'odeur du sein maternel, il n'est pas rare que les nouveau-nés adoptent une posture typique observée au cours de l'allaitement : bras fléchis vers la poitrine et mains fermées (Schaal, résultats non publiés).

Une autre étude a analysé l'effet calmant de l'odeur corporelle globale de la mère chez des nouveau-nés plus jeunes (moins de 2 jours). L'odeur de la mère est recueillie sur le vêtement qu'elle a porté dans les heures précédant le test olfactif (Sullivan, 1994). L'effet du stimulus d'origine maternelle est comparé à celui induit par l'odeur du vêtement d'une autre mère et par l'odeur d'une stimulation témoin (vêtement non porté). Les odeurs sont présentées pendant une minute à des enfants nourris au sein ou au biberon et

qui sont dans un état d'activation intense (pleurs). Les résultats indiquent que l'odeur du vêtement maternel, aussi bien que celui de l'autre mère, évoquent l'arrêt des pleurs, aussi bien chez les enfants nourris au sein que chez ceux nourris au biberon.

Orientation positive vers le corps maternel

L'atténuation motrice de l'enfant est généralement suivie de mouvements céphaliques de faible amplitude qui indiquent que celui-ci recherche de l'information sensorielle. Le canal olfactif peut, à ce stade, jouer un rôle directionnel efficace, en l'absence des autres entrées sensorielles (celles-ci ayant été expérimentalement neutralisées). Dans une expérience classique, Macfarlane (1975) a utilisé cette activité d'orientation de la tête pour mettre en évidence l'existence de réponses sélectives envers des odeurs. Deux types d'expériences ont été réalisées en présentant simultanément deux stimuli odorants de part et d'autre du visage de l'enfant. Dans la première, des nouveau-nés (2-7 jours) sont exposés à un tampon de gaze imprégné de l'odeur du sein maternel et à un tampon témoin inodore. Au cours de ces tests de deux minutes, la majorité des enfants ont orienté leur nez vers l'odeur du sein maternel, indiquant qu'ils sont capables de détecter cette odeur de faible intensité. Dans la seconde expérience, les nouveau-nés, âgés de 2 à 10 jours, sont exposés à un autre double choix entre l'odeur du sein maternel et celle du sein d'une autre mère allaitante (tous les enfants sont nourris au sein). Alors que les nouveau-nés orientent leur nez au hasard au deuxième jour, ils se tournent significativement plus longtemps vers l'odeur du sein maternel dès le sixième jour. Ainsi, à partir de la première semaine de vie au moins, le nouveau-né se montre capable de différencier deux odeurs émises par deux individus qui sont dans un même stade physiologique, et d'exprimer une préférence pour l'odeur recueillie sur le corps maternel.

Des expériences ultérieures ont montré que cette orientation préférentielle est aussi exprimée par le nouveau-né envers l'odeur de l'aisselle maternelle (Cernoch et Porter, 1985). Cependant, seuls les enfants nourris au sein se sont montrés capables de cette discrimination, alors que ceux nourris au biberon n'ont apparemment pas différencié l'odeur axillaire maternelle de celle d'une autre mère. Il semble que l'aptitude précoce à exprimer une préférence à l'égard d'une odeur soit dépendante de l'expérience antérieure avec cette odeur. Cette hypothèse est partiellement supportée par le fait que les nouveau-nés nourris au sein, qui n'ont que très peu d'exposition directe à l'odeur de la peau du père, ne différencient pas l'odeur axillaire paternelle de celle d'un autre homme. Cependant, cette réponse différentielle liée au mode d'alimentation n'est pas générale pour toutes les stimulations olfactives. En effet, qu'ils soient nourris au sein ou au biberon, des nouveau-nés de 15 jours (et plus particulièrement les filles) montrent une préférence à l'égard de l'odeur du sein d'une femme qui allaite, quel que soit son degré de familiarité avec l'enfant (Makin et Porter, 1989). Tout semble donc se passer comme si l'odeur du sein maternel véhiculait deux types de messages pour le nouveau-né : un signal attractif contenu dans les sécrétions du sein de toute femme en période de lactation, et un signal d'individualité ou de familiarité véhiculé par les sécrétions du sein de la mère. A cette date, on ne sait pas encore quelle est la source de

ces indices odorants actifs parmi les sécrétions cutanées variées du sein (Schaal et Porter, 1989).

Localisation du sein et saisie orale du mamelon

Outre leur effet « directionnel », les odeurs ont une influence sur les activités pré-ingestives du nouveau-né. Cette influence olfactive a été mise en évidence dans des expériences réalisées à la fin du siècle dernier, et qui ont consisté à perturber les qualités olfactives normales du sein maternel par l'application de substances odorantes intenses (par exemple, de l'acide succinique, de l'extrait d'*Asa foetida* ou du pétrole dilué !). Alors que les nouveau-nés refusent systématiquement de saisir le mamelon badigeonné de la sorte, l'autre mamelon, resté olfactivement intact, est accepté sans délai (Preyer, 1881 ; Kroner, 1882). Si le stimulus non familier est administré par voie exclusivement olfactive, en le présentant sous le nez d'enfants (âgés de 3 heures à 10 jours) qui sont en train de téter, ceux-ci répondent en lâchant le mamelon et en détournant la tête (Garbini, 1896). Des travaux de recherche plus récents suggèrent, avec des méthodes plus délicates, que le bébé se fonde au moins partiellement sur des informations olfactives pour localiser le sein maternel. Lorsque des nouveau-nés (immédiatement après la naissance) sont placés à plat ventre sur la poitrine de la mère (la tête étant disposée à équidistance entre les seins), ils se montrent capables de s'orienter sans assistance vers l'un des seins et de saisir le mamelon après un délai moyen de 55 minutes (Widström et al., 1987). Ce « guidage » précoce vers le sein semble reposer sur des indices olfactifs. En effet, lorsque l'un des seins est lavé à l'eau, le nouveau-né s'oriente et se saisit plus souvent du sein qui est resté olfactivement intact (Varendi et al., 1994). Ce qui semble confirmer que le sein sécréterait, en période de lactation, des composés odorants qui ont une valeur attractive pour le nouveau-né.

Stimulation des activités orales pré-ingestives

La présentation de l'odeur maternelle évoque l'activation des muscles de la zone orale chez le nouveau-né, que celui-ci soit en phase de sommeil ou en phase d'éveil calme. Cet effet d'activation orale a été observé à la suite de la présentation de l'odeur du lait ou du sein maternels, ou à celle de l'odeur corporelle globale de la mère. Ainsi, des nouveau-nés endormis mis en présence de l'odeur de lait de femme manifestent de nombreuses activités orales, qu'ils n'expriment pas en réponse à l'odeur du lait de vache ou d'un stimulus témoin (Russel, 1976 ; Faigaux et al., 1984). Une autre expérience a montré que cet effet d'activation buccale est spécifique de l'odeur du vêtement maternel, puisque celle du vêtement d'une autre mère ou celle du vêtement témoin n'induisent pas de réponses différentielles (Sullivan, 1994). La stimulation des activités orales (en particulier des mouvements de succion) a aussi été montrée chez le nouveau-né de moins de 2 jours avec l'odeur du liquide amniotique (Schaal et al., 1995). Des odeurs familières associées à l'environnement prénatal, à la situation de tétée ou au corps maternel ont donc le pouvoir de déclencher des réponses anticipatoires de la prise alimentaire.

Régulation de la prise alimentaire

Les anecdotes sont nombreuses sur la perturbation de la tétée induite par le changement brusque de la saveur du lait résultant de la consommation par la mère d'aliments porteurs d'arômes intenses (Delaisi de Perceval et Lallemand, 1980). Elles indiquent que le sens olfactif pourrait aussi jouer un rôle régulateur important dans l'appréciation intra-buccale des aliments par le nouveau-né. Hall (1975) a d'ailleurs suggéré que la perception chimiosensorielle associée au changement de composition du lait maternel au cours d'une même tétée pourrait être l'un des mécanismes de régulation de l'appétit néonatal. Cette hypothèse intéressante reste cependant encore à soumettre à l'analyse. La réactivité du jeune enfant au changement de saveur du lait a été, par ailleurs, examinée au cours de tétées successives. Dans ces expériences, la qualité chimiosensorielle du lait a été manipulée par le biais de l'alimentation des mères allaitantes. Celles-ci ont ingéré des doses contrôlées d'ail, d'alcool ou encore de vanille (Mennella et Beauchamp, 1991). Deux à trois heures après l'ingestion d'ail, l'intensité perçue (par des nez adultes) du lait maternel est augmentée par rapport à celle du prélèvement précédant ou suivant l'ingestion. Les enfants (âgés de 3 à 4 mois) répondent à ce changement de saveur du lait par un rythme de succion plus élevé, tout en consommant la même quantité de lait qu'au cours des tétées où le lait n'était pas odorisé. Bien que les enfants indiquent par leur comportement qu'ils détectent la modification chimiosensorielle de leur aliment, ils ne semblent donc pas s'en détourner. Des résultats similaires ont été obtenus après l'ingestion d'alcool par les mères. Leur lait fut évalué comme ayant une odeur plus intense au bout de 1/2 à 1 heure après la consommation d'alcool, mais les enfants ont tété plus activement tout en ingérant moins de lait. Finalement, l'ingestion d'une solution de vanille par la mère a pour effet d'augmenter la durée moyenne des épisodes de tétée et la quantité de lait consommée (Mennella et Beauchamp, 1994). Cet effet a été rapporté aussi dans le cas d'enfants nourris au biberon : l'introduction de la saveur nouvelle de vanille dans le lait artificiel se traduit par une succion plus avide. Cependant, l'effet d'activation de la succion par une saveur nouvellement introduite semble de courte durée, puisqu'il disparaît au cours des tétées ultérieures. Ces résultats indiquent, d'une part, que l'enfant a la capacité de détecter la nouveauté chimiosensorielle de ses aliments, et que cette dimension influence sa prise alimentaire. D'autre part, l'effet de l'odorisation du lait sur le comportement ingestif néonatal n'apparaît pas linéaire : des phénomènes qui rappellent l'habituation et la satiété sensorielle spécifique s'établissent rapidement, indiquant que le nouveau-né réagit à la variété alimentaire de la même façon que les enfants plus âgés et les adultes.

Influences sur la physiologie digestive

Nous savons très peu de chose sur les effets physiologiques précoces des odeurs associées à la situation alimentaire ou aux figures parentales. Il est très probable que plusieurs réflexes viscéraux soient activés par les stimulations olfactives seules ou associées à d'autres stimulations. Chez l'adulte, les seules odeurs de l'alimentation influencent nombre de mécanismes métaboliques et physiologiques pré-

ingestifs ; ils déclenchent, par exemple, la stimulation anticipatoire des sécrétions digestives exocrines (salive, suc gastrique) (Pangborn et Berggren, 1973 ; Brand et al., 1982) et endocrines (hormones gastriques, intestinales et pancréatiques) (Feldman et Richardson, 1986 ; Sjoström et al., 1980). Cette phase céphalique du cycle digestif devrait, de même, être bien fonctionnelle chez l'enfant dès le plus jeune âge. On peut noter ici que certaines hormones intestinales ont des répercussions qui dépassent leur rôle strictement digestif. Des études menées chez des nouveau-nés d'autres espèces montrent, par exemple, que la cholécystokinine est impliquée dans l'établissement de certains apprentissages précoces (Weller et Blass, 1988 ; Goursaud et al., 1995). Par ailleurs, certaines observations indiquent que l'élimination fécale peut être associée à la présentation de l'odeur maternelle (Macfarlane, 1975).

Influences sur le sommeil

L'environnement de sommeil est celui où le nouveau-né passe la plus grande partie de son cycle nyctéméral. Il est évident que l'enfant imprime sa marque olfactive individuelle aux objets qui composent son lieu de sommeil. Aucune étude systématique n'a été conduite sur la perception de cette ambiance olfactive probablement familière pour l'enfant. Des observations nombreuses suggèrent cependant qu'elle peut avoir un effet facilitateur sur l'endormissement. Il est d'observation commune que le seul fait de renouveler les draps du berceau se traduit parfois par l'apparition de troubles de l'endormissement.

Des faits convergents suggèrent, en outre, que le cerveau néonatal reste réactif aux stimulations extérieures pendant les phases de sommeil. Si l'énergie sensorielle intégrée par les canaux visuel, auditif, tactile, vestibulaire et gustatif paraît réduite au cours des phases de sommeil, la respiration nasale obligatoire continue à stimuler de façon rythmique les récepteurs olfactifs. Il est donc probable que l'enfant endormi n'est pas insensible aux stimulations odorantes. Par exemple, la présentation de l'odeur de lait maternel pendant le sommeil calme évoque des modifications comportementales au niveau facial chez l'enfant âgé de 4 à 10 jours (Schaal, résultats non publiés). Dans le même sens, on a pu montrer que les nouveau-nés de 2 jours sont capables d'acquérir la qualité olfactive de leur environnement de sommeil. Lorsqu'on introduit soit l'odeur de cerise, soit celle de gingembre dans leur berceau au cours du premier jour suivant la naissance, les enfants répondent par une orientation positive vers l'odeur à laquelle ils ont été familiarisés en comparaison d'une odeur non familière (Balogh et Porter, 1986). Cette expérience suggère que le nouveau-né est capable d'acquérir des informations de nature olfactive sur son environnement de sommeil et que ces acquisitions peuvent être retenues et venir déterminer les orientations comportementales au cours des phases d'éveil ultérieures. *A fortiori*, dans les cas où l'enfant ne dort pas séparé de sa mère, le sommeil est peut-être une période privilégiée d'acquisition et d'actualisation du complexe odorant changeant du corps maternel.

Apprentissage et mémorisation précoces des odeurs

Les réponses envers les odeurs se développent selon des mécanismes sensibles à l'expérience. Ces mécanismes d'acquisition opèrent dans des contextes variés, incluant des processus non associatifs (tels qu'une simple familiarisation par exposition, sans aucun renforcement planifié) ou des processus associatifs (tels que le conditionnement classique). Nous avons vu plus haut que le nouveau-né de 2 jours peut retenir une odeur à laquelle il a été familiarisé dans son berceau. L'odeur devenue familière par simple exposition au cours des premières 24 heures de vie est préférée au moment d'un test de double choix qui a lieu au cours du 2^e jour (Balogh et Porter, 1986). Lorsque l'expérience de double choix est répétée 15 jours après l'exposition olfactive (qui a lieu au cours du premier jour de vie), on note de même que les enfants s'orientent de façon préférentielle vers l'odeur à laquelle ils ont été familiarisés par rapport à une odeur nouvelle (Davis et Porter, 1991). La simple exposition à une odeur peut donc favoriser l'établissement d'une préférence persistante pour cette odeur. *A fortiori*, lorsqu'un stimulus olfactif est régulièrement associé à un contexte fortement renforçant, l'acquisition d'une préférence peut être très rapide et durable. Ainsi, la situation de tétée est particulièrement favorable à l'organisation des apprentissages olfactifs. Lorsqu'on demande à des mères d'appliquer sur leur sein une odeur artificielle dès les premières tétées, les enfants expriment une nette préférence pour cette odeur dans un test de choix effectué à 1 et 2 semaines, et mettant en contraste l'odeur familière et une odeur nouvelle (Schleidt et Genzel, 1990). Cette association odeur-tétée peut être acquise au cours d'une très brève période de 30 minutes, aussi bien chez des enfants nourris au sein que chez ceux nourris au biberon (Sullivan, 1990). Mais la tétée n'est pas le seul contexte interactif où s'élabore la cognition olfactive du nouveau-né. La valeur renforçante d'une autre situation courante de la vie quotidienne du nouveau-né a été envisagée, à savoir le contact tactile sous forme d'un massage. Ainsi, après une seule séance de 15 minutes associant un massage doux et une stimulation olfactive, des nouveau-nés de 4 à 16 heures montrent, 24 heures après la séance d'association, une préférence marquée envers l'odeur à laquelle ils ont été exposés. En revanche, des nouveau-nés du même âge ayant reçu une séance de massage ou ayant été exposés à l'odeur de façon disjointe ne montrent aucune réactivité différentielle (Sullivan et al., 1991). Cette aptitude à intégrer les informations olfactives semble aussi être présente chez le fœtus avant la naissance. En effet, des nouveau-nés de 2 jours mis dans une situation de choix entre l'odeur du liquide amniotique et celle d'une odeur témoin orientent leur nez vers le premier stimulus (Schaal et al., 1995). Il n'est donc pas impossible que les réponses d'orientation envers les odorants émanant du corps maternel, observées peu après la naissance, se fondent sur des informations acquises *in utero*. Une telle possibilité d'apprentissage prénatal a été démontrée chez les nouveau-nés de plusieurs espèces infra-humaines (pour une revue, cf. Schaal et Orgeur, 1992).

Ces capacités précoces d'apprentissage olfactif dévoilent certains aspects du fonctionnement cognitif du nouveau-né,

et en particulier ses aptitudes à mémoriser. De façon générale, le nouveau-né est représenté comme un organisme essentiellement réactif à des stimulations actuellement présentes, et qui manque encore des mécanismes cérébraux qui gèrent le tri, le stockage à long terme et le rappel des informations (voir, par exemple, Slater, 1989 ; Rosenblith et Sims-Knight, 1985). Les données rapportées ci-dessus indiquent au contraire que l'information olfactive peut être retenue pour des durées supérieures à 24 heures, et jusqu'à une période de 2 semaines. Ces habiletés mnésiques favorisent probablement le développement précoce de la mise en catégories des objets physiques et sociaux. Elles favorisent aussi l'apparition de correspondances entre la modalité olfactive et les autres modalités sensorielles. Par exemple, des enfants de 4 mois associent très rapidement une odeur et le goût sucré (Melcer et Capo, 1994), ou encore une odeur et une forme visuelle (Fernandez, 1992).

Cette aptitude précoce pour les apprentissages olfactifs, et pour leur intégration multimodale, peut avoir des implications importantes pour le développement de l'attachement. On peut faire l'hypothèse que l'enfant développe, dans un premier temps, des réponses sélectives envers les caractéristiques sensorielles de la mère qui lui sont accessibles par des systèmes sensoriels plus précoces que d'autres (l'olfaction, le toucher, l'audition). Ces références sensorielles initiales pourraient, dans un second temps, permettre d'acquérir des informations médiatisées par d'autres systèmes sensoriels, et ainsi précipiter l'accumulation d'apprentissages qui permettent d'échafauder une représentation multisensorielle de la mère. Les premières réponses discriminatoires envers les odeurs acquises au contact du corps maternel pourraient donc jouer un rôle d'amorçage de la relation mère-enfant. De plus la complexification parallèle des capacités cognitives de l'enfant et de l'interaction avec la mère peuvent aboutir à une représentation dynamique de l'interaction avec la mère chez l'enfant. Les odeurs pourraient ainsi participer à l'élaboration progressive d'un schéma temporel de l'interaction. Si, pendant la tétée, le nouveau-né est confronté aux odeurs aréolaire, lactée ou axillaire de la mère (ou à l'odeur du biberon), il est exposé à d'autres sources olfactives dans d'autres situations : le cou lorsqu'il est porté, alors qu'il est en pleurs ; l'haleine et la face maternelle lors d'interactions affectueuses (Ajuriaguerra et Casati, 1985), et ses propres odeurs fécales ainsi que celles des produits de toilette, dans la situation du change. On peut faire l'hypothèse que les combinaisons du comportement maternel avec chacune de ces sources odorantes, leur enchaînement temporel et le rythme de leur répétition sont intégrées par l'enfant, régulent ses attentes et lui permettent d'anticiper activement les événements.

Odeurs, réponses émotionnelles et adaptation interactionnelle

Le nouveau-né est capable d'exprimer la direction de sa préférence à l'égard de signaux olfactifs : il détourne sa tête d'un stimulus désagréable (Rieser et al., 1976), s'oriente positivement vers des odeurs associées à la mère ou à l'alimentation (Schaal, 1988), et extériorise par des mimiques faciales différentielles sa capacité à distinguer la valeur hédonique des odeurs (surtout de celles qui lui sont

désagréables) (Steiner, 1979). Cette réactivité émotionnelle induite par les odeurs et les saveurs a des conséquences relationnelles importantes. Les connotations d'acceptation ou de rejet que traduisent les mimiques faciales néonatales aux stimulations chimiosensorielles peuvent être lues avec suffisamment d'exactitude pour qu'elles deviennent rapidement des régulateurs de l'interaction mère-enfant dans le contexte alimentaire.

Au-delà de la période néonatale, ces activités mimiques sont cependant rapidement sujettes à des influences sociales (Kendal-Reed, 1991 ; Soussignan et Schaal, 1995) qui les rendent moins directement interprétables par l'entourage.

Quelques implications cliniques de l'olfaction chez l'enfant

La portée clinique des recherches actuelles sur le développement olfactif n'est, à première vue, pas évidente. Bien que subtile, cette entrée sensorielle est susceptible de jouer un rôle potentiellement important dans la vie quotidienne de l'enfant. Les résultats les plus consistants montrent la possibilité d'influences olfactives avant et pendant les épisodes de prise alimentaire. Dans ce cadre, le pouvoir d'attraction de l'odeur du sein de la femme allaitante mis en évidence dans des situations expérimentales peut avoir une fonction facilitatrice de la tétée, en particulier au cours des premières mises au sein.

Par ailleurs, du fait de son fonctionnement précoce, la reconnaissance olfactive pourrait être impliquée dans les prémises du processus d'attachement enfant-mère. La séparation prolongée entre la mère et le nouveau-né après la naissance (cas des prématurés et des nouveau-nés de petit poids à la naissance) pourrait interférer avec le développement normal des liens d'attachement. On peut faire l'hypothèse que l'exposition à l'odeur de la mère en son absence pourrait favoriser la familiarisation de l'enfant à cette caractéristique maternelle, et venir ensuite exercer une influence positive lors de leur réunion ultérieure.

Enfin, lorsque la mère est physiquement absente, le pouvoir calmant des odeurs familières (en particulier des odeurs maternelles) pourrait être mis à profit pour atténuer l'anxiété de séparation ou la douleur suscitée par divers traitements appliqués au nouveau-né (de la même façon qu'on a proposé d'utiliser un stimulus sucré (*cf.* Blass et Hoffmeyer, 1991).

La mise au point d'un outil d'évaluation de l'olfaction chez le nouveau-né et le jeune enfant devrait permettre de dépister divers dysfonctionnements précoces. Le déficit ou l'absence de réponses olfactives pourrait refléter des pathologies diverses, allant de l'obstruction (Ghorbanian et al., 1978) ou de l'infection nasales à des atteintes plus graves du système nerveux central. Ainsi, Sarnat (1978) fournit une liste d'anomalies structurales ou fonctionnelles du système olfactif, incluant l'agénésie des bulbes olfactifs associée à d'autres malformations (trisomie 13, malformation d'Arnold-Chiari, syndrome de Morsier-Kallman) ou non (anosmie congénitale, albinisme partiel ou total). Par ailleurs, il signale une incidence accrue de malformation des bulbes olfactifs chez les enfants de mères diabétiques.

A cette date aucun examen néonatal ou pédiatrique n'est appliqué de façon systématique aux capacités olfactives. Le

développement de techniques fiables d'olfactométrie pédiatrique pourrait aider au dépistage précoce de certaines conditions pathologiques, en complément des techniques d'exploration fonctionnelle classiques. Une tentative de systématisation d'un examen olfactif néonatal a été réalisée par Sarnat (1978). Ses résultats indiquent que l'aptitude olfactive du nouveau-né à terme et prématuré (mesurée par la variété et l'amplitude des réponses comportementales) est corrélée avec l'âge gestationnel, mais peut être affectée par un épisode d'anoxie prénatale. Plusieurs nouveau-nés ne répondant pas au stimulus olfactif dans ce test se sont révélés à l'autopsie porteurs d'une agénésie des bulbes olfactifs. Il est cependant à noter que l'absence de réactivité aux odeurs chez l'enfant doit être interprétée avec prudence, surtout si les seules réponses examinées sont de nature comportementale. La réactivité aux odeurs est fortement influencée par l'état de vigilance et de motivation chez le nouveau-né, et chez les sujets plus âgés la focalisation de l'attention vers la tâche olfactive, la maîtrise de l'inhalation et la coopération de l'enfant sont parfois difficiles à obtenir, et peuvent venir biaiser les résultats. Divers facteurs d'environnement peuvent de plus contribuer à réduire la sensibilité olfactive (en particulier le tabagisme passif de l'enfant).

Conclusions

Les résultats présentés ci-dessus montrent que le nouveau-né humain est sensible à un large éventail de stimulations odorantes, au moins dans des contextes expérimentaux où l'influence des autres stimulations sensorielles est minimisée. La diversité des domaines fonctionnels où l'olfaction est potentiellement impliquée révèle que cette entrée sensorielle pourrait jouer un rôle qui est loin d'être négligeable dans la vie quotidienne des jeunes enfants, en particulier dans la régulation des comportements préparatoires à la prise alimentaire et dans les réponses consommatoires elles-mêmes, dans l'adaptation émotionnelle de l'individu, dans la genèse de relations sélectives avec l'entourage social. On pourra nous reprocher que cette présentation est trop exclusive de l'olfaction. Il est bien évidemment clair que le rôle de cette modalité sensorielle ne pourra être pleinement compris que dans le contexte multisensoriel du développement. Cependant, à cette date, peu d'études ont cherché à replacer la modalité olfactive dans le flux complexe des autres informations sensorielles. Par ailleurs, il est possible de retourner l'argument : les psychologues ont jusque-là généralement négligé l'olfaction dans l'étude du développement sensoriel et comportemental humain, sans pour autant qu'ils soient taxés de partialité ou de réduction ! La focalisation exclusive sur l'olfaction dans cet article a pour but de contribuer à redresser ce déséquilibre, comme nous y invite avec autorité le psychobiologiste G. Türkewitz (1979) : « *L'omission du goût, du toucher et de l'olfaction... est... un reflet fidèle de l'attention disproportionnée accordée à la vision et à l'audition dans l'étude de l'enfant... Un tel déséquilibre porte préjudice à la compréhension du fonctionnement [sensoriel] à tous les stades du développement, mais introduit une distorsion particulière dans la connaissance que nous avons du monde de l'enfant.* »

RÉFÉRENCES

- [1] AJURIAGUERRA (J.) de, CASATI (L.) : « Ontogenèse des comportements de tendresse, I : Etude de l'embrassement-étreinte à partir du pattern "tendre les bras" », *Psychiatr. Infant*, 28, 1985, pp. 385-402.
- [2] BALOGH (R.D.), PORTER (R.H.) : « Olfactory preferences resulting from mere exposure in human neonates », *Infant Behav. Devel.*, 9, 1986, pp. 395-401.
- [3] BLASS (E.M.), HOFFMEYER (L.B.) : « Sucrose as an analgesic for newborn infants », *Pediatr.*, 87, 1991, pp. 215-218.
- [4] BRAND (J.G.), CAGAN (R.H.), NAIM (M.) : « Chemical senses in the release of gastric and pancreatic secretions », *Ann. Rev. Nutr.*, 2, 1982, pp. 249-276.
- [5] CERNOCH (J.M.), PORTER (R.H.) : « Recognition of maternal axillary odors by infants », *Child Devel.*, 56, 1985, pp.1593-1598.
- [6] DAVIS (L.B.), PORTER (R.H.) : « Persistent effects of early odor exposure on human neonates », *Chem. Senses*, 16, 1991, pp. 169-174.
- [7] DELAISI DE PERCEVAL (G.), LALLEMAND (S.) : *L'art d'acommoder les bébés*, Seuil, Paris.
- [8] FAIGAUX (R.), ARITA (B.), HERRMANN (W.) : *Recherche d'une activité phéromonale dans l'allaitement humain*, 2nd World Congr. Infant Psychiat., Cannes, France, 1984.
- [9] FELDMAN (M.), RICHARDSON (C.T.) : « Role of thought, sight, smell and taste of food in the cephalic phase of gastric acid secretion in humans », *Gastroenterol.*, 90, 1986, pp. 428-433.
- [10] FERNANDEZ (M.) : *Arbitrary pairings of objects and odors in four-month-old infants*, Int. Conf. Infant Stud., Miami, FL, 1992.
- [11] GARBINI (A.) : « Evoluzione del senso olfattivo nella infanzia », *Archiv. Antropol. Etnol.*, 26, 1896, pp. 239-286.
- [12] GHORBANIAN (S.N.), PARADISE (J.L.), DOTY (R.L.) : « Odor perception in relation to nasal obstruction », *Pediatrics*, 72, 1978, pp. 510-516.
- [13] GOURSAUD (A.P.), ALSTER (P.), UVNÄS-MOBERG (K.), NOWAK (R.) : *Implication de la cholécystokinine dans la mise en place d'un lien préférentiel de l'agneau nouveau-né avec sa mère*, Congr. Neurosci., Lyon, 1995.
- [14] HALL (B.) : « Changing composition of human milk and early development of an appetite control », *Lancet*, 1, 1975, pp. 779-781.
- [15] KENDAL-REED (M.) : *Human infant olfaction: respons to food odours measured by brain electrical activity mapping*, PhD thesis, University of Warwick, UK, 1991.
- [16] KRONER (T.) : « Über die Sinnesempfindungen des Neugeborenen », *Breslauer ärztl. Z.*, 4, 1882.
- [17] MACFARLANE (A.J.) : « Olfaction in the development of social preferences in the human neonate », *Ciba Found. Symp.*, 33, 1975, pp. 103-117.
- [18] MAKIN (J.W.), PORTER (R.H.) : « Attractiveness of lactating females' breast odors to neonates », *Child Devel.*, 60, 1989, pp. 803-810.
- [19] MELCER (T.), CAPO (L.) : *Conditioned preferences for food odors in weaning infants: preliminary results*, 16th Meet. Assoc. Chemo-recept. Sci., Sarasota, FL, 1994.
- [20] MENNELLA (J.A.), BEAUCHAMP (G.K.) : « Maternal diet alters the sensory qualities of human milk and the nursing's behavior », *Pediatrics*, 88, 1991, pp. 737-744.
- [21] MENNELLA (J.A.), BEAUCHAMP (G.K.) : « The transfer of alcohol to human milk, effects on flavor and infant's behavior », *New Engl. J. Med.*, 325, 1991, pp. 981-985.
- [22] MENNELLA (J.A.), BEAUCHAMP (G.K.) : *The human infant's responses to flavored milk*. Int. Conf. Infant Stud., Paris, France, 1994.

- [23] PANGBORN (R.M.), BERGGREN (B.): « Human parotid secretion in response to pleasant and unpleasant odorants », *Psychophysiol.*, 10, 1973, pp. 231-237.
- [24] PREYER (W.): *Die Seele des Kindes* (trad. franç. 1885), Alcan, Paris, 1881.
- [25] RIESER (J.), YONAS (A.), WIKNER (K.): « Radial localization of odors by human neonates », *Child Devel.*, 47, 1976, pp. 856-859.
- [26] ROSENBLITH (J.F.), SIMS-KNIGHT (J.E.): *In the beginning: development in the first two years*, Brooks-Cole, Monterey, Ca., 1985.
- [27] RUSSEL (M.J.): « Human olfactory communication », *Nature*, 260, 1976, pp. 520-522.
- [28] SARNAT (H.B.): « Olfactory reflexes in the newborn infant », *J. Pediatr.*, 92, 1978, pp. 624-626.
- [29] SCHAAL (B.): « Presumed olfactory exchanges between mother and neonate in humans », in Le Camus J., and Conier, J. (eds.), *Ethology and Psychology*, Privat-IEC, Toulouse, 1986, pp. 101-110.
- [30] SCHAAL (B.): « Olfaction in infants and children: developmental and functional perspectives », *Chem. Senses*, 13, 1988, pp. 145-190.
- [31] SCHAAL (B.), PORTER (R.H.): « L'olfaction et le développement de l'enfant », *La Recherche*, 21, 1989, pp. 1402-1510.
- [32] SCHAAL (B.), ORGEUR (P.): « Olfaction in utero: can the rodent model be generalized? », *Quart. J. Exp. Psychol.*, 44B, 1992, pp. 245-278.
- [33] SCHAAL (B.), MARLIER (L.), SOUSSIGNAN (R.): « Responsiveness to the odour of amniotic fluid in the human neonate », *Biol. Neonate* (67, pp. 397-406), 1995.
- [34] SCHAAL (B.), MONTAGNER (A.), HERTLING (E.), BOLZONI (D.), MOYSE (A.), QUICHON (R.): « Les stimulations olfactives dans les relations entre l'enfant et la mère », *Reprod. Nutr. Dével.*, 20, 1980, pp. 843-858.
- [35] SCHLEIDT (M.), GENZEL (C.): « The significance of mother's perfume for infants in the first weeks of their life », *Ethol. Sociobiol.*, 11, 1990, pp. 145-154.
- [36] SJÖSTROM (L.), GARELLICK (G.), KROTKIEWSKI (M.), LUYCKX (A.): « Peripheral insulin in response to the sight and smell of food », *Metabolism*, 29, 1980, pp. 901-909.
- [37] SLATER (A.): « Visual memory and perception in early infancy », in Slater (A.), Bremner (G.), (eds.), *Infant Development*, Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1989, pp. 43-71.
- [38] SOUSSIGNAN (R.), SCHAAL (B.): « Children's facial responsiveness to odors: influences of hedonic valence of odors, age, gender and social presence », *Dev. Psychol.* (sous presse).
- [39] STEINER (J.E.): « Human facial expressions in response to taste and smell stimulations », in Lipsitt (L.P.); Reese (H.W.) (eds.), *Advances in Child Development*, vol. 13, Academic Press, New York, 1979, pp. 257-295.
- [40] SULLIVAN (R.M.): *Newborn infants exhibit CR's to an odor previously paired with either breast or bottle feeding*, Congrès annuel de l'International Society of Developmental Psychobiology, Cambridge, 2-6 juillet 1990.
- [41] SULLIVAN (R.M.), TABORSKY-BARBA (S.), MENDOZA (R.), ITANO (A.), LÉON (M.), COTMAN (C.W.), PAYNE (T.) LOTT (I.): « Olfactory classical conditioning in neonates », *Pediatrics*, 87, 1991, pp. 511-517.
- [42] SULLIVAN (R.M.), WILSON (D.A.), TOUBAS (P.-L.): *Characteristics of newborn infant responsiveness to maternal odours*, Int. Conf. Infant Stud., Paris, France, 1994.
- [43] TÜRKEWITZ (G.): « The study of infancy », *Can. J. Psychol.*, 33, 1979, pp. 408-412.
- [44] VARENDI (H.), PORTER (R.H.), WINBERG (J.): « Does the newborn baby find the nipple by smell? », *Lancet*, 344, 1994, pp. 989-990.
- [45] WELLER (A.), BLASS (E.M.): *Cholecystokinin-induced conditioned odor-preference is blocked by the selective antagonist L-364-718*, 18th Ann. Meet. Soc. Neurosci., Toronto, Ontario, 1988.
- [46] WIDSTRÖM (A.M.), RANSJÖ-ARVIDSON (A.B.), CHRISTENSON (K.), MATTHIESEN (A.S.), WINBERG (J.), UVNÄS-MOBERG (K.): « Gastric suction in healthy newborn infants », *Acta Paediatr. Scand.*, 76, 1987, pp. 566-572.

Sentir et connaître par le toucher chez le bébé

A. STRERI, H. SEGOND

Laboratoire de psychologie différentielle, université René-Descartes, Institut de psychologie

RÉSUMÉ : *Sentir et connaître par le toucher chez le bébé.*

Nous retraçons sur le développement des systèmes tactile et proprioceptif, en fonction du renouveau théorique apporté par les recherches récentes sur le bébé humain. La sensibilité tactile est la modalité la plus primitive puisqu'elle est présente dès la période fœtale. L'exploration d'abord essentiellement buccale dans les premières semaines après la naissance devient très vite manuelle avec toutes les complexifications que le système tactilo-kinesthésique permet (monomanuelle à une coordination bimanuelle). Si la fonction perceptive de la main est efficace dès les premiers mois chez le nouveau-né et sans le contrôle de la vision, la fonction de transport des objets, les habiletés motrices sont plus fréquentes dans le second semestre. La proprioception, système lié à la sensibilité tactile et au système vestibulaire, fonctionne également dès la période fœtale. Elle prendra toute son importance avec la maîtrise des postures (maintien de la tête, station assise et debout). Les faits montrent que le bébé possède les moyens de connaître son environnement avant même que ses récepteurs centraux ou périphériques soient arrivés à maturation.

Mots clés : Bébé — Modalité tactilo-kinesthésique — Proprioception.

SUMMARY: *How a baby senses and becomes acquainted with its environment through touch.*

The development of haptic and proprioceptive systems has to be described underlining the theoretical renewal provided by the recent infancy research. Touch is the most primitive mode because it starts functioning as soon as the foetal period. In neonates, oral exploration is dominant but is very quickly replaced by manual exploration. The perceptual function of the hand is already effective in neonates and without visual control. The second function of the hand allows skilled activities which are more frequent during the second semester. Finally, proprioception, connected with touch and vestibulo systems, becomes important with sitting and upright postures. Recent Research in infancy provides evidence for the fact that young infants have the capacity to explore and get knowledge from their environment before their senses become mature.

Key words: Infancy — Haptic mode — Proprioception — Foetus.

Tout être vivant a une peau dont la fonction importante est de définir un organisme, de délimiter une frontière entre lui et l'environnement. Cette enveloppe joue un rôle de protection du corps dans ses multiples fonctions de respiration et de régulation de la température. La peau est sensible à différentes formes d'excitation : le toucher (pression), la température, le chatouillement, les démangeaisons, etc. C'est la raison pour laquelle on parle des sens du toucher. La sensibilité tactile est une sensibilité de contact. Les déformations mécaniques de la peau sont enregistrées par des corpuscules encapsulés et sont propagées le long de deux grandes voies nerveuses, le système

spino-thalamique et le système lemniscal, qui conduisent les fibres somesthésiques vers le cerveau à travers la corde spinale. Le système lemniscal, le plus récent, a été considéré comme le seul vrai médiateur des discriminations cutanées. Cependant, des perceptions de poids, texture, vibration et position demeurent possibles, après section complète de la corde dorsale, le déficit observé portant plus sur les mouvements que sur les sensations proprement dites. En résumé, le toucher passif serait pris en charge par le système spino-thalamique tandis que le système lemniscal permettrait l'exploration et la recherche de l'information.

LA SENSIBILITÉ TACTILE

La réponse des récepteurs à une stimulation existe dès les premières semaines de la vie fœtale. Avec des cheveux de petit calibre, Hooker (1938) et Humphrey (1964, 1970) ont caressé la surface cutanée de fœtus maintenus en survie pendant une brève période après leur expulsion. Le retrait de la tête en réponse à une légère stimulation est observé dès 7,5 semaines d'âge menstruel. Anatomiquement, la seule portion différenciée du système nerveux central à cette période de développement est la partie du nerf trijumeau, responsable de la douleur et de la sensation tactile générale. Bien que la peau réagisse à une légère caresse au moins vers 8,5 semaines, ce n'est pas avant la 12^e semaine que les nerfs entrent en contact avec l'épithélium. La sensibilité tactile fonctionne à partir des corpuscules de Meissner et ceux déjà encapsulés de Pacini. Leur développement anatomique commence dès 7 semaines de vie intra-utérine dans la région périorale. A 11 semaines, ils sont présents sur la paume de la main. Ces corpuscules ne se développent pas de manière synchrone. Par exemple, ceux de Pacini apparaissent vers 11 semaines sur les doigts alors que ceux de Meissner s'individualisent entre 24 et 30 semaines.

Ainsi, les parties du corps qui répondent à la stimulation tactile sont l'aire périorale (8,5 semaines), l'aire génitale (10,5 semaines), la paume de la main (entre 10,5 et 11 semaines), la plante des pieds (12 semaines). Ces surfaces, pourtant faiblement étendues, posséderont le plus grand nombre et la plus grande variété de récepteurs chez l'adulte (Humphrey, 1964). Tous les récepteurs cutanés spécialisés sont présents à la naissance, bien qu'ils ne soient pas arrivés encore à maturation. Cependant, la sensibilité tactile est réelle chez le nouveau-né, mais de manière différenciée selon le sexe : les filles s'habituent à une stimulation périorale en moins d'essais que les garçons (Moreau, Helfgott, Weinstein, Milner [1978]).

L'EXPLORATION BUCCALE

L'exploration de l'environnement par la modalité tactile est diversifiée chez le bébé puisqu'il utilise deux zones essentielles de capture d'information, la bouche et les mains. Ces zones possèdent le plus grand nombre de récepteurs comparé à la surface totale de la peau et peuvent capter avec précision les informations sur les objets. Le schème de succion apparaît dès la vie fœtale et va dominer les échanges du bébé avec son environnement pendant les premiers mois de sa vie. Mais, curieusement, cette activité importante de relation n'est connue que depuis peu. En effet, de manière analogue à toutes les activités motrices du nouveau-né, la succion a été considérée pendant longtemps comme invariable et rigide, un réflexe. Or, Meltzoff et Borton (1979), dans une remarquable expérience de transfert intermodal entre le toucher et la vision, ont mis en évidence que le bébé, âgé à peine de 1 mois, était capable d'extraire des informations sur la texture d'un objet (tétine lisse ou à aspérités) et de reconnaître cette dimension sur un objet présenté visuellement (boule lisse ou à picots). Cette recherche devait révéler la fonction exploratoire de l'activité de succion chez le bébé.

Bullinger et Rochat (1985) ont étudié cette activité dans des situations de succion non nutritive à l'aide d'un appareil qui transforme les pressions exercées par le bébé sur une tétine en signal électrique. Le tracé obtenu comporte des aspects réguliers, rythmiques et relativement rigides, interrompu par un tracé irrégulier, d'amplitude plus faible, correspondant à des déformations mécaniques exercées sur la tétine par tous les composants de la cavité buccale. Ce signal temporaire est attribué à des mouvements actifs de la bouche que les auteurs comparent à la palpation manuelle d'exploration et qui révèlent une activité d'expression du bébé. Cette activité, moins associée à la nutrition, est susceptible de se modifier et correspond davantage à une activité exploratoire. La succion non nutritive, dans ses aspects les plus modulables, a servi dans certaines recherches de réponse du bébé aux stimulations de l'environnement, et au plaisir qu'elles lui procurent. Par exemple, De Casper et Fifer (1980) ont mis en relief une accélération ou un ralentissement du rythme de succion avec, comme renforcement, la présentation de la voix de la mère préférée à une autre voix. Le rythme de succion peut aussi diminuer en fonction de la présentation répétitive d'un stimulus. On peut donc utiliser cet indice pour savoir si le nouveau-né, dès quelques heures après la naissance, est capable de discriminer entre différentes stimulations sonores (sons de parole, rythmes musicaux, etc.) ou visuels. On présente au bébé un stimulus, ce qui provoque une augmentation de son rythme de succion. Au cours des présentations successives, ce rythme diminue. Si on propose ensuite à l'enfant un nouveau stimulus, le rythme croît de nouveau. Cette augmentation est interprétée par les chercheurs comme une réponse au changement dans la stimulation et comme une capacité du bébé à le détecter. Dans sa fonction exploratoire, le schème de succion se limite, chez le nouveau-né, à la détection d'information sur la substance des objets (tétine rigide ou élastique), tandis que les bébés âgés de 4 mois détectent des différences de forme.

Lorsque l'activité de succion est associée à la fonction gustative, certains auteurs, ayant montré que la seconde était présente à la naissance, ont observé une variation des réponses des bébés en fonction du taux de concentration de glucose dans l'eau. Le nouveau-né exprime sa préférence pour le liquide le plus sucré en augmentant la durée des trais de succion et en écourtant les pauses. La solution sucrée n'a pas seulement un effet calmant sur le bébé, elle agit également comme un facteur déclenchant la coordination main-bouche chez les nouveau-nés de 1 à 2 jours. Ce comportement cesse lorsque la solution sucrée n'est plus administrée et n'est pas obtenue avec de l'eau plate. Chez l'être humain, la fonction exploratoire de la bouche demeure relativement limitée, à la fois dans le temps et dans la capacité à prélever des propriétés pertinentes sur l'environnement. Ne s'exerçant que pendant les premières semaines de la vie du bébé, l'activité exploratoire buccale va diminuer considérablement au profit de l'exploration manuelle.

L'EXPLORATION TACTILO-KINESTHÉSIQUE

Le rôle du lobe pariétal dans la perception tactilo-kinesthésique, à la suite de diverses lésions accidentelles ou pathologiques, a pu être déterminé. Il permet notamment la

reconnaissance et la signification des sensations tactiles ainsi que la perception tridimensionnelle. La projection des informations sur les hémisphères est croisée : la sensibilité tactile de la main gauche est traitée par l'hémisphère droit et celle de la main droite par l'hémisphère gauche. Les régions somato-sensorielles représentant la main ne contractent pas de relations interhémisphériques. Le transfert d'information d'un hémisphère à l'autre est assuré par l'intermédiaire du corps calleux. Ce transfert porterait sur un niveau d'intégration ultérieur de l'information tactile car les données recueillies à travers la perception tactilo-kinesthésique ont tendance à être recodées en représentations visuelles. La myélinisation des fibres du corps calleux ne commencerait pas avant la fin de la première année pour devenir assez avancée à 4 ans, et achever sa maturation à 10 ans. On sait que chez l'adulte le transfert interhémisphérique est très rapide (quelques millièmes de seconde) : la perception monomanuelle ne peut dans ces conditions renvoyer au travail exclusif d'un seul hémisphère. Cependant, on peut raisonnablement considérer que les hémisphères cérébraux fonctionnent chez le bébé de façon plus isolée que chez l'adulte, facilitant ainsi l'expression de la dissymétrie fonctionnelle hémisphérique.

Plusieurs façons d'explorer les objets sont efficaces : l'exploration monomanuelle, bimanuelle ou digitale, le plus souvent avec l'index. L'exploration des objets est monomanuelle chez le bébé pendant les trois premiers mois de la vie, une coordination bimanuelle est observable très clairement vers 4 mois. A cet âge, le bébé accepte de tenir un objet volumineux ou long dans ses deux mains. Avant cet âge, il a des difficultés à le maintenir, comme s'il lui était impossible de porter attention simultanément sur ses deux mains. Une interférence interhémisphérique ou une compétition entre les deux mains sont aussi envisageables. Les mains sont peu solidaires à cet âge. L'exploration digitale à l'aide de l'index sera bien sûr beaucoup plus tardive.

Des indices comportementaux, révélateurs d'un processus précoce de latéralisation, ont pu être observés dès la naissance et au cours des premiers mois de la vie : le nouveau-né oriente sa tête spontanément à droite, il approche préférentiellement sa main droite vers une cible visuelle ; la force d'agrippement d'un objet est plus intense de la main droite et, d'une manière générale, elle tient plus longtemps l'objet que la main gauche ; la posture asymétrique de l'escrimeur (A.T.R.N.) est souvent déclenchée vers la droite. Toutes ces conduites, présentant un biais généralement à droite, sont à dominante motrice et suggèrent qu'elles sont les précurseurs de la droiterie manuelle stable des enfants de 4 ans (cf. Young, Segalowitz, Corter, Trehub, 1983). Cependant, si la main gauche est plus lente à traiter l'information, ses capacités de discrimination et de mémorisation des informations sont meilleures que celles de la main droite (Segond, Streri, 1994).

La main présente une diversité de fonctions soulignée par Hatwell (1986). Elle distingue la fonction perceptive de la main de la fonction de transport, déplacement, préhension, destruction des objets. La première fonction a pour objet de prélever des informations sur les objets. La seconde se met au service de la vision pour modifier l'environnement. Ces deux fonctions n'apparaissent pas au même moment dans la vie de l'enfant (Streri, 1991). En effet, la fonction de transport des objets n'apparaît que vers 3 à 4 mois. Avant

cet âge, le dépôt d'un objet dans la main du bébé ne provoque pas chez lui de tentative pour le transporter à sa vue, voire à sa bouche, ou dans l'autre main. Il ne s'agit pas d'un problème moteur ou musculaire puisqu'il est capable, dès *in utero*, de porter sa main à la bouche. L'absence de fonction de transport chez le nourrisson laisse supposer qu'elle exige la présence de processus cognitifs importants. La fonction perceptive peut s'exercer sans contrôle de la vision et peut être mise en évidence relativement précocement. Elle est cependant contrainte par la force du réflexe d'agrippement qui empêche toute activité exploratoire et mobilité de la main sur l'objet. Elle est limitée également du fait que le bébé n'emploie pas toutes les procédures exploratoires utilisées par l'enfant plus âgé ou l'adulte. Ces procédures, essentiellement motrices, rendent plus efficace la prise d'information sensorielle de la main (Lederman, Klastly, 1987). Par exemple, le simple contact de la main sur l'objet renseigne sur sa température ; le frottement de sa surface donne une information sur sa texture ; le lever de l'objet permet d'apprécier son poids ; le suivi du contour permet d'avoir une idée de sa forme, etc. Ces procédures existent chez le bébé, mais pour certaines propriétés seulement. Par exemple, lorsqu'il enserme l'objet, le bébé peut avoir une idée vague de son contour, apprécier sa température, voire sa texture, mais il n'en aura pas une représentation claire. Par la méthode d'habituation tactile sans contrôle visuel, on peut mettre en évidence des capacités du bébé à différencier la forme des objets (Streri, 1991). Si on lui met dans la main un disque, il le tient fermement au début puis le lâche. La présentation répétée de cet objet conduit à une habituation. La tenue d'un nouvel objet (un anneau) le fait réagir à la nouveauté (il le tient plus longtemps). Le bébé a ainsi détecté la différence topologique entre ces deux objets. Il peut détecter des différences de contour (curviligne, rectiligne) ou d'épaisseur (plat, volumétrique), des différences de poids, de texture (lisse, granuleux). Si le bébé ne peut avoir une idée précise de l'objet qu'il palpe, il est capable, dès 2 mois, de reconnaître néanmoins un objet visuel qu'il aura préalablement manipulé sans le voir. Vers 5 à 6 mois, la coordination préhension-vision rend délicate toute exploration manuelle sans contrôle visuel. Si on pose dans la main du bébé un objet, il le porte systématiquement à la vue et ne supporte pas qu'un écran vienne empêcher le fonctionnement de sa récente acquisition. Les objets sont à voir, et toute la conduite manuelle exploratoire ou de transport des objets par le bébé se fera sous le contrôle de cette modalité dominante.

LA PROPRIOCEPTION

Même en l'absence de toute stimulation tactile, chacun perçoit inconsciemment et en permanence la position des différentes parties de son corps les unes par rapport aux autres et par rapport à l'espace extérieur. Les récepteurs localisés dans les couches profondes de la musculature et des articulations (organes neurotendineux de Golgi) sont concernés conjointement aux récepteurs vestibulaires donnant la référence gravitaire générale. Ces perceptions proprioceptives jouent un rôle fondamental évident dans le maintien de la posture et de l'équilibre et dans l'organisation spatiale gé-

rale du corps. Elles nous renseignent de plus sur nos mouvements et sur l'effort à réaliser pour un mouvement particulier. Chez le fœtus, les effets de la proprioception peuvent être mis en évidence tout de suite après le fonctionnement des systèmes tactile et vestibulaire, aux environs de 2 mois d'âge gestationnel. Les recherches sur la façon dont les bébés utilisent les informations pour maîtriser une activité ont surtout porté sur le geste de préhension. Déclenché à la vue d'un objet à la naissance, ce réflexe deviendra un comportement contrôlé vers 4 à 5 mois. Son ajustement en fonction des variations de l'environnement, des propriétés des objets à saisir et du maintien stable des postures de l'enfant se poursuivra pendant tout le second semestre de vie (cf. Streri, 1991, pour une synthèse).

La maîtrise de la posture assise ou debout dépend de la capacité du bébé à interpréter les informations sur l'équilibre de son corps et à y répondre adéquatement. Quand le corps se déplace, plusieurs systèmes sensoriels autres que proprioceptifs sont activés, notamment la vision, mais aussi le système vestibulaire car la tête oscille également dans l'espace au cours du déplacement de l'enfant. La variation posturale semble être très dépendante de l'environnement visuel chez l'adulte mais également chez le très jeune bébé. Cette dépendance peut conduire à des oscillations du corps, voire à des déséquilibres accompagnés de chute. Les recherches sur les interactions entre modifications posturales et informations visuelles ont révélé que les bébés étaient totalement asservis au sens du mouvement visuel. Les bébés maîtrisant la station debout sont placés au centre d'une chambre dont les murs seuls peuvent être déplacés horizontalement dans le sens postéro-antérieur ou antéro-postérieur. Les expérimentateurs créent un conflit visuo-vestibulaire dans la mesure où le plancher reste stable. Si les murs s'éloignent, les bébés ont tendance à chuter vers l'avant, et inversement si les murs se rapprochent. Ces déséquilibres posturaux sont interprétés comme la compensation d'un mouvement illusoire du corps spécifié par la vision. En effet, lorsque les murs s'approchent du bébé, celui-ci a l'impression d'aller vers l'avant et compense cet effet visuel en se penchant vers l'arrière, et inversement lorsque les murs s'éloignent il compense en tombant en avant. Le même effet est observé chez les bébés dès 6 mois, en position assise, voire à 2 mois (cf. Lécuyer, Pêcheux, Streri, 1994, pour plus de détails).

Avant même que ses récepteurs, périphériques ou centraux, soient arrivés à maturation, le bébé possède les moyens, réflexes ou volontaires, de se différencier de son environnement, et dès le début de la vie de construire un espace

proche, cohérent et stable qui lui permettra de poursuivre harmonieusement son développement. Si les systèmes du nouveau-né sont peu fonctionnels, le développement rapide de sa capacité à prendre et explorer tous les objets qui sont à sa portée, la maîtrise des postures assise et érigée et de moyens nouveaux de locomotion vont permettre au bébé d'exprimer et de développer une intelligence et une compréhension du monde de plus en plus adaptées.

RÉFÉRENCES

- [1] BULLINGER (A.), ROCHAT (P.) : « L'activité orale du nourrisson comme indice du comportement », in Beaudonnière (P.M.) (ed.), *Etudier l'enfant de la naissance à trois ans*, Paris, C.N.R.S. 1985, pp. 55-68.
- [2] DE CASPER (A.J.), FIFER (W.P.) : « Of human bonding : newborn prefer their mothers' voices », *Science*, 208, 1980, pp. 1174-1176.
- [3] HATWELL (Y.) : *Toucher l'espace*, Lille, Presses universitaires de Lille, 1986.
- [4] HOOKER (D.) : « The origin of the grasping movement in man », *Proceedings of the American Philosophical Society*, 79, 1938, pp. 597-606.
- [5] HUMPHREY (T.) : « Some correlations between the appearance of human foetal reflexes and the development of the nervous system », *Progress in Brain Research*, 4, 1964, pp. 93-135.
- [6] HUMPHREY (T.) : « The development of human fetal activity and its relation to postnatal behavior », in Reese (H.) and Lipsitt (L.) (eds.), *Advances in Child Development and Behavior* (vol. 5), New York, Academic Press, 1970.
- [7] LÉCUYER (R.), PÊCHEUX (M.G.), STRERI (A.) : *Le développement cognitif du nourrisson*, Paris, Fac. Nathan Université, 1994.
- [8] LEDERMAN (S.J.), KLASTLY (R.L.) : « Hand movements: a window into haptic object recognition », *Cognitive Psychology*, 19, 1987, pp. 342-368.
- [9] MELTZOFF (A.N.), BORTON (R.W.) : « Intermodal matching by human neonates », *Nature*, 282, 1979, pp. 403-404.
- [10] MOREAU (T.), HELFGOTT (E.), WEINSTEIN (P.), MILNER (P.) : « Lateral differences in habituation of ipsilateral head-turning to repeated tactile stimulation in the human newborn », *Perceptual and motor Skills*, 46, 1978, pp. 427-436.
- [11] SEGOND (H.), STRERI (A.) : *Manual lateralization and tactual habituation in 2-month-old infants*, Poster présenté à International Conferences in Infancy Studies (juin 1994).
- [12] STRERI (A.) : *Voir, Atteindre, Toucher. Les relations entre la vision et le toucher chez le bébé*, Paris, P.U.F., 1991.
- [13] YOUNG (G.), SEGALOWITZ (S.J.), CORTER (C.M.), TREHUB (S.E.) : *Manual specialization and the developing brain*, New York, Academic Press, 1983.

Les compétences auditives des bébés

C. BARUCH

Laboratoire de psychologie expérimentale,
Université René-Descartes, 28, rue Serpente, 75006 Paris

RÉSUMÉ : *Les compétences auditives des bébés.*

Les compétences auditives des bébés ne sont systématiquement explorées que depuis peu. Les méthodes d'investigation se sont multipliées, depuis les méthodes électrophysiologiques (potentiels évoqués) jusqu'aux méthodes comportementales standardisées telles que l'audiométrie par renforcement visuel ou l'habituation. Dans cet article sont passées en revue les principales données recueillies dans les différents secteurs de la psychoacoustique : en ce qui concerne la sensibilité auditive, on observe une augmentation des seuils absolus de 15 à 30 dB selon les recherches, des bébés de 3 mois par rapport aux adultes, sans que l'on puisse avec certitude imputer cette différence à des facteurs sensoriels ou non. Les recherches sur la perception de la hauteur chez les bébés étayent l'hypothèse de l'existence d'un double codage, tonotopique et temporel, chez les bébés comme chez les adultes. En ce qui concerne la localisation des sources sonores, on observe une évolution de la réponse d'orientation avec l'âge. Enfin, les dernières recherches sur l'organisation auditive montrent que les bébés sont déjà capables d'organiser les événements sonores dans des séquences, de traiter ces séquences en tant que telles et de les analyser dans leur dimension de rythme, de tempo, ou de mélodie.

Mots clés : Audition — Psychoacoustique — Bébés.

SUMMARY: *Infants' auditory competences.*

Infant's auditory competences have only been explored recently. Investigation methods have multiplied, from electro-physiological (evoked potentials) to standardised behavioural ones, such as visual reinforcement audiometry or habituation. In this paper we review the main data recorded in different fields of psychoacoustics: for auditory sensitivity, an increase in absolute thresholds is observed from 15 to 30 dB for 3-month old infants, compared with adults. But we don't know whether the origin of those differences is sensorial or non-sensorial. Pitch perception research in infants supports the hypothesis of a double coding of frequency: tonotopic and temporal coding, in infants as in adults. Research in localisation shows an evolution of the orientation response with age. Finally recent research on auditory organization has shown that infants are able to organise auditory events into sequences, and to treat sequences as such, analysing them in their dimensions of rhythm, tempo or melody.

Key words: Audition — Psychoacoustics — Infants.

Les recherches systématiques sur l'audition des bébés ne sont pas très anciennes. Il n'y a pas si longtemps on pensait encore que les nouveau-nés avaient de très mauvaises capacités auditives. Mais la nécessité de dépister le plus précocement possible les pathologies auditives, le développement des méthodes comportementales d'étude des nourrissons et l'élargissement des connaissances sur les mécanismes de l'audition adulte ont conduit depuis les années 70 de plus en plus de chercheurs vers les

études de l'audition des bébés. Les données recueillies jusqu'à aujourd'hui restent cependant encore très fragmentaires. Certains secteurs ont été plus particulièrement étudiés, comme la sensibilité absolue ou la localisation des sources, d'autres en sont à leurs débuts, telle l'organisation auditive de séquences complexes. Mais, dans l'ensemble, ces recherches montrent que si le système auditif continue à évoluer après la naissance, les bébés naissent avec un outil leur permettant déjà de percevoir et de structurer leur envi-

ronnement sonore sur des bases très proches de celles des adultes.

DÉVELOPPEMENT NEURO-ANATOMIQUE DU SYSTÈME AUDITIF HUMAIN

On connaît maintenant assez bien le développement du système auditif fœtal : les recherches sur les étapes du développement des structures responsables de l'audition montrent qu'elles sont identiques chez l'homme et chez certains mammifères tels le rat, la souris, le cobaye, le chat (Pujol, Lavigne-Rebillard, 1992 ; Granier-Deferre, 1994). En ce qui concerne l'oreille moyenne, on peut remarquer que les osselets ont atteint leur forme et leur dimension adulte au 5^e mois de gestation, et semblent fonctionnels à 7 mois de gestation, même si leur utilité est probablement nulle *in utero* puisque l'oreille moyenne est remplie de liquide et de mésochyme. En ce qui concerne l'oreille interne, la cochlée s'enroule en spirale entre la 6^e et la 10^e semaine et atteint sa taille définitive à 20 semaines d'âge conceptionnel (AC). Les premières cellules ciliées internes s'observent vers 10 semaines et semblent matures vers 22 semaines AC, les cellules ciliées externes apparaissant plus tardivement, pour être matures à 8 mois. Il semble que la maturation cochléaire soit achevée vers 28 à 30 semaines AC. Des indices de l'existence d'une tonotopie ont été observés dans le colliculus inférieur de fœtus de cobaye. La myélinisation des voies auditives, qui débute dans la seconde moitié de la gestation, se poursuit après la naissance, jusque vers 2 ans.

Sur le plan fonctionnel, on considère, par parallélisme avec les données recueillies chez l'animal, que la cochlée, même si elle n'est pas encore complètement mature, puisse entrer en fonction vers 18 semaines AC. A partir de ce moment-là, une évolution très rapide a lieu, et l'on peut enregistrer les premières réponses évoquées de l'oreille interne pour des stimulations intenses (> 100 dB). Par la suite, les seuils de réponse diminuent très rapidement et sont, au niveau de la cochlée et du tronc cérébral, assez proches de ceux des adultes. La carte tonotopique est cependant différente : les cellules de la base de la cochlée répondent d'abord à des fréquences moyennes puis progressivement à des fréquences de plus en plus élevées, jusqu'à ce que l'ensemble des fréquences audibles chez l'adulte soit représenté sur la carte tonotopique définitive.

MÉTHODES D'ÉTUDE DE L'AUDITION CHEZ LES BÉBÉS

Deux grandes catégories de méthodes sont employées dans les recherches sur l'audition des bébés : des méthodes électrophysiologiques (principalement de mesure des potentiels évoqués auditifs) et des méthodes comportementales (dans lesquelles une réponse motrice du bébé est attendue à la suite d'une stimulation).

Les méthodes électrophysiologiques

Leur avantage essentiel est d'être utilisables dès la naissance. Par contre, elles impliquent le plus souvent que les bébés soient endormis et donnent principalement des informations sur les plus bas niveaux de traitement.

La mesure de la modification du rythme cardiaque consiste à enregistrer le rythme cardiaque de base, puis à mesurer sa décélération consécutive à une stimulation auditive. Les expériences se font sur des bébés endormis ou éveillés, et peuvent être effectuées à tous les âges, quoique l'ampleur de la réponse soit variable en fonction de l'âge. Le problème majeur posé par ce type de méthode est la non-spécificité de la réponse : des événements interférents, externes ou internes, peuvent déclencher des variations du rythme cardiaque qui seront confondues avec les réponses à la stimulation auditive.

Les potentiels évoqués auditifs sont très utilisés ; la plupart des expériences s'appuient sur la réponse du tronc cérébral à des clicks de quelques millisecondes, réponse qui survient dans les 10 ms suivant la stimulation. On mesure la latence et l'amplitude de la réponse en fonction de l'intensité et de la fréquence de la stimulation. Cette méthode implique que les bébés dorment, naturellement ou sous l'influence de sédatifs. On peut ainsi recueillir des données sur le fonctionnement auditif à ses premiers niveaux de traitement. Cependant, les seuils obtenus de cette manière ne sont précis qu'à 10 ou 15 dB près, et la nature des stimulus rendent la mesure de la sensibilité en fonction de la fréquence difficile à effectuer.

Les méthodes comportementales

Ces méthodes recherchent une réaction motrice du bébé à la stimulation, et impliquent donc une participation active des bébés, ce qui constitue tant un avantage (plus « écologique ») qu'un inconvénient (intervention de facteurs attentionnels ou motivationnels).

La procédure basée sur l'observation de comportements en réaction à une stimulation est utilisée à partir de 3 mois : des observateurs coupés de l'environnement sonore des bébés doivent déterminer à des moments précis si un stimulus est présenté ou non aux bébés, par observation de leurs comportements. En cas de bonne réponse de l'expérimentateur, on renforce à la fois l'adulte et le bébé (l'un par un feed-back positif, l'autre par l'allumage d'un jouet coloré). Une procédure adaptative peut alors permettre de mesurer les seuils de détection ou de discrimination.

L'audiométrie par renforcement visuel a été utilisée avec des bébés de 5 à 18 mois : on conditionne des bébés à tourner la tête lors de la présentation d'un stimulus, ou lorsqu'un changement intervient dans une stimulation sonore continue en renforçant la réponse par la présentation d'un jouet coloré.

L'habituation/réaction à la nouveauté est utilisable dès la naissance : on présente de façon répétitive le même stimulus au bébé, en enregistrant à chaque présentation un indice comportemental ou physiologique. Au fur et à mesure des multi-présentations, la réaction du bébé à la stimulation va diminuer. L'habituation est considérée comme effectuée lorsque la diminution a atteint un critère donné. On présente alors un deuxième stimulus ; soit la réaction du bébé témoigne d'un regain d'intérêt (« réaction à la nouveauté »),

et l'on peut en conclure que le bébé discrimine les deux stimuli, soit elle ne varie pas par rapport aux dernières présentations du premier stimulus, et l'on ne peut rien conclure. Les indices les plus utilisés sont la décélération du rythme cardiaque, le temps de fixation visual de la source (dans des expériences de localisation) et surtout la « succion de haute amplitude » (HAS), dans laquelle on mesure les variations du rythme de succion, ou la durée des intervalles inter-salves.

Enfin, une méthode combinant *conditionnement et habituation* a été utilisée entre 1,5 et 5 mois : on conditionne le bébé à déclencher la présentation d'un stimulus en regardant à un endroit précis, et l'on délivre le stimulus tant que le bébé n'a pas détourné le regard. La multi-présentation du même stimulus a pour conséquence une habituation dont témoigne la diminution du temps de fixation oculaire du bébé sur l'endroit choisi. La présentation d'un nouveau stimulus permet alors de tester une réaction à la nouveauté.

QUE SAVONS-NOUS ACTUELLEMENT DE L'AUDITION DES BÉBÉS ?

Sensibilité auditive (pour une revue plus complète, voir Werner (L.) et Bargones (J.), 1993)

Seuils absolus

Une connaissance précise des seuils auditifs en fonction de l'âge est essentielle pour le dépistage précoce des pathologies auditives, mais n'est pas encore complète à ce jour. On observe quelle que soit la méthode utilisée une moins bonne acuité auditive des bébés que des adultes, mais la différence enfants-adultes diminue à mesure que les méthodes s'affinent. La *figure 1* montre des résultats obtenus à l'aide d'une méthode d'observation (Olsho, Koch, Carter, Halpin, Spetner, 1988). Les seuils absolus sont présentés en fonction de la fréquence des sons (des graves aux aigus), pour trois catégories d'âge (3 mois, 6 mois, 12 mois), et pour les adultes. On peut constater une amélioration des

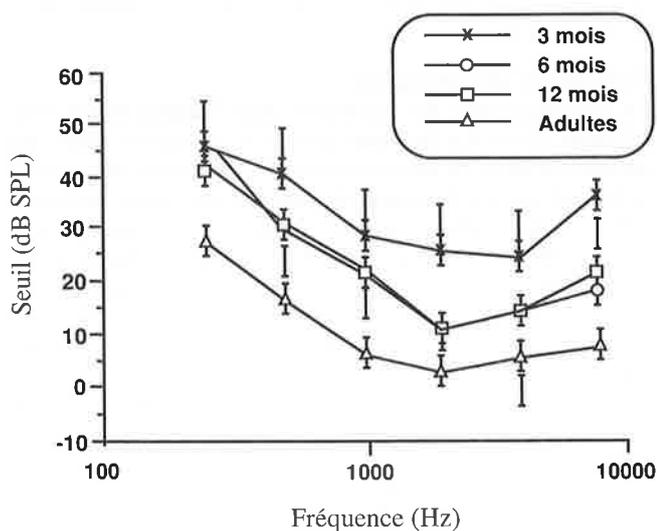


Figure 1. Seuils absolus moyens (plus ou moins un écart type), en fonction de la fréquence, pour trois groupes de bébés et un groupe d'adultes, obtenus par une méthode d'observation (d'après Olsho et al., 1988).

seuils entre 3 mois et 6 mois, mais aussi la persistance d'une élévation de seuils encore à 12 mois. L'ensemble des recherches, toutes méthodes confondues, montre que la différence entre les seuils des bébés de moins de 6 mois et ceux des adultes est moins importante à 250 Hz qu'à 8 000 Hz. La maturation se fait d'abord sur les fréquences basses, et ensuite progressivement vers les fréquences élevées (jusqu'à 8 000 Hz). Par contre, il semble que la perception des sons de très haute fréquence (> 10 000 Hz) soit dès l'âge de 1 mois aussi bonne que celle des adultes, voire meilleure. Cependant, la grande question posée par l'ensemble des auteurs travaillant sur ce problème est celle de l'origine sensorielle ou non sensorielle de ces élévations de seuil. En effet, une absence de réponse ne signifie pas forcément une absence de perception. Des facteurs attentionnels ou motivationnels pourraient tout aussi bien être invoqués. Les recherches en cours dans ce domaine tentent de résoudre ce problème, en combinant des mesures électrophysiologiques et comportementales sur les mêmes sujets, ou en mettant au point des paradigmes de type « détection du signal » qui tiennent compte des critères de réponse des sujets.

Seuils différentiels

Les seuils différentiels permettent d'apprécier la précision du système auditif, et donc de donner un élément qualitatif. La précision des adultes est exceptionnelle : une différence d'intensité de 0,5 dB peut être perçue, tout comme une différence de fréquence de l'ordre de 1 ou 2 Hz, à certaines fréquences de stimulation. On s'est demandé si cette finesse de perception était acquise, ou si elle reflétait des capacités intrinsèques du système auditif. On a donc mesuré la plus petite différence d'intensité juste perceptible. Sinnott et Aslin (1985) ont montré que des bébés de 6 à 9 mois détectaient des incréments de 3 à 12 dB entre deux stimuli, mais ne réagissaient jamais en cas de diminution de l'intensité, probablement pour des raisons attentionnelles. En ce qui concerne la plus petite variation de fréquence, les bébés (de 3 à 12 mois cette fois) réagissent à des différences de fréquences comprises entre 2 % et 4 %, avec de meilleurs résultats dans les basses fréquences que dans les hautes fréquences pour les bébés de 3 mois, alors que l'on observe l'inverse pour les plus âgés. Ces seuils différentiels sont donc, pour l'intensité comme pour la fréquence, beaucoup moins bons que ceux des adultes, mais, là encore, il est difficile de faire la distinction entre facteurs sensoriels et non sensoriels pour expliquer ces résultats.

Perception des attributs auditifs

La psychoacoustique de l'adulte s'est beaucoup intéressée aux mécanismes de codage des paramètres intervenant dans la perception des sons : la sonie (impression subjective d'intensité), la hauteur (position d'un son sur l'échelle grave-aigu), la localisation (position spatiale des sources)... Les recherches chez le bébé ont repris les modèles proposés chez l'adulte pour tenter de savoir s'ils étaient valides dans les premiers mois de la vie.

Perception de la hauteur

Les recherches sur les mécanismes de perception de la hauteur chez l'adulte font l'hypothèse d'un double codage : un codage tonotopique, permettant de situer la hauteur des

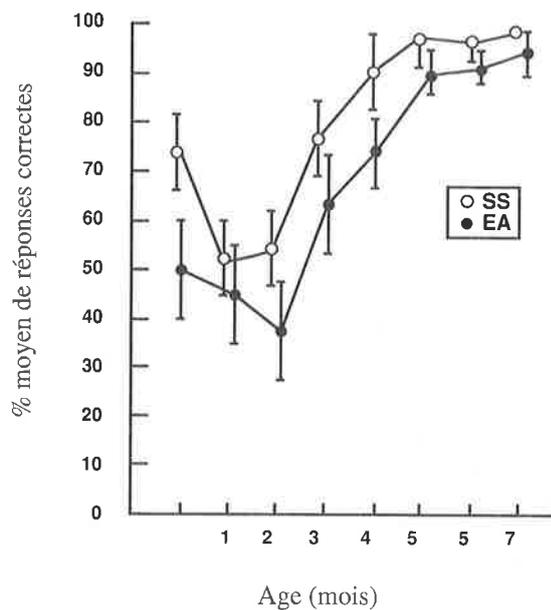


Figure 2. Pourcentage moyen des essais lors desquels les bébés ont tourné la tête vers la source sonore (SS) ou vers la source émettant en premier dans le cas de l'effet d'antériorité (EA) en fonction de l'âge (les barres verticales représentent les écarts types) d'après Muir al 1989.

sons dans la dimension grave-aiguë, ce qu'on appelle la *tonie*, directement liée à la fréquence des sons ; et un codage temporel basé sur le rythme de décharge des fibres permettant de situer les sons par rapport à leur position sur la gamme et de rendre compte, par exemple, de la similarité de deux sons à l'octave, ce qu'on appelle le *chroma*. On a mis en évidence la réalité perceptive du chroma chez des bébés de 3 mois en montrant qu'une séquence transposée à l'octave n'était pas considérée comme nouvelle, à la différence de séquences diminuées ou augmentées d'un demi-ton par rapport à l'octave (Demany, Armand, 1984). D'autres auteurs ont montré que chez des bébés de 7 mois comme chez les adultes la hauteur d'un son complexe harmonique correspond à la fréquence fondamentale de ce son, même si cette fréquence fondamentale est artificiellement retirée du son complexe (phénomène de la fondamentale absente) (Clarkson, Clifton, 1985). Il ressort de ces recherches que les modèles de perception de la hauteur établis pour l'adulte semblent appropriés pour décrire la perception des bébés.

Localisation

On sait qu'à la naissance existe un réflexe d'orientation, mouvement de la tête ou des yeux en direction de la source lorsque le son est de niveau modéré, et dans la direction opposée en cas de son intense. Ces réflexes sont probablement d'origine sous-corticale. On observe une disparition de ce réflexe vers 1 mois et demi, et l'apparition progressive d'une conduite d'orientation vers 3 mois. Lors de procédures standardisées, on a pu suivre l'évolution de cette compétence à détecter l'origine des sources sonores (Muir, Clifton, Clarkson, 1989). Les auteurs pensent que l'acquisition seconde de la capacité de localiser les sources est à mettre en parallèle avec l'acquisition d'un autre phénomène, vraisemblablement d'origine centrale, appelé effet d'antériorité, qui permet aux auditeurs de localiser une source en sup-

primant les informations provenant des réverbérations des sons dans les 30 ms suivant l'émission directe. La *figure 2* montre l'évolution en fonction de l'âge, d'une part de la localisation simple (cercles vides), et d'autre part de la localisation en cas d'écho précoce (situation entraînant l'effet d'antériorité, cercles pleins). On constate que si les nouveau-nés localisent les sources, ils ne sont pas sensibles à l'effet d'antériorité. Par contre, à partir de 3 mois, on peut observer une émergence parallèle des deux compétences. Ces données étayent donc l'hypothèse d'une origine corticale de la localisation des sons, telle qu'elle apparaît à partir de l'âge de 3 mois.

Organisation auditive

Le monde auditif n'est pas constitué d'une juxtaposition d'éléments distincts, indépendants les uns des autres, mais d'ensembles que les auditeurs regroupent en leur donnant sens. On s'est demandé dans ce domaine encore si les bébés doivent apprendre à effectuer ces regroupements, à partir de ce qui serait alors un « brouillard » sonore primordial, ou si, très précocement, ils possèdent une représentation cohérente des événements auditifs. Les bébés perçoivent-ils les séquences sonores complexes ou chaque stimulus est-il perçu isolément, sans être intégré dans un ensemble plus vaste ?

Perception du rythme et du tempo

L'adulte regroupe très rapidement des événements auditifs périodiques en séquences rythmiques. Le bébé en fait-il autant, ou ne perçoit-il que des séries de stimuli isolés ? On a montré que des bébés de 2 mois et demi organisent les événements en séquences rythmiques, en regroupant dans une même séquence des sons proches dans le temps (Demany, 1977). D'autres expériences sur des bébés de 6 à 8 mois montrent qu'ils groupent les patterns aussi bien sur la base de similarité de fréquence que de similarité de structure temporelle. Des bébés de 2 à 4 mois peuvent discriminer deux séquences de sons réguliers, qui ne se différencient que par leur tempo (Baruch, 1994). Toutes ces données vont dans le sens d'une capacité à organiser dans le temps les stimuli complexes qui semble très précocement opérationnelle.

Perception des mélodies

La reconnaissance des mélodies chez l'adulte dépend des relations entre les hauteurs relatives, et utilise donc des indices globaux de reconnaissance. A l'inverse, les oiseaux se basent sur les hauteurs de chacune des notes, indépendamment des autres. Ce sont des indices locaux qui sont utilisés. Des bébés de 2 mois réagissent à des changements dans la mélodie (qui impliquent une rupture dans les hauteurs relatives des notes), mais pas à des transpositions, dans lesquelles les rapports de hauteur entre les notes sont conservés (Trehub, Trainor, 1994). Ce sont donc bien, comme chez l'adulte, des changements de contour qui sont détectés, ce qui témoigne d'une stratégie globale de traitement.

Ségrégation du flux auditif

On peut construire des séquences de notes de telle manière que l'auditeur perçoive soit un, soit plusieurs flux auditifs séparés, en respectant certaines règles de rapport des notes entre elles. Cette propriété a été fréquemment utilisée par

les compositeurs pour faire entendre simultanément plusieurs lignes mélodiques. Des expériences chez des bébés de 2 à 5 mois ont montré qu'eux aussi organisent les événements auditifs en plusieurs flux, en regroupant les éléments les plus proches en fréquence, en intensité et en spectre, comme les adultes. Il y a donc précocement des capacités d'organisation de la scène auditive qui permettent aux bébés de percevoir un monde auditif cohérent. Des expériences ont tenté de mettre en évidence ce type de compétences chez le nouveau-né, mais les difficultés de procédure n'ont pas encore permis d'obtenir des résultats concluants.

CONCLUSION

Toutes ces expériences montrent que les bébés ont des compétences auditives très performantes, qui témoignent de leur capacité à extraire de l'environnement sonore les informations pertinentes et à les organiser d'une manière très comparable à l'adulte. Par contre, sur le plan quantitatif, le système auditif semble continuer à mûrir pendant plusieurs mois après la naissance. Les échanges entre données provenant du développement anatomique, physiologique, et perceptif sont extrêmement fructueux pour comprendre non seulement l'audition des bébés, mais aussi le fonctionnement du système auditif en lui-même. Cependant, la plupart des recherches sont effectuées chez des bébés déjà « vieux » (à partir de 2 mois), du fait de la très grande difficulté de recueillir des données chez les nouveau-nés. Or, de toute évidence, les apprentissages et la maturation qui ont lieu durant les deux premiers mois de la vie sont considérables. Il serait donc souhaitable de tester plus systématiquement les compétences des nouveau-nés, ne serait-ce que pour savoir précisément ce dont ils sont capables,

et donc pouvoir mieux dépister et identifier les éventuelles pathologies.

RÉFÉRENCES

- [1] BARUCH : « Discrimination du temps chez des bébés de 4 mois », *Journal de Physique*, 4, 1994, pp. 367-370.
- [2] CLARKSON, CLIFTON : « Infant pitch perception : Evidence for responding to pitch categories and the missing fundamental », *Journal of acoustical society of America*, 1977, pp. 1 521-1 528.
- [3] DEMANY, Mc ENZIE, VURPILLOT, « Rythm perception in early infancy », *Nature*, 27, 1977, p. 718-719.
- [4] DEMANY, ARMAND : « The Perceptual reality of tone chroma in early infancy », *Journal of the Acoustical Society of America*, 76 (1), 1984, p. 57-66.
- [5] GRANIER-DEFERRE : « Les compétences auditives prénatales », Thèse d'Etat, Université de Paris-Sud Orsay, 1994, p. 193.
- [6] MUIR, CLIFTON, CLARKSON : « The development of a human auditory localization response: a U-shape function », *Canadian Journal of Psychology*, 43 (2), 1989, pp. 199-216.
- [7] OLSHO, KOCH, CARTER, HALPIN, SPETNER : « Pure tone sensitivity of human infants », *Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 1988, pp. 1316-1324.
- [8] PUJOL, LAVIGNE-REBILLARD : « Development of neurosensory structures in the human cochlea », *Acta-Otolaryngologica*, 112, 1992, pp. 259-264.
- [9] SINNOTT, ASLIN : « Frequency and intensity discrimination in human infants and adults », *Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 1985, pp. 1986-1992.
- [10] TREHUB, TRAINOR, « Les stratégies d'écoute chez le bébé : origines du développement de la musique et de la parole », in *Penser les sons*, McAdams Biganot eds, PUF, 1994, pp. 299-347.
- [11] WERNER, BARGONES : « Psychoacoustic development of human infants », in Rovee-Collier, Lipsitt (eds), *Advances in infancy research*, vol. 7, ABLEX, Norwood, 1993, pp. 103-145.

La perception de la parole chez le nouveau-né

Une approche expérimentale et neuropsychologique

J. BERTONCINI, G. DEHAENE-LAMBERTZ

Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique, CNRS - EHESS

RÉSUMÉ : *La perception de la parole chez le nouveau-né. Une approche expérimentale et neuropsychologique.*

Grâce à diverses méthodes expérimentales, certaines capacités perceptives de traitement de la parole ont été mises en évidence chez l'enfant dès la naissance. Cet article présente des données récentes sur la perception des unités de parole et sur la discrimination des langues chez le nouveau-né. De nouvelles recherches sont également présentées qui tentent de déterminer les bases cérébrales de ces capacités, en utilisant des techniques de potentiels évoqués, ou en examinant les capacités de discrimination de nouveau-nés prématurés présentant des lésions cérébrales périventriculaires.

Mots clés : Acquisition du langage — Perception de la parole — Nouveau-né — Prématuré.

SUMMARY: *Speech perception in the new-born baby. An experimental and neuro-psychological approach.*

Various experimental methods have demonstrated that, right from birth, infants possess certain perceptual capacities for speech processing. This paper presents recent data on neonates' abilities to perceive speech units and to discriminate different languages. In addition, we address the question of the cerebral correlates of these early perceptual capacities, by presenting new data on auditory evoked responses (AERs) in normal infants, and on discrimination capacities in premature infants with periventricular lesions.

Key words: Language acquisition — Speech perception — Neonate — Premature infant.

L'acquisition du langage résulte de la maturation des structures cérébrales programmées pour le traitement des informations issues d'un « environnement linguistique ». Les processus mentaux de compréhension et de production se développent naturellement selon un calendrier commun à tous les humains. Cependant, si nous disposons tous des mêmes potentialités, en l'absence de déficits particuliers, nous naissons dans des environnements linguistiques distincts. Ainsi, le développement de la perception et, plus tard, de la production des sons de parole présente à la fois des caractéristiques universelles et des traits spécifiques à la langue parlée dans l'environnement.

Après s'être longtemps attachée à la découverte des caractéristiques universelles des capacités langagières précoces, la recherche psycholinguistique tend de plus en plus à tirer profit des différences entre langues pour comprendre cette surprenante capacité humaine qu'est l'acquisition du langage. Le début de ces recherches date des années 70 au cours desquelles des capacités insoupçonnées de traitement des sons de parole ont été mises en évidence chez des enfants âgés de quelques semaines ou de quelques jours. Grâce au développement de méthodes de test faciles à manier avec des nourrissons, on a commencé à explorer la manière dont les enfants percevaient la parole bien avant d'être capables d'en produire les sons ou de comprendre les mots.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine consiste à « habituer » les enfants à un stimulus sonore, répété de nombreuses fois, puis à leur présenter un stimulus différent. Leur réaction au changement de stimulation, si elle est significative, indiquera qu'ils ont discriminé les deux stimuli l'un de l'autre. Cette méthode, aujourd'hui classique, est basée sur l'enregistrement d'une réponse comportementale, telle que la succion non nutritive, et de ses modifications au cours du test. On dira que les enfants ont discriminé les deux stimuli si leurs taux de succion après le changement sont statistiquement plus élevés que ceux des enfants placés dans les mêmes conditions, mais qui ne reçoivent qu'un seul et même stimulus tout au long de l'expérience. Grâce à cela, on peut étudier les capacités de discriminations de très jeunes enfants, nourrissons de quelques semaines, nouveau-nés de quelques jours, et même de nouveau-nés prématurés.

Avec les enfants plus âgés, dont le répertoire comportemental est évidemment plus riche, il est possible d'utiliser d'autres méthodes, comme celles basées sur l'acquisition d'une réponse conditionnée. A partir de 4 à 5 mois, la réponse d'orientation de la tête est largement utilisée dans l'étude des capacités de catégorisation des jeunes enfants. Un stimulus répété de façon continue est, de temps à autre, pendant plusieurs secondes, remplacé par un autre stimulus. On apprend à l'enfant à s'orienter, au moment du changement sonore, vers un dispositif visuel, dans lequel il peut voir un petit jouet s'animer. Une fois cette réponse acquise, il est possible de compliquer la tâche de l'enfant, en introduisant des stimuli différents, plus variables. On vérifie ainsi que, malgré la variabilité des stimuli, l'enfant continue de réagir correctement au changement. Cela permet d'étudier non seulement comment les enfants discriminent des stimuli, mais aussi comment ils classent des exemplaires différents dans des catégories linguistiques. Ces méthodes sont donc extrêmement utiles pour établir l'existence de capacités perceptives précoces. Elles présentent, cependant, deux inconvénients majeurs. Elles nécessitent de tester un très grand nombre de sujets, sans qu'il soit possible d'interpréter les résultats individuels. Par ailleurs, elles ne donnent pas d'indication sur l'aspect temporel du traitement du stimulus, ou sur le niveau de difficulté de la discrimination. La mesure des temps d'orientation oculaire peut fournir de telles informations. Avec cette méthode, on mesure le temps entre le début de la présentation d'un stimulus latéralisé (visuel ou auditif) et la première saccade oculaire en direction de ce stimulus. Si les procédures de traitement du stimulus diffèrent selon les conditions expérimentales, les temps de latence des réponses d'orientation oculaire en sont affectés. Cette méthode permet donc de mettre en rapport la rapidité de la réponse d'orientation avec la complexité du traitement perceptif.

La résolution temporelle des potentiels évoqués est encore plus importante et permet de suivre la séquence des étapes de traitement cérébral à l'échelle de la milliseconde. Cette technique consiste à enregistrer l'activité électrique du cerveau au niveau du scalp, après un événement sensoriel. Le moyennage du signal électrique lors des présentations

successives du stimulus permet d'extraire de l'activité cérébrale de fond les événements électriques consécutifs à cette stimulation. En comparant l'évolution temporelle du signal en fonction des conditions expérimentales et de l'emplacement des électrodes, il est possible de déterminer la séquence des étapes de traitement, d'en préciser la chronologie et éventuellement de localiser les régions cérébrales impliquées.

DES CAPACITÉS INITIALES UNIVERSELLES AUX CAPACITÉS DE TRAITEMENT SPÉCIFIQUES DE LA LANGUE

Depuis les travaux de Peter Eimas et de ses collègues (Eimas, Siqueland, Jusczyk, Vigorito, 1971) on admet que les enfants au cours des premiers mois de vie sont capables de distinguer tout type de contraste phonétique utilisé dans les langues naturelles, qu'il s'agisse du voisement (ba/pa), de la place d'articulation (ba/da) ou de la manière (ba/ma). Ils discriminent non seulement les contrastes utilisés dans la langue de leur entourage, mais également ceux auxquels ils n'ont jamais été exposés. En outre, les enfants perçoivent les sons de parole de façon catégorielle : la discrimination est en général meilleure entre sons de deux catégories phonétiques différentes qu'entre deux sons appartenant à la même catégorie. On voit ainsi que les enfants sont préparés à utiliser les informations acoustiques pertinentes pour l'acquisition des sons de toute langue naturelle.

Cependant, ces capacités, que l'on peut qualifier d'universelles, évoluent rapidement au cours de la première année. A partir de 8 à 10 mois, le traitement perceptif des sons de parole subit une réorganisation conduisant à un déclin des capacités à discriminer les contrastes phonétiques « étrangers » qui ne sont pas utilisés dans la langue de l'environnement (Werker, Tees, 1984). Ce déclin n'a rien d'une « détérioration » sensorielle, il serait plutôt d'ordre attentionnel et témoignerait de la mise en place de traitements plus évolués pour les catégories phonologiques, à savoir les phonèmes qui distinguent les mots de la langue en cours d'acquisition. Des travaux plus récents ont également révélé que dès l'âge de 6 mois les enfants organisent leur représentation des voyelles autour des formes prototypiques de la langue (Kuhl, Williams, Lacerda, Stevens, Lindblom, 1992).

On voit ici l'intérêt de confronter de jeunes enfants à des sons qui ne leur sont pas familiers et qui appartiennent à des systèmes linguistiques différents. Ce type de travaux met clairement en évidence l'influence précoce qu'exerce la langue maternelle sur la manière dont s'organise la perception des sons de parole. Ils nous renseignent également sur le développement de cette organisation, en précisant à quel moment sont acquises certaines caractéristiques de la langue maternelle, avant que le système articulatoire soit lui-même apte à les produire. Les recherches que nous venons d'évoquer tentent d'expliquer comment la phonologie de la langue est acquise, comment, à partir du signal de parole, l'enfant parvient à établir le répertoire des structures sonores caractérisant sa langue.

L'enfant doit reconnaître la similitude des phonèmes en dépit de leur grande variabilité acoustique, due aux segments adjacents, à la position dans le mot, à la voix du locuteur, ou encore à la vitesse d'élocution. Pour ce faire, le système doit être capable de segmenter le signal sonore en unités d'information qui pourront être normalisées, stockées en mémoire et reconnues ultérieurement. On cherche donc à déterminer la nature de ces unités de perception et de représentation à partir desquelles l'enfant découvre les régularités segmentales de sa langue. Selon une hypothèse, l'unité que le système perceptif est prédisposé à traiter serait de l'ordre de la syllabe.

LA PERCEPTION DES UNITÉS DE PAROLE

Les résultats de plusieurs de nos recherches suggèrent que les enfants nouveau-nés perçoivent la syllabe comme une unité (Bertoncini, Mehler, 1981). On a montré qu'ils discriminent mieux des séquences syllabiques (tap/pat) que des séquences non syllabiques (tsp/pst). Par ailleurs, les enfants auxquels on présente des séries de syllabes différentes partageant un phonème commun (soit la Consonne, soit la Voyelle, dans des syllabes CV) ne sont pas capables de reconnaître l'identité du phonème et réagissent sur la base de la globalité de la syllabe (Bertoncini, Bijeljac-Babic, Jusczyk, Kennedy, Mehler, 1988). Il semble donc qu'au moins au cours des premières semaines les enfants perçoivent des syllabes globalement sans les analyser en termes de composants phonétiques. Ces résultats sont à distinguer de ceux de la discrimination où deux syllabes CV qui varient sur un seul trait phonétique (ex. : ba/da) sont parfaitement discriminées par les enfants.

La syllabe pourrait donc être l'unité première de perception, et conserver un rôle important dans la perception (et la production) des mots, comme semblent l'indiquer les recherches effectuées avec des sujets adultes. Cependant, jusque récemment, tous les travaux sur la perception de la parole chez le jeune enfant avaient utilisé des stimuli constitués d'une seule syllabe, presque toujours du type CV. Il fallait donc soumettre les enfants à des stimuli plus proches de ce qui fait la parole naturelle, à savoir des énoncés multisyllabiques, afin de déterminer s'ils les percevaient comme étant constitués d'unités syllabiques.

Nous nous sommes interrogés sur la capacité des enfants nouveau-nés à percevoir le nombre de syllabes qui composent les mots (Bijeljac-Babic, Bertoncini, Mehler, 1993). En effet, si les enfants perçoivent et se représentent les mots multisyllabiques comme constitués de syllabes, alors ils doivent être capables de discriminer, par exemple, des mots bisyllabiques de mots trisyllabiques.

Des enfants de 3 ou 4 jours ont été soumis à des listes de mots (ou pseudo-mots) très variés phonétiquement, composés de deux ou trois syllabes (ex. : *balé, posu.../rigafo, délîma...*). Après plusieurs minutes de familiarisation avec l'une des listes (bi- ou trisyllabes), l'autre liste leur était présentée. Comme chaque liste comptait plusieurs dizaines de mots différents, les enfants ne pouvaient les distinguer sur la base des mots qui y figuraient. Il leur fallait « reconnaître », à travers cette diversité, une propriété commune (soit deux, soit trois syllabes), et répondre

au changement de liste sur la base de cette propriété. Les résultats ont montré qu'en effet les nouveau-nés réagissaient à un tel changement. On peut ainsi en déduire qu'ils avaient remarqué la similitude des mots de chaque liste, basée sur le nombre de syllabes. En revanche, lorsqu'on présentait des listes de pseudo-mots, tous composés de deux syllabes, mais se distinguant sur le nombre de phonèmes (consonnes et voyelles), les enfants ne parvenaient pas à les discriminer.

La syllabe est-elle l'unité première de représentation de la parole, ou d'autres unités peuvent-elles prétendre au même statut ? La syllabe est l'unité rythmique qui caractérise le français, mais des langues comme l'anglais ou le japonais présentent des structures rythmiques différentes. Il était donc important de déterminer si les enfants discriminent aussi des énoncés de ces langues sur le nombre de syllabes qui les composent. Dans une étude récente, nous avons présenté à des nouveau-nés français des listes de mots japonais, prononcés par une locutrice japonaise (Bertoncini, Floccia, Nazzi, Miyagishima, Mehler, en préparation). Lorsque les listes étaient organisées en fonction du nombre de syllabes (ex. : *iga, kesi, hake, yuri...* vs. *hekiga, kokesi, hakike, yukari...*) les nouveau-nés les distinguaient tout comme ils l'avaient fait avec les pseudo-mots français. Au contraire, lorsque les listes étaient constituées de mots bisyllabiques, variant sur le nombre d'unités moraiques sub-syllabiques utilisées en japonais (ex. : *iga, kesi, hake, yuri...* vs. *iNga, kesiN, haQke, yuuri...*), les nouveau-nés ne montraient pas de réaction de discrimination. Malgré la différence de structure rythmique des mots, les enfants semblent encore une fois n'en traiter que la composition syllabique.

Par ailleurs, en japonais, chaque mot est prononcé avec un contour intonatif précis, fait d'une succession de tons hauts et bas, suivant des règles strictes, en fonction du nombre d'unités composant le mot. Ainsi, deux mots peuvent se distinguer uniquement sur le contour. Dans une seconde étude, nous avons présenté aux nouveau-nés français des mots bi- et trisyllabiques en mélangeant les mots à contour montant et les mots à contour descendant. Dans ce cas, les enfants se sont montrés incapables de distinguer les mots sur le nombre des syllabes. Ces résultats suggèrent que les enfants portent principalement leur attention sur la prosodie des mots, et ne parviennent à en analyser la composition syllabique que s'ils ont établi une représentation unique au niveau global.

DISCRIMINATION DES LANGUES

Comme nous l'avons dit plus haut, ce ne sont pas des syllabes ou des mots isolés que les bébés entendent le plus souvent, mais des phrases, de longueur et de complexité variables, voire des phrases incomplètes ou agrammaticales. Pourtant, c'est à partir de ces informations complexes qu'ils doivent extraire les caractéristiques de leur langue maternelle. La situation se complique encore lorsque les nourrissons sont élevés dans un milieu bilingue. On a vu que l'influence de la langue maternelle se manifeste à partir de six mois sur la façon dont les enfants perçoivent les voyelles (Kuhl et al., 1992 ; Polka, Werker, 1994). Que se

passé-t-il au cours de ces six premiers mois, et sur quelles informations linguistiques les nourrissons distinguent-ils leur langue maternelle d'une autre langue ?

Des phrases d'environ 15 secondes, extraites du discours spontané d'une femme bilingue français-russe, ont été présentées à des nouveau-nés français, dont on enregistrerait les taux de succion. Une fois les enfants « habitués » à la présentation des phrases de la langue maternelle (français) ou étrangère (russe), les sujets du groupe expérimental entendaient des phrases de l'autre langue alors que ceux du groupe contrôle continuaient d'entendre la même langue. L'augmentation significative des taux de succion après le changement de langue, dans le groupe expérimental, a révélé que les nouveau-nés discriminaient les phrases en français des phrases en russe. Cette discrimination s'accompagnait d'une préférence pour la langue maternelle, reflétée par une activité de succion plus importante à l'écoute des phrases en français. Sur quel type d'information les enfants se sont-ils basés pour distinguer ces deux langues ? Il semble là encore que la prosodie (intonation, rythme, accentuation) ait joué un rôle déterminant. En effet, la discrimination entre langue maternelle et étrangère persistait lorsque les phrases étaient filtrées de manière à ne préserver que l'information prosodique (Mehler, Jusczyk, Lambertz, Halsted, Bertoni, Amiel-Tison, 1988).

Il semble donc que dès la naissance les enfants puissent reconnaître leur langue maternelle grâce à sa prosodie. Mais quelle est la quantité d'information nécessaire ou en combien de temps un bébé s'aperçoit-il qu'il s'agit de sa langue maternelle ? La mesure du temps d'orientation oculaire permet d'aborder cette question. Des phrases, extraites d'une histoire lue en français ou en anglais par une locutrice bilingue, ont été présentées, aléatoirement à gauche ou à droite, à des nourrissons américains de 2 mois, issus de familles anglophones monolingues. Si les enfants reconnaissent leur langue maternelle, leurs réponses d'orientation à l'écoute d'une langue totalement inconnue doivent être différentes. Effectivement, à 2 mois, les nourrissons répondent plus lentement, d'environ 300 ms, à la présentation des phrases de la langue étrangère qu'à celle de la langue maternelle. On observe le même comportement que les phrases soient filtrées ou non, soulignant une fois de plus l'importance des indices prosodiques. Par ailleurs, les nourrissons répondaient de façon similaire et ralentie aux phrases, tant anglaises que françaises, dont la prosodie était détruite. Enfin, très peu d'information linguistique semble leur être nécessaire puisqu'il suffit de phrases d'environ une seconde pour qu'ils reconnaissent leur langue maternelle dans ce paradigme expérimental (Dehaene-Lambertz, en préparation).

Les nourrissons apprennent très rapidement certaines caractéristiques de leur langue maternelle, et au cours des premiers mois les informations prosodiques globales semblent prédominer dans la perception de la parole. Cette attention particulière à la prosodie serait très utile à l'acquisition de la grammaire et du lexique, car l'organisation prosodique des phrases est un des indices qui permettent de regrouper les termes reliés entre eux et de segmenter le discours en unités linguistiques (Wanner, Gleitman, 1982 ; Jusczyk, Hirsh-Pasek, Kemler Nelson, Kennedy, Woodward, Piwoz, 1992).

UNE APPROCHE NEUROPSYCHOLOGIQUE DU DÉVELOPPEMENT DU TRAITEMENT DE LA PAROLE

S'il est démontré que le traitement du langage est associé, chez la majorité des adultes, à l'hémisphère gauche, la question d'une spécialisation précoce de certaines régions cérébrales pour le traitement linguistique reste débattue. Le recours aux méthodes d'imagerie fonctionnelle est donc nécessaire, mais toutes ne sont pas utilisables avec de très jeunes enfants. La technique des potentiels évoqués a l'avantage d'être non invasive et ne nécessite qu'un équipement relativement modeste. La médiocre résolution spatiale peut être améliorée en utilisant un réseau très dense d'électrodes, et l'incomparable résolution temporelle de cette méthode permet de suivre la séquence des opérations perceptives.

Grâce à cette technique, la discrimination syllabique a pu être décomposée en trois étapes. Des nourrissons de 2 à 3 mois entendaient deux syllabes /ba/ et /ga, identiques en durée, intensité et fréquence fondamentale. Pour chaque nourrisson, l'une des syllabes était désignée comme la syllabe standard (S), l'autre comme la syllabe déviante (D). A chaque essai, une séquence de cinq syllabes était présentée. Dans la moitié des cas, la syllabe S était répétée cinq fois, dans l'autre moitié, elle était répétée quatre fois, suivie d'une seule occurrence de la syllabe D. L'analyse de l'évolution de l'activité électrique cérébrale a permis d'isoler deux étapes précoces, survenant dans deux régions temporelles proches, qui correspondraient à une analyse acoustique progressivement affinée de la syllabe. A 220 ms, l'analyse acoustique ne permet pas de distinguer la syllabe D de la syllabe S. A 400 ms, l'information phonétique est traitée et permet de discriminer les deux syllabes. Une seule présentation de D suffit au nourrisson pour la reconnaître comme nouvelle. Enfin, ces deux premières étapes montrent une asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche, ce qui suggère une dominance cérébrale et une spécialisation fonctionnelle déjà présente. Une troisième étape frontale, à partir de 700 ms, suit l'introduction de la syllabe D et correspondrait à l'activation d'un système d'orientation à la nouveauté (Dehaene-Lambertz, Dehaene, 1994). L'utilisation plus systématique de cette technique devrait améliorer notre compréhension des relations entre maturation cérébrale et capacité linguistique, en déterminant à des âges donnés la séquence de traitement et les zones cérébrales impliquées.

D'autres moyens s'offrent également à l'étude neuropsychologique des capacités précoces de traitement de la parole. En particulier l'étude d'enfants souffrant de lésions cérébrales peut nous éclairer sur la relation entre déficits fonctionnels et atteintes anatomiques précoces. Les lésions cérébrales pourraient affecter le traitement linguistique, soit directement en détruisant les structures normalement impliquées, soit en altérant plus généralement les processus attentionnels. Comme nous l'avons vu précédemment, le traitement perceptif se modifie dans les premiers mois sous l'influence de la langue maternelle. Un déficit attentionnel, pendant cette période, pourrait altérer ou retarder les premières étapes d'acquisition, ainsi que le développement ultérieur du langage.

Les prématurés ont un risque important de lésions cérébrales. 40 à 45 % des prématurés pesant moins de 1 500 g ou nés avant 35 semaines d'aménorrhée souffrent d'hémorragies intraventriculaires (Papile, Burnstein, Burnstein, Koffler, 1978). Pour déterminer si ces lésions affectent la discrimination syllabique, deux groupes de prématurés ont été testés à 35-36 semaines d'aménorrhée avec la technique basée sur la mesure des taux de succion non nutritive (Dehaene-Lambertz, soumis). Le premier groupe était constitué de prématurés n'ayant souffert d'aucune pathologie périnatale. Le deuxième groupe comprenait des prématurés porteurs de lésions intra- et périventriculaires visibles en échographie. Les deux groupes ont montré une réaction de discrimination au changement de syllabe. Néanmoins, alors que les prématurés « sains » se comportaient comme les nouveau-nés à terme, placés dans les mêmes conditions, les prématurés pathologiques avaient un comportement significativement différent. L'introduction d'une nouvelle syllabe inhibait leurs réponses de succion, plutôt que de les réactiver. Cette inhibition pourrait être liée à des troubles attentionnels, secondaires à des lésions du noyau caudé et des projections caudofrontales. Cette expérience marque un premier pas dans l'étude des capacités précoces des nourrissons souffrant de lésions cérébrales, et l'on peut penser que dans des tâches plus complexes, où le coût attentionnel serait plus important, des déficits linguistiques pourraient apparaître.

EN CONCLUSION

Dès la naissance, le système perceptif est prêt à utiliser certaines propriétés du signal de parole. Aussi, très précocement, les capacités initiales « universelles » se modifient sous l'influence de la langue maternelle. Les processus perceptifs et attentionnels impliqués dans le traitement de la parole vont se spécialiser et se structurer en fonction des propriétés prosodiques, puis phonologiques de la langue. Il est possible enfin que le développement de la production et la compréhension de quelques mots soient nécessaires à l'acquisition complète de la structure sonore de la langue (de Boysson-Bardies, Vihman, 1991 ; Hallé, de Boysson-Bardies, 1994). Un premier pas a été entrepris vers la détermination neuropsychologique du traitement de la parole chez le jeune enfant. Des recherches ultérieures devront examiner les relations entre maturation cérébrale et développement des capacités linguistiques, ainsi que l'éventuel retentissement des lésions cérébrales périnatales sur les premières acquisitions. Enfin, les recherches actuelles confirment l'extrême sensibilité et la spécialisation du système dont est doté tout être humain pour traiter de façon très particulière certains signaux de son environnement sonore, et en faire sa langue maternelle.

RÉFÉRENCES

- [1] BERTONCINI (J.), BIJELJAC-BABIC (R.), JUSCZYK (P.W.), KENNEDY (L.), MEHLER (J.) : « An investigation of young infant's perceptual representations of speech sounds », *Journal of Experimental Psychology: General*, 117, 1988, pp. 21-33.
- [2] BERTONCINI (J.), MEHLER (J.) : « Syllables as units in infant speech perception », *Infant Behavior and Development*, 4, 1981, pp. 247-260.
- [3] BERTONCINI (J.), FLOCCIA (C.), NAZZI (T.), MIYAGISHIMA (K.), MEHLER (J.) : « Morae and syllables: rhythmical basis of speech representations in neonates » (en préparation).
- [4] BIJELJAC-BABIC (R.), BERTONCINI (J.), MEHLER (J.) : « How do four-day-old infants categorize multisyllabic utterances? », *Developmental Psychology*, 29, 1993, pp. 711-721.
- [5] DE BOYSSON-BARDIES (B.), VIHMAN (M.M.) : « Adaptation to language: evidence from babbling and early words in four languages », *Language*, 61, 1991, pp. 297-319.
- [6] DEHAENE-LAMBERTZ (G.), DEHAENE (S.) : « Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants », *Nature*, 370, 1994, pp. 292-295.
- [7] DEHAENE-LAMBERTZ (G.) : « Language discrimination in infants: the role of prosodic units » (en préparation).
- [8] DEHAENE-LAMBERTZ (G.) : « Syllable discrimination by premature neonates with or without periventricular-intraventricular lesion » (soumis).
- [9] EIMAS (P.D.), SIQUELAND (E.R.), JUSCZYK (P.W.), VIGORITO (J.) : « Speech perception in infants », *Science*, 171, 1971, pp. 303-306.
- [10] HALLÉ (P.A.), DE BOYSSON-BARDIES (B.) : « Emergence of an early receptive lexicon: infant's recognition of words », *Infant Behavior and Development*, 17, 1994, pp. 119-129.
- [11] JUSCZYK (P.W.), HIRSH-PASEK (K.), KEMLER NELSON (D.G.), KENNEDY (L.J.), WOODWARD (A.), PIWOZ (J.) : « Perception of acoustic correlates of major phrasal units by young infants », *Cognitive Psychology*, 24, 1992, pp. 252-293.
- [12] KUHL (P.K.), WILLIAMS (K.A.), LACERDA (F.), STEVENS (K.N.), LINDBLOM (B.) : « Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age », *Science*, 255, 1992, pp. 606-608.
- [13] MEHLER (J.), JUSCZYK (P.W.), LAMBERTZ (G.), HALSTED (N.), BERTONCINI (J.), AMIEL-TISON (C.) : « A precursor of language acquisition in young infants », *Cognition*, 29, 1988, pp. 143-178.
- [14] PAPILE (L.A.), BURSTEIN (J.), BURSTEIN (R.), KOFFLER (H.) : « Incidence and evolution of subependymal and intraventricular hemorrhage: a study of infants with birthweights less than 1500 gm », *Journal of Pediatrics*, 92, 1978, pp. 529-534.
- [15] POLKA (P.), WERKER (J.F.) : « Developmental changes in perception of nonnative vowel contrasts », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 1994, pp. 421-435.
- [16] WANNER (E.), GLEITMAN (L.R.) : *Language acquisition: the state of the art*, New York, 1982, Cambridge University Press.
- [17] WERKER (J.F.), TEES (R.C.) : « Cross-language speech perception: evidence for perceptual reorganization during the first year of life », *Infant Behavior and Development*, 7, 1984, pp. 49-63.

Le développement du système vestibulaire chez le nourrisson

F. JOUEN*

* LENA/EPBD URA CNRS 654, Hôpital de la Salpêtrière, 47, boulevard de l'Hôpital, 75651 Paris, Cedex 13.

RÉSUMÉ : *Le développement du système vestibulaire chez le nourrisson.*

Ce chapitre présente une synthèse des connaissances actuelles sur le développement du système vestibulaire chez le nourrisson. Après avoir insisté sur la précocité de l'organogenèse prénatale du système labyrinthique, nous résumons brièvement le niveau de maturation de ce système chez le prématuré et le nouveau-né à terme. Le développement des réponses vestibulaires postnatales est ensuite analysé à la lumière des différentes perspectives développementales qui l'ont étudié.

Mots clés : Développement vestibulaire — Nourrissons.

SUMMARY: *The development of the vestibular system in young babies.*

This chapter is a synthesis of the present knowledge about the development of the vestibular system in the newborn baby. After pointing out the precociousness of the prenatal organogenesis of the labyrinthine system, we briefly summarize the maturation level of this system in the premature and full-term newborn. The development of the postnatal vestibular responses is then analyzed considering the various developmental approaches according to which it has been studied.

Key words: Development of vestibular — Young babies.

Le système vestibulaire est un des systèmes sensoriels les plus fascinants. Très précoce dans l'histoire des espèces comme dans l'ontogenèse, il présente un certain nombre de caractéristiques en apparence contradictoires. Au premier abord, ce système apparaît comme un système simple et primitif du point de vue de son organisation fonctionnelle : un ensemble de récepteurs périphériques, situés à une synapse des neurones vestibulaires du tronc cérébral, chargé d'enregistrer et de coder les accélérations linéaires et angulaires. De plus, à la différence des stimuli visuels ou auditifs complexes, les caractéristiques physiques des stimulations vestibulaires se définissent uniquement en termes de direction et de valeur de l'accélération. Mais le système vestibulaire est également extrêmement complexe. Cette complexité est avant tout liée à sa fonction. Le système vestibulaire est impliqué dans le contrôle de base de l'activité posturale, fondamentale pour la perception et l'action, mais également dans un ensemble sophistiqué de processus cognitifs mis en jeu dans la perception et la représentation des déplacements de l'organisme ainsi que dans l'orientation spatiale. Un second aspect concernant la complexité du système vestibulaire réside dans sa nature fondamentalement plurimodale. Les stimulations

naturelles du système vestibulaire, liées au mouvement de la tête et du corps, sont toujours multisensorielles (vestibulaires, proprioceptives et extéroceptives). Ces différentes informations fournissent une redondance sensorielle nécessaire au fonctionnement du système vestibulaire : la simplicité des récepteurs et des stimulations vestibulaires fait que, dans bien des cas, le codage de la direction et de la valeur des accélérations linéaires et angulaires serait impossible sans cette redondance sensorielle. La contrepartie d'un fonctionnement redondant et plurimodal se trouve dans la grande complexité des connexions entre les structures neuronales vestibulaires et les autres structures du système nerveux central. En effet, bien que l'essentiel du traitement des stimulations vestibulaires se fasse à un niveau sous-cortical (les neurones vestibulaires du tronc cérébral), ces structures n'en sont pas moins polyafférentées et en relation avec un nombre important de structures nerveuses localisées à différents niveaux du nevraxe. Cet article n'a pas pour objet de présenter un abrégé de physiologie vestibulaire. Celle-ci est maintenant bien connue, même si persistent des interrogations à propos de la représentation centrale des sensations de mouvement liées au déplacement du corps propre. Cependant, le développement du système vestibulaire a reçu

peu d'attention de la part des chercheurs. Nous avons tenté dans cet article de présenter une synthèse des travaux effectués dans différentes perspectives développementales.

ORGANOGENÈSE ET DÉVELOPPEMENT DU LABYRINTHE

La précocité du développement prénatal du système vestibulaire est connue depuis longtemps. Il a fallu cependant attendre le développement des techniques de microscopie optique pour obtenir des descriptions fines des débuts de la mise en place des structures labyrinthiques. Ces travaux, dont on trouvera une synthèse chez Hoshino (1982) et Anniko (1983), ont permis de montrer que les récepteurs labyrinthiques sont différenciés anatomiquement et matures aux environs de la moitié du développement prénatal : 18 à 20 semaines. Les structures nerveuses responsables des réponses vestibulo-oculaires se mettent en place autour de la 12^e semaine et sont complètement fonctionnelles à 24 semaines environ. Le nerf vestibulaire se développe précocement (vers 16 semaines environ), à peu près en même temps que les grandes voies spinales. L'utilisation de techniques de microscopie électronique à balayage a permis de préciser la mise en place des structures vestibulaires : à 7 semaines les récepteurs ne sont pas individualisés et il faut attendre la 8^e semaine pour que les récepteurs se différencient. Chez le fœtus humain, le développement des récepteurs vestibulaires se fait en deux phases rapides séparées par une pause maturative entre 9 et 12 semaines. A 14 semaines, les récepteurs sont similaires à ceux de l'adulte, mais les canaux semi-circulaires n'ont atteint que 55 % de leur taille. Il semble en outre qu'à cette date la maturation des utricules soit plus avancée que celle des canaux semi-circulaires, qui va continuer encore durant quelques semaines. A la naissance, le système vestibulaire est donc entièrement mature : les organes otolithiques et les canaux semi-circulaires sont complets. Les cellules ciliées des récepteurs sont fonctionnelles et les fibres du nerf vestibulaire présentent un niveau de myélinisation comparable à celui de l'adulte.

Réponses vestibulaires prénatales

Pour des raisons techniques aisément compréhensibles, les comportements vestibulaires fœtaux n'ont été systématiquement étudiés que récemment. Il semble néanmoins qu'autour de la 10^e semaine on puisse observer une ébauche de réflexe de Moro. Aux environs de la 12^e semaine apparaissent les premiers réflexes vestibulo-oculaires. Il est cependant nécessaire d'attendre la 24^e semaine pour obtenir des réponses vestibulo-oculaires nettes. C'est surtout autour de l'âge de 32 semaines que les réponses vestibulaires peuvent être clairement distinguées : le réflexe de Moro est complet et s'observe en réponse à un mouvement brusque de la mère. C'est également à cette date que le fœtus serait capable de s'orienter dans le liquide amniotique par un « pédalage d'origine labyrinthique ». Les travaux menés par J.-P. Lecanuet et collaborateurs font état de modifications du rythme cardiaque du fœtus en réponse à une stimulation vestibulaire par balancement.

Réponses vestibulaires postnatales

Nous limiterons notre présentation du développement postnatal des réponses vestibulaires aux données concernant le bébé humain. Nous avons présenté ailleurs (Jouen, 1990) un résumé des principaux résultats obtenus chez l'animal.

Réponses vestibulaires chez le prématuré

L'essentiel des travaux chez le prématuré porte sur la présence de réponses vestibulo-oculaires. Eviatar et Eviatar (1978) ont ainsi testé la présence d'un *nystagmus vestibulaire* chez des nouveau-nés eutrophiques, hypotrophiques, hypertrophiques et prématurés. Chez environ 75 % des nouveau-nés à terme, le nystagmus est présent lorsqu'il est testé entre 10 et 75 jours après la naissance. Ce chiffre n'est que de 25 % pour les bébés hypotrophiques. Il faut attendre l'âge de 3 à 4 mois pour que les hypotrophiques présentent une fréquence comparable de nystagmus. Aucun des bébés nés prématurément ne présente de nystagmus entre 10 et 75 jours : cette réponse se développe entre le 4^e et le 9^e mois de vie postnatale. La présence du *réflexe de Moro* a également été étudiée, chez le prématuré : dès l'âge de 25 semaines post-conceptionnelles, un réflexe de Moro complet est observé. Cette réaction vestibulaire est présente chez 80 % des prématurés de 30 semaines post-conceptionnelles.

Réponses vestibulaires chez le nouveau-né

Il n'existe, à notre connaissance, qu'un seul travail qui ait étudié l'influence de la sensibilité vestibulaire sur la régulation du tonus postural chez le nouveau-né : la recherche d'Antonova et Vakhrameeva (1973) qui teste le *réflexe de Hoffman (H-reflex)*. Des nouveau-nés en état de veille attentive ont été suivis durant les six premiers jours de vie. La stimulation vestibulaire a été créée en déplaçant les sujets d'une position horizontale à une position semi-verticale (52 degrés par rapport à l'horizontale). Le réflexe monosynaptique de Hoffman était provoqué par une légère stimulation électrique. Le tonus musculaire était enregistré par électromyographie. Les résultats peuvent être résumés de la façon suivante : à un jour de vie, seule une influence vestibulo-spinale inhibitrice est observée ; dès le deuxième jour de vie, un effet facilitateur ou inhibiteur est observable.

Un nystagmus *post-rotatoire*, induit par une brusque décélération suivant une dizaine de rotations à vitesse constante, est observé chez 100 % des nouveau-nés de 3 heures à 10 jours. Chez la grande majorité de nouveau-nés, une forme imparfaite de nystagmus vestibulaire *per-rotatoire* est également observable. Cependant, le nystagmus vestibulaire *per-rotatoire* disparaît en cas d'anesthésie maternelle antérieure à l'accouchement, d'anoxie néonatale, d'un taux trop élevé de bilirubine ou en cas de troubles neurologiques attestés. Dès l'âge de 3 mois, le nystagmus vestibulaire est similaire à celui observé chez l'adulte (Ornitz, 1983). Il est intéressant de noter, à ce propos, un effet similaire au niveau du *réflexe vestibulo-oculaire* : ce n'est qu'à l'âge de 3 mois que cette réponse devient comparable à ce qu'elle est chez l'adulte. C'est également à cet âge de 3 mois que la fixation visuelle d'une cible, se déplaçant en phase avec la tête du sujet, entraîne une disparition du réflexe vestibulo-oculaire.

Le développement postnatal des réponses vestibulo-oculaires

Le développement postnatal du nystagmus vestibulaire per-rotatoire est le suivant : sa fréquence augmente progressivement entre la naissance et l'âge de 7 mois. Jusqu'à 4 mois environ il n'y a que peu de déviations oculaires compensatrices des yeux. De 4 à 7 mois apparaissent de lentes oscillations conjuguées des deux yeux. A partir de 7 mois, on observe des oscillations des yeux moins importantes en amplitude et de fréquence plus élevée qui s'apparentent vraisemblablement à la composante rapide du nystagmus vestibulaire. Aucune relation développementale n'est trouvée pour la fréquence du nystagmus post-rotatoire. En revanche, l'amplitude du nystagmus augmente de la naissance jusqu'à 7 mois, pour la réponse mesurée durant la stimulation vestibulaire comme pour la réponse observée après la décélération. De 7 à 24 mois, les réponses vestibulo-oculaires restent stables (Eviatar et Eviatar, 1978).

Le développement de la sensibilité aux accélérations

Différentes recherches ont étudié la sensibilité du bébé à des *accélérations angulaires sinusoïdales* : le seuil de sensibilité vestibulaire (mesuré par le nystagmus) diminue de $10^\circ/\text{sec}^2$ à l'âge de 2 mois jusqu'à une valeur de $4^\circ/\text{sec}^2$ pour les enfants de 5 ans. La sensibilité passe ensuite de 4 à $2^\circ/\text{sec}^2$ entre 5 et 12 ans. Lorsque des stimulations vestibulaires *trapézoïdales*, comportant une accélération, une phase de vitesse constante et une décélération, sont utilisées, la latence, l'amplitude et la vitesse des différentes phases du nystagmus vestibulaire diminuent, d'abord rapidement entre la naissance et la fin de la première année, puis progressivement jusqu'à l'adolescence. La fréquence du nystagmus augmente en fonction de l'âge des sujets. La durée de la réponse est plus courte entre la naissance et 12 mois mais ne se modifie plus après cet âge.

Par une technique de recueil des déplacements antéro-postérieurs de la tête, nous avons été parmi les premiers (Jouen, 1986) à avoir testé la sensibilité à des *accélérations linéaires* et montré que les bébés de 2, 3 et 4 mois sont sensibles à des accélérations linéaires sagittales aussi faibles que 0,022 g. En utilisant une stimulation linéaire *horizontale* (la translation antéro-postérieure ou postéro-antérieure d'une plate-forme) il a été montré que dès 15 mois les réponses vestibulo-spinales, mesurées par électromyographie, sont similaires à celles observées chez l'adulte. Ces travaux ont été récemment repris par Woollacott (1988, 1993). Les résultats indiquent clairement qu'avant le contrôle de la station assise (vers 6 mois), les réponses musculaires à ce type de stimulation vestibulaire sont inorganisées et variables. Elles présentent en outre un haut degré de coactivation entre paires de muscles antagonistes. En revanche dès que le bébé maîtrise la station assise, les réponses musculaires présentent une similitude impressionnante avec ce qui est observé chez l'adulte en position érigée.

LE DÉVELOPPEMENT DES RÉPONSES ANTIGRAVITAIRES

Dès le début du siècle, les travaux chez l'animal ont insisté sur l'étroite relation qu'entretient le système labyrinthique

avec les systèmes proprioceptifs et extéroceptifs comme la vision. On peut distinguer différentes réponses qui sont déterminées conjointement par la sensibilité vestibulaire et la proprioception. Les *réflexes de Landau et de Moro* sont un bon exemple de ces réactions antigravitaires précoces qui, observables chez le fœtus, le prématuré et le nouveau-né à terme, sont amenées à disparaître progressivement au cours des premiers mois de vie. Eviatar et Eviatar (1978) ont mis en évidence sous le terme de *réaction à l'accélération verticale* une réponse qui s'apparente à ce type de réponses réflexes. Parallèlement à la disparition progressive des réponses réflexes se mettent en place progressivement les réponses de *redressement* qui, en étroite relation avec le développement tonico-postural, vont former l'essentiel des réactions d'équilibration antigravitaire du nourrisson. Un des plus caractéristiques de ces réflexes vestibulaires d'équilibration, qui apparaît précocement (2 à 3 mois), est celui du *redressement de la tête* obtenu par inclinaison latérale du corps (Peiper, 1963). Une stimulation otolithique rapide, par changement de position du corps, induit une réponse complexe mettant en jeu une composante vestibulo-oculaire : les *yeux de poupée*, et une composante vestibulo-céphalique : le redressement dans une position verticale de la tête. Lorsque le bébé contrôle la position assise sans aide, autour de 6 mois, apparaissent d'autres réactions de maintien de l'équilibre telle la *réaction d'arc-boutant* : si l'on incline latéralement un bébé placé en position assise, au redressement de la tête est associée une extension du bras visant à rétablir l'équilibre perturbé (Eviatar et Eviatar, 1978). Enfin, la *réaction parachute*, qui s'observe lorsque le bébé est en orthostatisme, est de même nature que les précédentes : une stimulation vestibulaire par poussée du corps induit un redressement de la tête et une extension protectrice des bras (Peiper, 1963 ; Eviatar et Eviatar, 1978). Woollacott, Debu et Mowatt (1987) ont également étudié les réactions posturales consécutives à une perturbation par inclinaison ou par translation du corps chez des bébés de 4 à 18 mois en utilisant des enregistrements électromyographiques des muscles de la nuque, du tronc et de l'abdomen. Les résultats de ce travail sont éloquentes. Les bébés de 5 à 6 mois, incapables de maintenir une posture assise de façon indépendante, présentent des réponses localisées uniquement aux muscles extenseurs et fléchisseurs de la nuque. De plus, dès l'âge de 4 mois, en absence de stimulation visuelle, les réponses musculaires sont cohérentes dans 100 % des cas avec le sens de la stimulation : quand le support se déplace vers l'arrière et que le bébé s'incline vers l'avant, les muscles de la nuque sont activés pour compenser l'inclinaison. Mais à cet âge la vision n'est pas nécessaire : lorsque les informations visuelles sont présentes, les réponses sont appropriées dans 60 % des cas seulement. A l'inverse, à 18 mois, les réponses à la perturbation s'observent au niveau des muscles de la nuque et du tronc et sont congruentes avec la perturbation, que la vision soit présente ou pas.

Les *réactions de placement visuel* se caractérisent par une extension des bras lorsque le bébé est doucement approché d'une surface. Les travaux de neurophysiologie qui ont étudié le placement visuel chez l'animal ont montré qu'une privation sensorielle (visuelle ou vestibulaire) entraînait la disparition de ce comportement. Cette réponse, qui n'a été que peu étudiée chez le bébé, pose des problèmes quant à sa nature même. Pour Paine et Oppé (1966) la réponse de

placement n'est pas sous contrôle visuel, puisque la suppression (temporaire ou définitive comme dans le cas de la cécité, par exemple) des informations visuelles ne l'altère pas. Cependant Bullinger et Mellier (1988) ne l'ont pas observée dans leur population de bébés aveugles. D'après leurs travaux, cette réponse n'apparaît que si une suppléance sensorielle (comme un guide ultrasonique) est offerte au nourrisson déficient visuel. Chez le bébé de 8 à 11 mois, la réponse de placement visuel disparaît lorsqu'elle est sollicitée dans la partie optiquement profonde du dispositif de la *falaise visuelle*. Cette recherche indique clairement que la stimulation vestibulaire n'est pas suffisante pour induire la réaction. La réaction parachute a également été étudiée chez le nourrisson de 3 à 18 mois en faisant varier la présence ou l'absence d'informations visuelles, la taille du champ visuel stimulé et l'intensité de la stimulation vestibulaire. La réponse parachute est présente à l'âge de 4 mois et se développe progressivement jusqu'à 9 mois, où elle est complète et reste ensuite stable. La réponse n'est pas présente, ou est incomplète, en cas de suppression des informations visuelles et lorsque la stimulation vestibulaire est de faible intensité. Elle est entièrement présente lorsque le champ visuel du bébé est totalement occupé par le stimulus visuel. Ces résultats suggèrent donc que la réaction parachute serait une réponse visuo-vestibulaire se développant sous contrôle visuel durant la première année de la vie.

STIMULATIONS VESTIBULAIRES ET DÉVELOPPEMENT

Tout un courant de recherches s'est penché sur l'effet des stimulations vestibulaires sur la réactivité du nouveau-né. L'influence de la sensibilité vestibulaire sur les activités perceptives et motrices du nourrisson a également fait l'objet de recherches récentes.

Stimulations posturales et développement moteur

L'influence bénéfique des stimulations vestibulaires précoces sur le développement posturo-moteur a été étudiée chez différentes populations de bébés (*cf.* Ornitz, 1983, pour une synthèse). La relation entre le retard d'apparition de certaines formes de comportements vestibulaires spontanés et les retards généraux du développement moteur, observés chez le bébé déficient, suggère l'existence d'un lien direct entre fonctions vestibulaires et développement moteur. Cependant on n'a pas trouvé, chez des bébés élevés en institution — classiquement réputés comme présentant des retards généraux de développement —, de relation entre stimulation vestibulaire et développement moteur, tel qu'il peut être évalué par les échelles de Gesell.

Les différents types de stimulations vestibulaires, tactiles et kinesthésiques, préconisés dans les programmes de stimulation compensatoire pour le bébé prématuré, ont été répertoriés par Bloch, Mellier et Brion (1984). Dans les premiers travaux, effectués avant les années 80, le bercement direct de l'enfant par l'adulte est le plus couramment utilisé. Les résultats de ces différentes recherches font généralement état de progrès globaux du gain pondéral et des scores à différentes échelles de développement. Des prématurés ont été

soumis à des séances quotidiennes de stimulation sinusoïdale dès le 5^e jour postnatal. Ces bébés, testés ensuite à l'âge de 36 semaines post-conceptionnelles, manifestent une nette augmentation des performances auditives, visuelles et motrices par rapport à celles d'une population témoin non stimulée. Les matelas d'eau, oscillants ou non, ont également été testés : les stimulations vestibulo-kinesthésiques provoquées par ce dispositif ont une influence sur l'organisation des phases de sommeil du bébé prématuré et peuvent induire une diminution de la fréquence des apnées et de la bradycardie. Une faible oscillation (20°), de basse fréquence (0,21 Hz), d'un matelas d'eau induit, chez le prématuré, une amélioration des capacités visuelles et auditives, une diminution de l'hypertonie, une modification de la motilité et des transformations des patterns de mouvements spontanés. Clark, Kreutzberg et Chee (1977) sont les premiers à avoir testé chez 13 bébés de 3 à 13 mois l'effet de stimulations vestibulaires sur différents réflexes posturaux et plusieurs items moteurs. Chaque sujet recevait, durant 4 semaines, 16 séances de 10 rotations dans l'obscurité à une vitesse constante de 100°/sec. Pour le groupe témoin (13 bébés appareillés en âge mais non stimulés), l'augmentation des performances, mesurée par un pourcentage global, est de 3,8 % pour les réflexes posturaux et de 6,7 % pour les items psychomoteurs après une période de 4 semaines. Ces chiffres sont respectivement de 12,2 % et de 27,4 % pour le groupe expérimental.

Stimulations vestibulaires et vigilance

L'importance des stimulations vestibulaires dans le contrôle des états comportementaux a été soulignée par différentes recherches. Une heure de bercement rythmique quotidien induit chez le prématuré un état d'hyper-relaxation, se traduisant par une augmentation de la fréquence de fermeture des yeux. Chez le nouveau-né, les stimulations vestibulo-kinesthésiques provoquées par une accélération linéaire verticale réduisent significativement la durée des pleurs. A 2 mois, après 15 minutes de bercement sinusoïdal latéral à 0,9 Hz, les bébés pleurent moins et s'endorment plus rapidement. De façon générale, à une accélération vestibulaire maximale en termes de fréquence et d'amplitude correspond le niveau de vigilance le plus bas.

L'étude de la sensibilité vestibulaire durant le sommeil a essentiellement porté sur la fréquence des mouvements rapides des yeux (REM) pour deux raisons. Les travaux sur l'animal ont mis en évidence l'importance des noyaux vestibulaires dans le contrôle de cette motricité oculaire durant le sommeil. D'autre part, chez l'adulte, certaines pathologies des noyaux vestibulaires peuvent supprimer les phases REM du sommeil paradoxal. Bernuth et Prechtel (1969) ont enregistré l'activité oculo-motrice chez 6 nouveau-nés de 4 à 7 jours en réponse à une stimulation vestibulaire sinusoïdale dont les accélérations variaient entre 68,4 et 286,3°/sec². Durant les phases d'éveil et de sommeil paradoxal, une accélération vestibulaire maximale induit l'amplitude maximale du réflexe vestibulo-oculaire. La déviation compensatrice des yeux est en parfaite opposition de phase (180°) avec la stimulation vestibulaire. La durée des différentes phases de sommeil n'est pas influencée par les stimulations vestibulaires, mais chez le nouveau-né, en cas de stimulation

labyrinthique, la fréquence des mouvements rapides des yeux se trouve diminuée durant les phases de REM. Enfin, durant les phases de sommeil régulier, le réflexe vestibulo-oculaire est pratiquement inexistant. Ces résultats laissent donc penser que chez le nouveau-né le système vestibulaire serait plus actif durant les périodes d'activité phasique du sommeil irrégulier.

Les modifications du rythme cardiaque sont généralement considérées comme un bon indice des changements de vigilance du bébé. Les variations cardiaques, en réponse à des stimulations vestibulaires, tactiles et auditives, ont été étudiées par Pomerleau et Malcuit (1983) durant les phases d'éveil et de sommeil chez des nouveau-nés à terme. Pendant le sommeil, une stimulation vestibulo-tactile entraîne une brève mais importante décélération cardiaque suivie d'une accélération du rythme durant environ 6 secondes. En phase d'éveil, la réponse est différente selon le niveau d'activité motrice du bébé. Lorsque le nouveau-né présente, lors du début de la stimulation vestibulaire, une réduction de son niveau d'activité motrice, une diminution du rythme cardiaque est observée. A l'inverse, à une augmentation de l'activité motrice globale est associée une augmentation du rythme cardiaque.

Stimulations vestibulaires et traitement perceptif

Plusieurs études ont tenté de dissocier activités sensorielles et états comportementaux en analysant l'influence des stimulations labyrinthiques sur les réponses perceptives présentes dès la naissance (cf. Jouen et Bloch, 1981, pour une synthèse). Seule la modalité visuelle semble avoir été étudiée. L'attention visuelle de bébés de 6 à 30 jours élevés en Institution et soumis à une stimulation vestibulaire a été comparée avec celle de 10 bébés de même âge élevés dans les mêmes conditions et non soumis à la stimulation vestibulaire. L'attention visuelle des bébés stimulés est significativement plus importante que celle du groupe témoin. Lorsque des nouveau-nés passent du sommeil à la veille, seule une stimulation vestibulaire (passage du décubitus dorsal à une position semi-assise) induit une augmentation de la vigilance et de l'attention visuelle. Pour un nouveau-né éveillé, une stimulation vestibulaire est un meilleur stimulus que la stimulation tactile pour favoriser les mécanismes de l'attention. Le passage d'une position en décubitus à une position assise n'a que peu d'effet sur le niveau de vigilance mesuré par la durée d'ouverture des yeux. Pour un nouveau-né en veille diffuse, un positionnement semi-vertical du corps augmente significativement la qualité du comportement visuel du bébé mesuré par ses capacités à fixer et à poursuivre un stimulus en mouvement. Ce résultat a été confirmé en comparant la poursuite visuelle chez des nouveau-nés qui sont soit placés dans une position (verticale ou horizontale) restant stationnaire tout au long de la session expérimentale, soit soumis à une stimulation vestibulaire (déplacements sinusoïdaux du corps). Les bébés stimulés présentent une poursuite visuelle plus efficace que les bébés non stimulés.

L'autostimulation vestibulaire

De nombreuses études font état de comportements spontanés qui engagent le bébé dans une activité d'autostimulation

vestibulaire, sans que l'on connaisse exactement la fonction d'une telle activité dans le développement. Bien que ces comportements spontanés, qui sont essentiellement des balancements rythmiques du corps ou de la tête, semblent plus fréquents chez les bébés élevés en Institution, ainsi que chez le jeune enfant autiste, leur présence transitoire au cours du développement normal est signalée dans différents travaux. Thelen (1979) a mené une étude longitudinale sur 20 bébés normaux durant la première année de vie. Elle observe que 18 des 20 bébés étudiés présentent une activité rythmique de balancement du corps lorsqu'ils sont en position assise ou à quatre pattes vers 6 mois. Si les données concernant la fréquence du balancement du corps varient en fonction des études, il y a un accord général sur la date d'apparition de cette activité au cours du développement : autour de l'âge de 6 mois chez le bébé normal et le bébé élevé en Institution et vers 12 mois pour les populations pathologiques (infirmités motrices d'origine cérébrale et déficiences intellectuelles). Ce retard n'est d'ailleurs pas uniquement limité aux seuls comportements vestibulaires spontanés, mais se retrouve pour d'autres formes d'activités rythmiques telles que la succion ou les mouvements de pédalage des jambes, témoignant ainsi d'un décalage général dans le développement de ces sujets. Chez le bébé normal, ces différentes formes de comportements à dominante vestibulaire apparaissent également de façon conjointe avec d'autres activités rythmiques ou stéréotypées (Thelen, 1979). Les activités rythmiques de mouvements de tête ont également donné lieu à de nombreuses observations de nature diverse. La présence, durant les débuts du développement, de formes générales d'activités rythmiques et la prévalence de comportements d'autostimulation vestibulaire ont conduit certains auteurs à faire l'hypothèse que l'autostimulation vestibulaire et, de façon plus générale, les stimulations labyrinthiques pourraient assurer un rôle fondamental de régulation et de modulation des différentes activités sensorielles et motrices observées chez le bébé (Ornitz, 1983). Cette hypothèse a également été avancée pour expliquer la fréquence importante de comportements à dominante vestibulaire que l'on note chez le nourrisson et l'enfant aveugle. Les informations vestibulaires suppléeraient à la vision déficiente ou absente.

CONCLUSION

Plusieurs points se dégagent de l'ensemble des recherches présentées dans cette synthèse. En premier lieu, le développement des réponses vestibulaires suit de près les différentes étapes du développement psychomoteur de l'enfant depuis la naissance jusqu'à l'acquisition de la station verticale et de la marche autonome. En second lieu, si la maturation fonctionnelle du système vestibulaire est achevée à la naissance, l'intégration des informations vestibulaires dans les processus de contrôle de la posture s'établit progressivement durant les premières années de la vie en suivant les différentes étapes du développement psychomoteur. Enfin, le système vestibulaire joue un rôle fondamental dans l'établissement de ces étapes psychomotrices. Ceci est attesté par deux types de résultats. Les premiers viennent de la

pathologie : les enfants déficients auditifs ou porteurs d'aréflexie vestibulaire bilatérale (Tzuzuku, 1992) présentent d'importants retards du développement psychomoteur. Les seconds sont issus des travaux portant sur les interactions visuo-vestibulaires chez le nouveau-né. Nous avons pu montrer récemment que les mécanismes vestibulaires et neuromusculaires qui vont régler finement la stabilité posturale sont présents dès la naissance et maintenus tout au cours du développement (Jouen, Gapenne et Lepecq, 1995 ; Gapenne et Jouen, 1995). On peut ainsi penser que le fonctionnement du système vestibulaire représente un invariant développemental qui, utilisé à chaque nouvelle étape du développement psychomoteur, permet l'intégration des différentes informations impliquées dans le contrôle postural et dans l'orientation spatiale.

RÉFÉRENCES

- [1] ANNIKO (M.) : « Embryonic development of vestibular sense organs and their innervation », in : R. Romand (ed.), *Development of Auditory and Vestibular Systems*, New York, Academic Press, 1983, pp. 375-423.
- [2] ANTONOVA (T.G.), VAKHRAMEEVA (I.A.) : « Vestibulospinal influences in early postnatal development », *Neurosciences and Behavioral Physiology*, 6, 1973, pp. 151-156.
- [3] BERNUTH (H.), PRECHTL (H.F.R.) : « Vestibulo-ocular response and its state dependency in newborn infants », *Neuropediatrics*, 1, 1969, pp. 11-24.
- [4] BLOCH (H.), MELLIER (D.), BRION (F.) : « Etudier et combattre les effets de la prématurité : revue critique des méthodes et des hypothèses », *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 4-2, 1984, pp. 101-126.
- [5] BULLINGER (A.), MELLIER (D.) : « Influence de la cécité congénitale sur les conduites sensorimotrices », *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 8, 1988, pp. 191-203.
- [6] CLARK (D.L.), KREUTZBERG (J.R.), CHEE (F.K.W.) : « Vestibular stimulation influence on motor development in infants », *Science*, 196, 1977, pp. 1228-1229.
- [7] EVIATAR (L.), EVIATAR (A.) : « Neurovestibular examination of infants and children », *Advances in Otorhinolaryngology*, 23, 1978, pp. 169-191.
- [8] GAPENNE (O.), JOUEN (F.) : « Effect of visual input on head's spontaneous oscillations in newborns », *Neuro Reports* (soumis pour publication), 1995.
- [9] HOSHINO (T.) : « Scanning electron microscopic observation of the fetal labyrinth vestibule », *Acta Laryngologica*, 93, 1982, pp. 349-354.
- [10] JOUEN (F.) : « La contribution des récepteurs visuels et labyrinthiques à la détection des mouvements du corps propre chez le nourrisson », *Année Psychologique*, 86, 1986, pp. 169-192.
- [11] JOUEN (F.) : « Early visual-vestibular interactions and postural development », in : H. Bloch and B.I. Bertenthal (eds.), *Sensorimotor Organizations and Development in Infancy and Early Childhood*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990, pp. 199-215.
- [12] JOUEN (F.), BLOCH (H.) : « Le rôle des informations visuelles dans les premiers contrôles posturaux », *Année Psychologique*, 81, 1981, pp. 197-221.
- [13] JOUEN (F.), GAPENNE (O.), LEPECQ (J.C.) : « Optic flow sensitivity in neonates », *Child Development* (in press).
- [14] ORNITZ (E.M.) : « Normal and pathological maturation of vestibular function in the human child », in : R. Romand (ed.), *Development of Auditory and Vestibular Systems*, New York, Academic Press, 1983, pp. 479-536.
- [15] PAINE (RS), OPPÉ (TE) : « Neurological examination of children », Lavenham, The Lavenham Press, 1966.
- [16] PEIPER (A.) : « *Cerebral Function in Infancy and Childhood* », New York, Consultants Bureau, 1963.
- [17] POMERLEAU (A.), MALCUIT (G.) : *L'enfant et son environnement*, Bruxelles, Mardaga, 1983.
- [18] THELEN (E.) : « Rythmical stereotypies in normal human infants », *Animal Behavior*, 27, 1979, pp. 699-715.
- [19] TZUZUKU (T.), KAGA (K.) : « Delayed motor function and results of vestibular function tests in children with inner ear anomalies », *International Journal of Pediatric Otolaryngology*, 23, 1992, pp. 216-268.
- [20] WOOLLACCOTT (M.H.) : « Posture and gait from newborn to elderly », in B. Amblard, A. Berthoz, F. Clarac (eds.), *Posture and Gait : Development, Adaptation and Modulation*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1988, pp. 3-12.
- [21] WOOLLACCOTT (M.H.) : « Early postnatal development of posture control : normal and abnormal aspects », in : A.F. Kalverboer, B. Hopkins, R. Geuze (eds.), *Motor Development in Early and Later Childhood : Longitudinal Approaches*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993, pp. 89-108.
- [22] WOOLLACCOTT (M.H.), DEBU (M.), MOWATT (M.) : « Neuro-muscular control of posture in the infant and the child : is vision dominant ? », *Journal of Motor Behavior*, 19, 1987, pp. 167-186.

Développement du système visuel du nouveau-né

I. CARCHON

Laboratoire de psychobiologie de développement, Paris

RÉSUMÉ : Développement du système visuel du nouveau-né.

Le système visuel du bébé à la naissance est loin d'être achevé. Les différentes structures anatomiques apparaissent à des dates spécifiques du développement, soit avant la naissance, soit après. Les mécanismes optiques qui en découlent (accommodation et convergence) n'atteignent leur pleine efficacité qu'après deux à trois mois de vie. A la naissance, le fonctionnement oculomoteur est déjà bien organisé ; il a pour trait spécifique d'être plus saccadique que celui de l'adulte. Le champ visuel étant réduit, la détection de cibles et la capacité de poursuite ont une extension limitée. Mais le nouveau-né est cependant capable de faire des pauses du regard, de distinguer une forme sur un fond et de discriminer des formes et des couleurs. Son activité perceptive est donc loin d'être négligeable, et permet une prise d'information organisée du monde visuel.

Mots clés : Développement visuel — Seuil d'acuité — Fonctionnement oculomoteur — Perception de la forme

SUMMARY: The development of the ocular system in the newborn child.

Visual system is not mature at birth. Different structures appear at various dates in development, either before or after birth. Optical mechanisms (accommodation and convergence) are achieved around 2-3 months of age. At birth, oculomotor functioning is already well defined, and it is characterized by jerky eye movements (saccades). Visual field is reduced and in consequence, detection and pursuit tasks are limited in extension. However, the newborn is able to fixate, to segregate a form on a ground, and to discriminate both form and color. Visual activity in newborn is far from negligible and allows processing organized information in the visual world.

Key words: Visual development — Acuity — Oculomotor functioning — Perception form

Le système visuel du bébé à la naissance est loin d'être achevé. Cette immaturité apparaît à tous les niveaux : de l'appareil optique... aux structures corticales. Aussi, l'ensemble des compétences visuelles du bébé s'en trouvent limitées (contraintes des mécanismes optiques et du développement neurophysiologique) et, de ce fait, les perceptions du nouveau-né et du nourrisson, qui s'avèrent pourtant déjà bien organisées, présentent des traits spécifiques.

L'APPAREIL OPTIQUE

Les structures du système visuel sont les dernières modalités sensorielles à se mettre en place au cours de la gestation. L'œil se repère par échographie vers la 12^e semaine de gestation, mais ce n'est que plus tard que l'on réussit à observer les mouvements oculaires : vers la 16^e semaine

pour les mouvements lents et vers la 23^e pour les mouvements oculaires rapides (de Vries, Visser et Prechtl, 1984). D'un point de vue morphologique, la taille de l'œil varie peu ; le diamètre antéro-postérieur se situe autour de 16,5 mm à la naissance (Bromdahl, 1979) et atteint de 23 à 25 cm chez l'adulte. Son poids sera multiplié par trois de la naissance à l'âge adulte (Fielder, 1986).

Les milieux aqueux n'ont pas encore la transparence de l'état adulte. Le cristallin encore rigide est alors limité pour modifier son rayon de courbure. En conséquence l'accommodation, phénomène qui permet d'obtenir une image nette quelle que soit la distance (par modification de la courbure du cristallin), n'est pas réalisée à la naissance. Le cristallin deviendra souple et contractile à 3 mois. A 2 mois déjà l'accommodation s'améliore nettement. Banks (1980) a précisé que l'accommodation est fonction de la distance de présentation du stimulus. En effet, l'accommodation s'ajuste dans la direction de la cible si celle-ci se trouve à une

distance comprise entre 20 et 75 cm. De 3,5 à 4 mois, la précision de l'accommodation serait maximale et meilleure que celle de l'adulte car elle permettrait au bébé de voir nets des objets situés à 5 cm. Après 4 mois, l'accommodation serait semblable à celle de l'adulte (Aslin, 1985).

Un autre mécanisme optique, qui n'est pas totalement achevé à la naissance, est celui de la *convergence binoculaire*. Chez l'adulte, le regard peut se centrer précisément sur un point de l'espace. La convergence binoculaire permet une projection de l'image du point fixé sur deux points « correspondants » de chaque rétine, engendrant alors la perception d'un relief. L'absence de convergence entraîne une vision dédoublée. Depuis de nombreuses années, on pensait qu'à la naissance la convergence binoculaire était très imparfaite, voire inexistante (Fonarev, 1966 ; cité par Vurpillot, 1972). Mais on sait pourtant aujourd'hui que la vision du nouveau-né n'est pas double. Un certain consensus sur la date de maturation de la binocularité est apparu : elle serait convenable à partir de 3 mois (Atkinson, Braddick, 1976 ; Atkinson, Braddick, 1989).

MATURATION DES STRUCTURES ASPECTS NEUROPHYSIOLOGIQUES

De la rétine jusqu'aux structures corticales, les aspects maturationnels conditionnent la vision du nouveau-né.

L'une des principales caractéristiques de la *rétine* à la naissance est l'existence d'une plus grande maturité de la région périphérique par rapport à la région centrale (Abramov, Gordon, Hendrickson, Hainline, Dobson, Labossière, 1982 ; Banks, Salapatek, 1983). Ainsi, à la naissance, la fovéa est plus large, c'est-à-dire moins bien différenciée ; elle mesure environ 1 000 μ de diamètre alors que sa dimension adulte est de 650 à 700 μ . Deux autres raisons expliquent l'immaturité de la rétine fovéale : une faible densité des cônes (18 cônes pour 100 μ à 1 semaine comparé à 42 cônes/100 μ chez l'adulte), et également une petite taille et une forme trapue (3 ou 4 couches de cônes très minces) (Banks, Bennett, 1988). Cette immaturité n'est pourtant pas absolue : les différentes couches de la rétine sont identifiables entre le 6^e et le 8^e mois post-conception. C'est principalement durant les trois premiers mois de la vie que la différenciation de la fovéa s'effectue (Banks, Salapatek, 1983). A 4 mois postnatal, les cônes sont bien effilés et en plus forte densité, mais n'ont pas encore complètement atteint la taille adulte puisque le développement se termine autour du 45^e mois (figure 1, d'après Banks et Bennett, 1988).

Le *nerf optique* du nouveau-né, plus fin et plus court que celui de l'adulte (Maurer, 1975), commence sa myélinisation entre le 6^e et le 8^e mois *in utero* (Magoon, Robb, 1981). La maturation se poursuit après la naissance, en s'accéléralant dans les quatre premiers mois, avec des dates d'achèvement variant selon les auteurs : 3 semaines (Last, 1968), 1 mois (Nakayama, 1968), 10 semaines (Mann, 1964), 3 mois (Yakovlev, Lecours, 1967), 4 mois (Duke-Elder, Cook, 1963) et 2 ans (Atkinson, 1984).

Le *corps genouillé latéral*, premier noyau thalamique à apparaître, double de volume de la naissance à 6 mois (Huttenlocher, de Courten, Garey, van Derloos, 1982 ; Johnson, 1991). La structure en couches (deux magnocellulaires

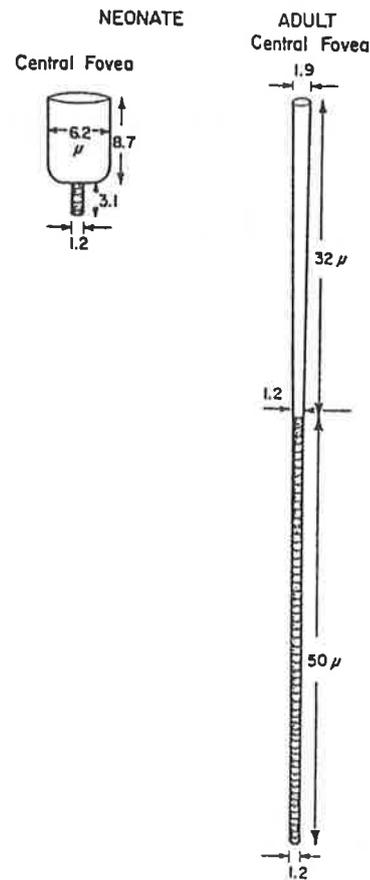


Figure 1 : Représentation d'un cône adulte et d'un cône de nouveau-né (dimensions et formes) d'après Banks et Bennett, 1988.

ventrales et quatre parvocellulaires dorsales) est observable à la 24^e semaine de vie fœtale (Hitchock, Hickey, 1980) et la plupart des cellules sont constituées à la naissance mais sont de petite taille (de Courten, Garey, 1982 ; Banks, Salapatek, 1983). Elles possèdent un excédent de synapses au niveau des dendrites et du soma ; un maximum est atteint à 4 mois, suivi d'une régression pour atteindre le niveau adulte à 9 mois. Les neurones de la couche parvocellulaire se développent très rapidement de la naissance à 6 mois, puis plus lentement jusqu'à 12 mois. Les neurones de la couche magnocellulaire croissent plus lentement et n'atteignent leur état d'adulte que vers 2 ans (Hitchock et al. 1980).

Dès la 24^e semaine de gestation, la structure en couches du *colliculus supérieur* est observable (Hitchock et al. 1980). Les différents types de neurones sont identifiables à partir de la 35^e semaine de vie fœtale (de Courten, Garey, 1981, 1982). Le phénomène de surproduction d'épines dendritiques à 4 mois postnatal diminue jusqu'à l'âge de 9 mois. La taille adulte de cette structure est atteinte dès 6 mois. La *voie rétinocolliculaire* se myélinise à partir de la 8^e semaine de gestation et se termine vers 3 mois après la naissance. En revanche, la myélinisation de la *voie rétinocorticale* débute à la naissance et s'achève vers le 4^e mois. L'ensemble des données physiologiques sur la maturation des structures visuelles corticales indique que ce sont les couches les plus profondes qui se développent avant les couches les plus superficielles. La taille de l'aire 17 aug-

mente huit fois de volume entre la 28^e semaine fœtale et le 4^e mois postnatal (de Courten, Garey, 1983 ; Johnson, 1991). La multiplication cellulaire se retrouve au niveau synaptique puisque de 28 semaines à la naissance le nombre de synapses double, avec un maximum autour de 8 mois (période de synaptogenèse intense). Ce n'est que vers 1 an qu'une diminution progressive des contacts synaptiques apparaît, se poursuivant jusqu'à l'âge de 11 ans (perte progressive de plasticité cérébrale). Quel que soit l'âge, les neurones de la couche IVc (le site des afférences du corps genouillé latéral) sont plus développés que les neurones des autres couches. Ainsi, anatomiquement, le cortex visuel primaire du nouveau-né est constitué à la naissance. Les zones associatives du cortex temporal ne commencent leur myélinisation qu'après la naissance et la poursuivent à un rythme plus lent au-delà des 10 premiers mois de la vie (Bronson, 1974).

ASPECTS FONCTIONNELS

Les données physiologiques incitent à penser que les bases de la vision du nourrisson, comparée à celle de l'adulte, sont rudimentaires. Mais les données comportementales viennent contredire ces suppositions.

La sensibilité du nouveau-né se mesure notamment par le *seuil d'acuité visuelle* qui se définit comme la plus petite distance entre deux points que le sujet est juste capable de distinguer en vision fovéale. Différentes méthodes ont été mises au point pour tester ce seuil d'acuité (Dobson, Teller, 1978 ; Banks, Salapatek, 1983 ; Teller, 1981) :

— L'une d'entre elles consiste à présenter un réseau de fréquence spatiale en mouvement (succession de bandes alternativement sombres et claires) afin d'observer de la part du nourrisson un *nystagmus opto-cinétique* (mouvement lent des yeux dans le sens du déplacement du stimulus, suivi par une saccade rapide dans le sens inverse). En variant le nombre de cycles par degré d'angle visuel (soit la largeur des bandes du réseau), les auteurs ont déterminé la plus petite valeur angulaire (correspondant au seuil d'acuité visuelle) produisant un nystagmus. Fantz, Ordly et Udelf (1962) observent un seuil d'acuité de l'ordre de 2 cpd à 2 semaines, de 6 cpd à 5,5 mois et de 60 cpd à 30 mois.

— Une deuxième technique, celle du *choix préférentiel* (PL), ou celle plus récente du *regard préférentiel à choix forcé* (FPL : *forced-choice preferential looking*) (Fantz et al., 1962 ; Dobson, Teller, 1978 ; Teller, 1985) repose sur l'hypothèse générale que le bébé regarde davantage un pattern hétérogène qu'une plage homogène. L'enfant est placé face à un dispositif constitué d'une plage homogène et un réseau de fréquence spatiale de même luminance. L'expérimentateur, qui ne connaît pas l'emplacement effectif des patterns, doit juger, d'après la localisation du regard de l'enfant, de l'emplacement de la cible. On enregistre principalement le temps et la durée de fixation sur chaque stimulus. Avec la technique du regard préférentiel à choix forcé, un seul pattern est présenté à droite ou à gauche, et l'expérimentateur mesure les temps de fixation cumulés sur chacun des deux stimuli.

L'acuité visuelle, estimée par cette méthode, est de 1,3 cpd après la naissance et de 5 cpd vers 6 mois (Bongrand, Gay-Meret, Grochowicki, Vital-Durand, 1983 ; Atkinson, 1984).

Plus récemment, et de façon plus systématique, Vital-Durand (1992) obtient un seuil d'acuité proche de 1 vers 2 semaines.

Très récemment, Buquet, Desmidt, Charlier, Querleu (1992) ont mis au point une *nouvelle technique d'enregistrement des mouvements des yeux* dite de *photo-oculographie* entièrement automatisée qui permet de mesurer les déplacements relatifs d'une source lumineuse réfléchie sur la cornée et de l'image de la pupille (association de la technique du reflet cornéen et d'une détection automatique de la position pupillaire). Cette technique, appliquée aux mesures d'acuité avec des stimuli variés (réseau de fréquence spatiale) situe l'acuité de nouveau-nés de 1 à 9 jours autour de 0,2 cpd.

C'est en fonction de l'acuité visuelle que s'effectue le traitement de l'image fovéale. Les messages issus de la rétine centrale, passant par le corps genouillé latéral pour atteindre le cortex visuel primaire, vont permettre une analyse détaillée du stimulus regardé. Cette voie *rétino-colliculaire* correspond donc au *système de codage, d'analyse et de reconnaissance* des stimuli complexes. Ce système intervient également dans le *contrôle volontaire* des mouvements des yeux et dans la *capacité de poursuite*.

Fonctionnement oculomoteur-exploration visuelle

Pour pouvoir traiter l'information visuelle, nous avons besoin de diriger le regard vers les sources de stimulation. Ainsi, lorsqu'un stimulus apparaît dans le champ visuel, une ou plusieurs saccades (mouvement rapide des yeux de type balistique) peuvent être effectuées, et aboutir à la fixation de ce stimulus. De telles saccades existent dès le plus jeune âge. Bien évidemment, en raison de la faiblesse de l'acuité visuelle, les bébés détectent des stimuli proches et non des objets éloignés. Les nourrissons effectuent des saccades qui sont moins précises que celles de l'adulte : toujours dans la bonne direction, mais en revanche n'atteignant pas systématiquement leur objectif. Les vitesses de ces saccades sont beaucoup plus lentes que celles de l'adulte, avec une vitesse maximale de 130°/sec alors qu'elle se situe autour de 300°/sec chez l'adulte.

Le développement de la taille du *champ visuel* contraint également les performances visuelles du nourrisson. Le champ binoculaire des nourrissons a la même forme que celui de l'adulte, mais il est plus petit. Avant 2 mois, il mesure un tiers de celui de l'adulte. Plus concrètement, cela signifie qu'un nouveau-né fixant un point a la possibilité de percevoir l'apparition d'un deuxième stimulus si celui-ci se trouve à moins de 25 cm sur sa droite ou sur sa gauche, et à moins de 9 cm au-dessus ou au-dessous de sa ligne du regard. La taille augmente progressivement avec l'âge et à 10 mois elle est similaire à celle d'un adulte (Figure 2, d'après Mohn et van Hof-van Duin, 1986).

Les mouvements oculaires saccadiques attestent que le bébé a vu quelque chose mais ne renseignent en rien sur la nature de cette perception. L'étude des détections de cibles périphériques peut apporter des données sur les capacités discriminatives : attestant que la région périphérique est plus mature que la région centrale, Maurer, Clarke et Lewis (1986) ont montré que des bébés de 3 à 4 mois étaient capables de discriminer des stimuli présentés en périphérie. La nature de l'exploration visuelle d'un pattern ou d'une scène évolue au cours du développement. Ainsi, certaines

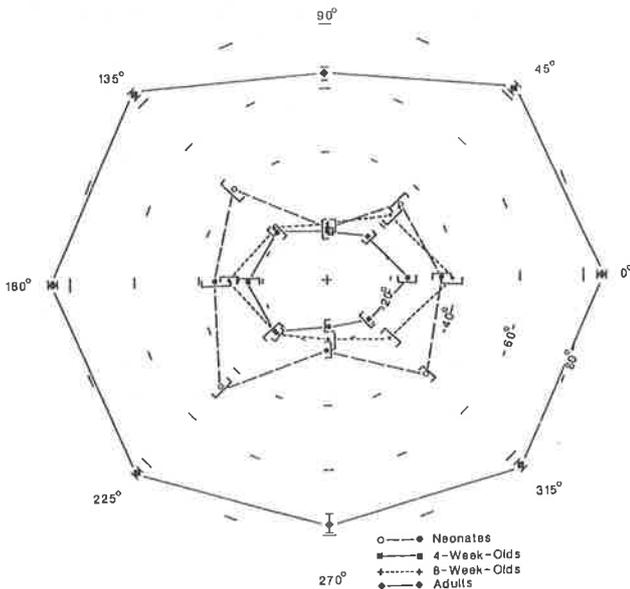


Figure 2 : Représentation de la taille du champ visuel d'après les résultats de Mohn et van Hof-van Duin (1986).

recherches montrent que les nouveau-nés se focalisent essentiellement sur les contours ou sur une caractéristique externe du stimulus. Cet effet d'extériorité (*externality effect*) persiste jusqu'à 2 mois. Ainsi, les nouveau-nés préféreraient comme stimulus un carré (quatre côtés et quatre angles) plutôt qu'une ligne. Après 2 mois, l'exploration visuelle devient plus large, c'est-à-dire porte à la fois sur des éléments internes et externes d'une figure, et par conséquent la discrimination devient meilleure (Salapatek, 1975 ; Bushnell, Gerry, Burt, 1983). Pourtant, cet effet d'extériorité ne paraît pas si évident puisqu'une sensibilité à l'organisation de traits internes au stimulus apparaît dans de nombreuses recherches. Ainsi, Antell et Caron (1985) ont souligné chez des nouveau-nés la capacité de discriminer une différence de relations spatiales entre deux formes géométriques simples. La préférence pour des dessins de visages ordonnés plutôt que désordonnés (Fagan, 1976), une capacité de discrimination d'expressions faciales (Field, Woodson, Greenberg, Cohen, 1982) attestent également de cette capacité précoce à discriminer des éléments internes au stimulus.

Capacité de poursuite

La faible acuité et la taille réduite du champ visuel entraînent des caractéristiques spécifiques de l'activité de poursuite. Dès la naissance, le nouveau-né est capable de suivre un stimulus sous certaines conditions de présentation. La plupart des auteurs (Aslin, Salapatek, 1975 ; Aslin, 1981 ; Regal, Ashmead, Salapatek, 1983 ; Roucoux, Culee, Rou-

coux, 1983) s'accordent pour dire que la nature de cette poursuite est essentiellement saccadique. Pourtant, Kremnitzer, Vaughan, Kurtzberg et Dowling, dès 1979, observent chez des nouveau-nés de 1 à 3 jours de brefs segments de poursuite douce pendant 15 % du temps de poursuite à condition que la vitesse du stimulus soit relativement lente, c'est-à-dire de l'ordre de 15°/sec. Cette proportion est optimale pour des vitesses de cible entre 9°/sec et 14°/sec, et diminue pour des vitesses supérieures. Plus tard, Roucoux, Culee et Roucoux (1983), en utilisant des vitesses de présentation semblables (11°/sec) montrent clairement chez des bébés de 5 semaines l'existence d'une poursuite lente pendant 100 % du temps durant lequel ceux-ci font attention à la cible. Très récemment, et avec l'application de leur nouvelle technique de photo-oculographie (évoquée ci-dessus), Charlier, Buquet, Desmidt et Querleu (1993) montrent que 40 % des nouveau-nés effectuent de la poursuite douce avec une vitesse de déplacement du stimulus de 8°/sec. Également Carchon et Bloch (1993), avec des nouveau-nés et des nourrissons de 6 semaines, ont montré la présence importante de poursuite douce pour des vitesses de déplacement très basses (entre 6 et 10°/sec). Ainsi, le facteur vitesse de déplacement semble jouer un rôle considérable dans la nature de la poursuite.

Les caractéristiques de la poursuite visuelle, relativement bien connues avant 6 à 7 mois, n'ont fait l'objet que de très peu d'études pour des âges compris entre 7 et 18 mois. Aslin (1981) précise tout de même que vers 12 mois la poursuite douce devient systématique. En effet, après 18 mois, la nature de la poursuite visuelle est semblable à celle de l'adulte, pour n'importe quelles conditions de présentation. Il est important de préciser tout de même que, dans la réalité, les mouvements des yeux sont accompagnés d'une rotation simultanée de la tête qui permet conjointement d'assurer le point de fixation.

Perception de la forme

On sait depuis longtemps que, malgré les contraintes que nous venons de souligner, le nouveau-né est capable de distinguer un stimulus particulier d'un fond, ce qui constitue une des premières conditions de la perception. En effet, en 1963, Fantz avait montré que dès les premiers jours de vie le nouveau-né se montre capable d'établir une ségrégation figure-fond et qu'elle est optimale lorsqu'il s'agit d'un objet structuré sur un fond uniforme. D'une manière générale, il ne peut y avoir perception d'une forme ou d'une qualité d'objet que lorsqu'il y a une rupture physique dans le champ visuel : frontière, contraste... Un peu plus tard, Fantz, Fagan et Miranda (1975) ont précisé que les bébés regardent davantage une forme sur un fond que la présentation d'un fond seulement. Les temps de fixation s'ordonnent selon la complexité de l'objet. Cette préférence pour les objets structurés s'accompagne d'une préférence pour le symétrique, qui semble alors en accord avec les lois d'organisation de la *Gestalt* : les nourrissons préfèrent des patterns symétriques aux asymétriques (Bornstein, 1982) et les formes circulaires par rapport aux linéaires (Ruff, Birch, 1974). De plus, quand deux formes ont le même contenu et comportent la même quantité de détails, est préférée celle dont les éléments sont les plus grands.

Perception de la couleur

Le corrélat physique de la couleur est la longueur d'onde. Le domaine des longueurs d'onde visible chez l'homme est restreint puisqu'il varie de 400 nm à 780 nm environ et par conséquent l'homme ne peut percevoir les infrarouges (> 790 nm) ni les ultraviolets (compris entre 250 et 350 nm). Le problème majeur de la discrimination des couleurs chez l'enfant est le fait qu'il peut répondre sur la base de la brillance et non à la teinte proprement dite. Une technique largement utilisée est la présentation de deux longueurs d'onde identiques (par exemple une longueur d'onde correspondant au rouge et une seconde correspondant au jaune) où l'on fait varier de façon aléatoire le niveau de luminance d'une de ces deux teintes. Si une « préférence » de la part du bébé apparaît au travers des résultats, cela signifie que la discrimination a bien été faite sur la base de la teinte et non sur celle de la brillance (Bornstein, 1976). Ainsi, Adams (1987) a montré que les bébés de 3 mois discriminent des couleurs et, contrairement à l'adulte, préfèrent le rouge et le jaune (les longues longueurs d'onde) par rapport au bleu et au vert (les courtes longueurs d'onde). Avant 3 mois, la discrimination semble difficile, mais ces très jeunes bébés préfèrent des stimuli colorés plutôt que gris. Cette préférence précoce ainsi que l'augmentation des discriminations avec l'âge paraissent davantage liées à une maturation physiologique des aires visuelles corticales plutôt qu'à l'apprentissage (Teller, Bornstein, 1987).

CONCLUSION

A la naissance, le système visuel est certes loin d'être totalement achevé puisqu'il n'atteindrait sa pleine maturité qu'à l'âge de 10 ou 11 ans. En revanche, ses capacités fonctionnelles sont loin d'être négligeables.

En effet, aujourd'hui, le bébé n'est plus considéré comme une somme de réflexes, ou encore comme un bébé spinal. Tout au contraire, on sait qu'il est capable de diriger son regard, d'effectuer diverses réponses d'identification et de discrimination. Ces types de réponses impliquent un traitement des informations visuelles (et/ou auditives, tactiles, kinesthésiques...), aussi pauvres soient-elles, qui fait appel à des mécanismes corticaux. Le bébé est un être « fonctionnel » en quête constante d'informations lui permettant de continuer à se développer.

Cependant, des contraintes à la fois sensorielles et motrices limitent la prise d'information. En contrepartie, la mise au point de techniques et de méthodes adéquates, en psychologie du développement, permettent de recueillir des réponses comportementales optimales. Une des techniques (non évoquée ici), celle de l'habituation/déshabituaiton, montre combien l'enfant est capable de performances longtemps insoupçonnées. Il se montre alors capable d'apprendre, de mémoriser, de comparer...

Enfin, un autre aspect des organisations comportementales susceptible d'affecter l'activité perceptive réside dans l'attention visuelle, qui joue un rôle majeur dans la focalisation et, en conséquence, dans la sélection de l'information.

Aussi, malgré l'ensemble des contraintes physiologiques, sensorielles, motrices et attentionnelles, le développement de l'activité visuelle au cours des premiers mois révèle une

activité déjà adaptée ainsi qu'une perception relativement cohérente du monde visuel.

RÉFÉRENCES

- [1] ABRAMOV (I.), GORDON (J.), HENDRICKSON (A.), HAINLINE (L.), DOBSON (V.), LABOISSIERE (E.): « The retina of the newborn human infant », *Science*, 271, 1982, pp. 265-267.
- [2] ADAMS (R.J.): « An evaluation of color preference in early infancy », *Infant Behavior and Development*, 10, 1987, pp. 143-150.
- [3] ANTELL (S.E.), CARON (A.J.): « Neonatal perception of spatial relationships », *Infant Behavior and Development*, 8, 1985, pp. 15-23.
- [4] ASLIN (R.N.): « The development of smooth pursuit in human infants », in Fischer (D.F.), Monty (R.A.), Senders (J.W.) (eds), *Eye movements: cognition and visual perception*, Hillsdale, N.J., Erlbaum, 1981.
- [5] ASLIN (R.N.): « Oculomotor measures of visual development », in Gottlieb (G.), Krasnegor (N.) (eds), *Measurement of audition and vision during the first year of postnatal life: a methodological overview*, Norwood, N.J., Ablex, 1985.
- [6] ASLIN (R.N.), SALAPATEK (P.): « Saccadic localization of visual targets by very young human infant », *Perception and Psychophysics*, 17, 3, 1975, pp. 293-302.
- [7] ATKINSON (J.): « How does infant vision change in the first months of life », in Prechtl (H.F.R.) (ed.), *Continuity of neural functions from prenatal to postnatal life*, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1984.
- [8] ATKINSON (J.), BRADDICK (O.): « Stereoscopic discrimination in infants », *Perception*, 5, 1976, pp. 29-38.
- [9] ATKINSON (J.), BRADDICK (O.): « Development of basic visual functions », in Slater (A.), Bremner (G.) (eds), *Infant Development*, Hillsdale, N.J., Erlbaum, 1989.
- [10] BANKS (M.S.): « The development of visual accommodation during early infancy », *Child Development*, 51, 1980, pp. 646-666.
- [11] BANKS (M.S.), BENNETT (P.J.): « Optical and photoreceptor immaturities limit the spatial and chromatic vision of human neonates », *Journal of the Optical Society of America*, 5, 1988, pp. 2059-2079.
- [12] BANKS (M.S.), SALAPATEK (P.): « Infant visual perception », in MUSEN (P.H.) (ed.), *Handbook of child psychology: vol. II, Infancy and Developmental Psychobiology*, in Haith (M.M.), Campos (J.J.) (eds), New York, Wiley, 1983.
- [13] BONGRAND (M.), GAY-MERET (C.), GROCHOWICKI (M.), VITAL-DURAND (F.): « L'utilisation de la technique du regard préférentiel dans l'appréciation de l'acuité visuelle du nourrisson », *Transact. Fifth International Orthoptic Congress*, Ravault (A.), Lenk (M.) (eds), Cannes, 1983, pp. 39-45.
- [14] BORNSTEIN (M.H.): « Infants are trichromats », *Journal of Experimental Child Psychology*, 21, 1976, pp. 425-445.
- [15] BORNSTEIN (M.H.): « Perceptual anisotropies in infancy: ontogenetic origins and implications of inequalities in spatial vision », in Reese (H.W.), Lipsitt (L.P.) (eds), *Advances in Child Development and Behavior*, 16, New York, Academic Press, 1982.
- [16] BROMDHAL (S.): « Ultrasonic measurements of the eye in the newborn infant », *Acta Ophthalmologica*, 57, 1979, pp. 1048-1056.
- [17] BRONSON (G.W.): « The postnatal growth of visual capacity », *Child Development*, 45, 1974, pp. 873-890.
- [18] BUQUET (C.), DESMIDT (C.), CHARLIER (J.), QUERLEU (D.): « Évaluation des capacités de discrimination spatiale des enfants nouveau-nés par la poursuite visuelle de tests structurés », *comptes rendus de l'Académie des sciences, Paris*, t. 314, série III, 1992, pp. 133-140.

- [19] BUSHNELL (I.W.R.), GERRY (G.), BURT (K.): « The externality effect in neonates », *Infant Behavior and Development*, 6, 1983, pp. 151-156.
- [20] CARCHON (I.), BLOCH (H.): « Fonctionnement oculaire et coordination oculo-céphalique: méthode de traitement du signal électro-oculographique chez le nouveau-né et le nourrisson de 6 semaines », *Psychologie Française*, 38, 1, 1993, pp. 19-32.
- [21] CHARLIER (J.), BUQUET (C.), DESMIDT (A.), QUERLEU (D.): « Application de la technique photo-oculographique à l'étude de la poursuite visuelle au cours des premiers mois de la vie », *Bulletin de la Société d'Ophtalmologie*, XCIII, 11, 1993, pp. 973-978.
- [22] DE COURTEN (G.), GAREY (L.J.): « Similarities in neuronal development in the lateral geniculate nucleus of monkey and man », *Developmental Neurology*, 5, 1981, pp. 125-128.
- [23] DE COURTEN (G.), GAREY (L.J.): « Morphology of the neurons in the human lateral geniculate nucleus and their normal development », *Experimental Brain Research*, 47, 1982, pp. 159-171.
- [24] DE COURTEN (G.), GAREY (L.J.): « Développement morphologique de la voie visuelle primaire chez l'enfant », *Journal Français d'Ophtalmologie*, 6, 2, 1983, pp. 187-202.
- [25] DE VRIES (J.I.P.), VISSER (G.H.A.), PRECHTL (H.F.R.): « Fetal motility in the first half of pregnancy » in Prechtl (H.F.R.) (ed), *Continuity of neural function from prenatal to postnatal life*, London, SIMP, 1984, pp. 46-64.
- [26] DOBSON (V.), TELLER (D.Y.): « Visual acuity in human infants: a review and comparison of behavioral and electrophysiological studies », *Vision Research*, 18, 1978, pp. 1469-1483.
- [27] DUKE-ELDER (S.), COOK (C.): *System of ophthalmology*. (vol. 3) *Normal and abnormal development*. (part 1), Embryology, London, Henri Kimpton, 1963.
- [28] FAGAN (J.F.): « Infants recognition of invariant features of faces », *Child Development*, 50, 1976, pp. 627-638.
- [29] FANTZ (R.L.): « Pattern vision in newborn infants », *Science*, 140, 1963, pp. 269-277.
- [30] FANTZ (R.L.), ORDY (J.M.), UDELF (M.S.): « Maturation of pattern vision in infants during the first six months », *Journal of Comparative Physiological Psychology*, 55, 1962, pp. 907-917.
- [31] FANTZ (R.L.), FAGAN (J.F.), MIRANDA (S.B.): « Early vision selectivity as a function of pattern variables, previous exposure, age from birth and conception, and expected cognitive deficit », in Cohen (L.B.), Salapatek (P.) (eds), *Infant perception: from sensation to cognition. Basic visual processes* (vol. 1), New York, Academic Press, 1975.
- [32] FIELD (T.), WOODSON (R.), GREENBERG (R.), COHEN (D.): « Discrimination and imitation of facial expressions by neonates », *Science*, 218, 1982, pp. 179-181.
- [33] FIELDER (A.R.): « Ocular growth and the normal development of visual clinical aspects, *Doc. Ophtalmology, Proc. Series*, 45, 1986.
- [34] FONAREV (A.): « Development of visual motor reactions in children », Actes du XVIII^e Congrès de Psychologie, 1966, pp. 86-89.
- [35] HITCHCOCK (P.F.), HICKEY (T.L.): « Prenatal development of the human lateral geniculate nucleus », *Journal of Comparative Neurology*, 194, 1980, pp. 395-411.
- [36] HUTTENLOCHER (P.R.), DE COURTEN (C.), GAREY (L.J.), VAN DERLOOS (H.): « Synaptogenesis in human visual cortex. Evidence for synapse elimination during normal development », *Neurosciences Letters*, 33, 1982, pp. 247-252.
- [37] JOHNSON (M.H.): « Cortical maturation and the development of visual attention in early infancy », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2, 2, 1991, pp. 81-95.
- [38] KREMENITZER (J.P.), VAUGHAN (H.G.), KURTZBERG (D.), DOWLING (K.): « Smooth-pursuit eye movements in the newborn infant », *Child Development*, 50, 1979, pp. 442-448.
- [39] LAST (P.): *Eugene Wolff's anatomy of the eye and orbit*, London, H.K. Lewis, 1968.
- [40] MANN (I.): *The development of human eye*, London, British Medical Association, 1964.
- [41] MAGOON (E.H.), ROBB (R.M.): « Development of myelin in human optic nerve and tract », *Archives of Ophthalmology*, 99, 1981, pp. 655-659.
- [42] MAURER (D.): « Infant visual perception: methods of study », in Cohen (L.B.), Salapatek (P.) (eds), *Infant perception: from sensation to cognition. Basic visual processes* (vol. 1), New York, Academic Press, 1975.
- [43] MAURER (D.), CLARKE (A.L.), LEWIS (T.L.): « The development of peripheral detection during infancy », *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 27, 1986, pp. 264-271.
- [44] MOHN (G.), VAN HOF-VAN DUIN (J.): « Development of binocular and monocular visual fields of human infants during the first year of life », *Clinical Vision Science*, 1, 1986, pp. 51-64.
- [45] NAKAYAMA (K.): « Studies on the myelination of the human optic nerve », *Japanese Journal of Ophthalmology*, 11, 1968, pp. 132-140.
- [46] REGAL (D.M.), ASHMEAD (D.H.), SALAPATEK (P.): « The coordination of eye and head movements during early infancy: a selective review », *Behavioural Brain Research*, 10, 1983, pp. 125-132.
- [47] ROUCOUX (A.), CULEE (C.), ROUCOUX (M.): « Development of fixation and pursuit eye movements in human infants », *Behavioural Brain Research*, 10, 1983, pp. 133-139.
- [48] RUFF (H.), BIRCH (H.G.): « Infant visual fixation, the effect of concentricity, curvilinearity and number of directions », *Journal of Experimental Child Psychology*, 17, 1974, pp. 460-473.
- [49] SALAPATEK (P.): « Pattern perception in early infancy », in Cohen (L.B.), Salapatek (P.) (eds), *Infant perception: from sensation to cognition. Basic visual processes* (vol. 1), New York, Academic Press, 1975.
- [50] TELLER (D.Y.): « The development of visual acuity in human and monkey infants », *Trends of Neurosciences*, 1981, pp. 21-23.
- [51] TELLER (D.Y.): « Psychophysics of infant vision: definitions and limitations », in Gottlieb (G.), Krasnegor (N.A.) (eds), *Measurement of audition and vision in the first year of life*, Norwood, N.J., Ablex Publishing Corporation.
- [52] TELLER (D.), BORNSTEIN (M.H.): « Infant color vision and color perception », in Salapatek (P.), Cohen (L.B.) (eds), *Handbook of infant perception*, New York, Academic Press, 1987.
- [53] VITAL-DURAND (F.): « Acuity card procedures and the linearity of grating resolution development during the first year of human infants », *Behavior Brain Research*, 49, 1992, pp. 99-106.
- [54] VURPILLOT (E.): *Les perceptions visuelles du nourrisson*, Paris, Presses universitaires de France, 1972.
- [55] YAKOVLEV (P.), LECOURS (A.): « The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain », in Minkowski (A.) (ed), *Regional development of the brain in early life*, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1967, pp. 3-70.

La reconnaissance des visages dans la première année de vie

S. DE SCHONEN*, J. MANCINI**

* Groupe développement neurocognitif LNC-CNRS, 31, chemin Joseph-Aiguier, 13009 Marseille.

** Service de neuropédiatrie, CHU La Timone-Hôpital enfants, 13000 Marseille

RÉSUMÉ : *La reconnaissance des visages dans la première année de vie.*

On examine le problème posé par la notion de systèmes spécialisés dans le traitement des objets en étudiant un cas particulier, le traitement des visages. S'il existe des systèmes spécialisés à ce niveau intégré de traitement, le traitement des visages est considéré comme l'un des meilleurs candidats. La question est abordée en examinant les données dont on dispose sur le développement du traitement des visages afin d'y découvrir les mécanismes qui contribuent, de façon plus ou moins spécifique, à l'émergence d'une compétence analogue à celle de l'adulte.

Mots clés : Développement cognitif — Nourrisson — Reconnaissance des visages — Spécialisations cérébrales.

SUMMARY: *Face processing in the first year of life.*

We address the question of whether there exist specific systems for processing objects in primates. We do so by examining the development of recognition of faces in human infants in order to discover the more or less specific mechanisms that contribute to the emergence of adult like face recognition competence. Faces were chosen as they seem the best candidate for a specialized object processing system. In our discussion of this issue five kinds of data are presented. (1) The relationship between Conspec (Johnson and Morton, 1991) and the neonates' competencies in individual face processing, (2) the changes in individual face processing competencies around the age of two months, (3) the functional hemispheric asymmetries in pattern and individual face processing during the first year of life, (4) the cortical pattern of activation elicited by visual attention to faces in 2-month-old infants as indexed by PET scan using ^{15}O labeled water, and (5) the performance in children who suffered unilateral brain damage before or immediately following birth.

Key words: Cognitive development — Infants — Face processing — Cortical specialization.

Le visage est porteur d'un grand nombre d'informations susceptibles de jouer un rôle important dans la communication, les interactions entre individus et les apprentissages de la vie quotidienne. Reconnaître l'identité d'une personne, le caractère favorable ou non de son accueil, la direction de l'espace vers laquelle elle dirige son attention, savoir « lire » les mouvements de ses lèvres au cours de la parole, etc. suppose l'existence de certaines compétences perceptives et cognitives. Savoir comment se développent ces compétences, quels en sont les troubles éventuels, quels sont les substrats neuronaux de ces activités, et quelle est la plasticité normale ou post-lésionnelle de ces systèmes pourrait être important d'un point de vue diagnostique comme pronostique. De plus, du fait du développement des techniques de transmission d'images à distance (dont celles

des visages), les activités professionnelles vont exiger de plus en plus souvent une lecture rapide et efficace de l'image et conduire à une augmentation importante des occasions dans lesquelles les traitements perceptifs des visages jouent un rôle non négligeable.

On s'est demandé au cours de ces dernières décennies dans quelle mesure ces traitements du visage et des diverses informations qu'il porte sont effectués par des systèmes neuronaux spécifiques ou si les systèmes qui codent et représentent les êtres vivants, les objets, les paysages, les patterns visuels sont les mêmes que ceux qui représentent les visages. L'existence chez certains adultes cérébro-lésés d'un déficit important dans la reconnaissance des visages familiaux (la prosopagnosie) sans que la reconnaissance d'autres objets ou de formes comme les lettres de l'alphabet

ne soit atteinte plaide en faveur de l'existence de systèmes neuronaux sinon spécifiques des visages du moins bien dissociables des systèmes impliqués dans la reconnaissance d'autres objets. L'existence chez l'humain de différences entre les régions corticales activées par la présentation de visages et celles activées par la présentation d'objets va dans le même sens (Sergent, Ohta, MacDonald, 1992 ; Haxby, Grady, Horwitz, Ungerleider, Mishkin, Carson, Herscovitch, Schapiro, Rapoport, 1991 ; Allison, Ginter, McCarthy, Nobre, Puce, Luby, Spencer, 1994). Mais l'existence chez l'adulte d'une localisation des réseaux neuronaux impliqués dans telle ou telle activité cognitive, de façon plus ou moins stable d'un individu à l'autre, ne signifie pas pour autant que ces zones possédaient, et elles seules, dès le début du développement, des compétences de traitement des visages, les propriétés nécessaires et suffisantes à un tel traitement. On conçoit facilement que la reconnaissance de visages résulte de l'activité de réseaux neuronaux qui reçoivent des afférences visuelles et qui sont par ailleurs connectés à des régions impliquées dans l'élaboration et la mémorisation de savoirs de nature variée liés aux visages. De plus, parmi les régions ou réseaux neuronaux recevant des afférences visuelles, il faut admettre que ceux impliqués dans le traitement des visages doivent pouvoir traiter et représenter des propriétés nécessaires pour encoder un visage de telle manière à le reconnaître sous différents aspects et dans diverses expressions, etc. Or ces propriétés ne sont pas simples puisque aucune machine à l'heure actuelle n'est capable de simuler les performances des humains en la matière, alors que l'on peut sinon simuler les mécanismes, du moins simuler les performances des humains pour la reconnaissance de patterns et d'objets simples (le fait qu'il existe des malades cérébro-lésés chez qui la reconnaissance des visages est perturbée, mais non la lecture des lettres ou des mots, ni la reconnaissance des objets, suggère effectivement l'existence possible d'encodages différant par quelques propriétés encore inconnues). Le traitement des visages ne peut donc émerger n'importe où dans le cortex associatif. Mais les contraintes qui aboutissent à cette organisation neurofonctionnelle restent à définir. Sous l'effet de quelles contraintes et de quels apprentissages s'organisent ces compétences ? Que sait-on du développement de la reconnaissance des visages et de la spécialisation corticale pour ces fonctions ?

UN MÉCANISME POUR LA RECONNAISSANCE DU FACIÈS DE L'ESPÈCE

Dès la naissance l'attention visuelle du nouveau-né est attirée un peu plus souvent ou plus longtemps par le schéma d'un visage que par un pattern comportant les mêmes traits disposés sur une surface de même taille et mêmes contours exactement mais disposés en désordre (Goren, Sarty, Wu, 1975 ; Johnson, Dziurawiec, Ellis, Morton, 1991). Johnson et al. ont appelé ce système Conspec et ont fait la conjecture que cette préférence est d'origine sous-corticale (Johnson, 1990 ; Morton, Johnson, 1991). Ils n'ont pu mettre cette préférence en évidence à la naissance qu'en provoquant un comportement d'orientation vers le stimulus apparaissant en périphérie (en déplaçant les stimuli) et non avec des stimuli

immobiles. Cette particularité est un argument en faveur d'un contrôle visuel par le colliculus. Mais Valenza, Simion, Macchi, Cassia, Umiltà (1994) ont montré que la préférence pour le schéma de visage par rapport au non-visage apparaît clairement dans les durées de fixation visuelle chez les nourrissons de 3 à 4 jours, même lorsque les deux stimuli sont immobiles. Il n'est pas exclu qu'à la naissance le colliculus soit responsable de l'orientation préférentielle vers le faciès, mais que le cortex visuel soit impliqué ensuite dès les premiers jours. L'idée que des réseaux du cortex visuel soient fonctionnels dès les premiers jours et premières semaines de vie n'est pas contraire aux données électrophysiologiques dont on dispose (Atkinson, Hood, Wattam-Bell, Anker, Tricklebank, 1988). Le nouveau-né pourrait ainsi acquérir une représentation du faciès de l'espèce grâce au mécanisme qui assure la préférence pour le pattern « faciès » très schématique. Les propriétés perceptives de cette représentation dépendent également, bien évidemment, des capacités de traitement perceptif des objets à cet âge (Slater, 1993).

LE CODAGE DES PHYSIONOMIES

La préférence visuelle pour le faciès manifeste que le nouveau-né est sensible à la différence entre la structure interne du faciès et la structure interne du leurre (non-faciès), indépendamment du contour, qui est le même pour les deux stimuli. On peut alors se demander si le système Conspec sert à filtrer et sélectionner l'information nécessaire pour distinguer deux visages différents et pour reconnaître un individu. Conspec pourrait servir de filtre ou bien de prototype élémentaire à partir duquel seraient codés des visages individuels ou ce en quoi deux visages sont distincts. Bushnell, Sai et Mullin (1989) ont montré que le nouveau-né âgé de 3 à 4 jours manifeste une préférence visuelle pour le visage de sa mère par rapport à celui d'une étrangère, et cela en l'absence de toute autre information associée auditive (voix), olfactive ou cinématique (les visages étaient impassibles). Cependant, Pascalis, de Schonen, Morton, Deruelle et Fabre-Grenet (1995) ont montré que l'information encodée sur la base de laquelle le nouveau-né reconnaît sa mère comporte en fait le pourtour de la tête et du visage. En effet, lorsque la mère et l'étrangère portent un foulard masquant les cheveux et la ligne de séparation front/cheveux, le nouveau-né ne présente plus de fixation visuelle préférentielle. L'information sur la base de laquelle il reconnaît le visage de la mère contient comme ingrédient essentiel une information sur le pourtour du visage et de la tête. Ce fait n'est pas sans rappeler certains prosopagnosiques qui disent reconnaître leurs familiers en se servant de la forme de la ligne de séparation entre le front et les cheveux (Davidoff, Matthews, Newcombe, 1986). Puisque la reconnaissance du visage de la mère se fonde sur le contour de la tête et non sur la configuration interne du visage, on peut conclure que le système Conspec guide l'attention visuelle vers la structure du faciès de l'espèce mais ne sert pas directement à guider l'encodage des caractéristiques du visage d'un individu dans les premières semaines de vie. Le système qui permettra de traiter des physionomies n'est donc pas issu de Conspec. La possibilité de reconnaître le

visage de la mère avec ou sans foulard apparaîtrait dans le courant ou à la fin du deuxième mois (Morton, 1993). Autrement dit, le traitement de la physionomie proprement dite (et non plus du contour du visage et de la tête) apparaîtrait vers cette date (en tout cas en ce qui concerne un visage très familier tel celui de la mère).

Mais les caractéristiques adultes du traitement des visages ne sont pas encore toutes présentes. Par exemple, ce n'est que vers l'âge de trois mois que commence à émerger la possibilité de reconnaître un visage sous différents points de vue (Pascalis, de Schonen, 1995). De nombreuses questions restent ouvertes. Dans quelle mesure le fonctionnement de Conspec, d'une part, et l'expérience acquise dans les premières semaines de vie, d'autre part, sont nécessaires à l'émergence du fonctionnement de ce système de codage des visages vers la fin du deuxième mois. Quelle est la part de l'exercice quotidien dans ces changements de performances ? Quelle est la part liée à la maturation de structures neuronales spécifiques et de quelle spécificité s'agit-il : relative aux visages en particulier ou aux objets en général ? Comment est réalisée la mise en correspondance entre différents points de vue sur un visage : Y a-t-il extraction des invariants physionomiques ou bien stockage de différents points de vue prototypiques codés sous une même étiquette (par exemple, à différents points de vue correspond une même odeur ou une même voix) ? Mais la constitution d'une étiquette commune elle-même pose problème.

PRÉCOCITÉ DE CERTAINES CARACTÉRISTIQUES ANATOMOFONCTIONNELLES ADULTES

On sait cependant que certaines des caractéristiques anatomofonctionnelles de la reconnaissance des visages que l'on observe chez l'adulte sont présentes dès les premiers mois de vie. Ainsi, l'avantage de l'hémisphère droit observé dans de nombreuses études de reconnaissance de visages chez l'adulte est présent aussi, dès l'âge de 4 à 5 mois, chez le nourrisson, qui ne reconnaît la physionomie de sa mère et celle d'une étrangère que lorsque celles-ci sont projetées à l'hémisphère droit (de Schonen, Gil de Diaz, Mathivet, 1986 ; de Schonen, Mathivet, 1990). Cette asymétrie fonctionnelle hémisphérique semble concerner la reconnaissance de visages individuels mais non la reconnaissance de la catégorie « faciès » en général (de Schonen, Bry, 1987). Le traitement de l'information qui définit l'identité d'un visage fait donc intervenir des structures neuronales différentes de celles qui permettent de catégoriser un visage en tant que tel. De plus, ces structures ne traitent pas la même information dans l'hémisphère gauche et dans l'hémisphère droit. Cette supériorité de l'hémisphère droit par rapport à l'hémisphère gauche ne tient pas nécessairement à l'existence, dès cet âge, d'un système exclusivement spécialisé dans le traitement des visages. Il suffit que l'hémisphère droit dispose de systèmes de codage d'informations sur les visages qui permettent de reconnaître un visage individuel à chacune de ses occurrences malgré les modifications morphologiques imposées par ses déplacements et les variations d'expression, etc. Ce que nous appelons le visage de tel ou tel individu correspond à l'activité de réseaux de neurones de

l'hémisphère droit, qui représente ces informations. Quel type d'information code les réseaux de l'hémisphère droit que ne codent pas ceux de l'hémisphère gauche ?

Lorsque l'on essaie de caractériser la manière qu'a chacun des hémisphères cérébraux de traiter des patterns, les objets et les visages, on constate des différences importantes dans les informations traitées. Il existe plusieurs manières de résumer ces différences (parmi les plus récentes, voir Kosslyn, 1987). Aucune n'est vraiment satisfaisante, en ce sens qu'aucune ne rend compte de toutes les différences observées entre les deux hémisphères dans leur manière de traiter les patterns, les formes et les objets. Il faut cependant remarquer que certaines de ces différences au moins sont présentes dans les premiers mois de la vie. Dès l'âge de 4 à 5 mois, l'hémisphère droit traite des aspects d'un pattern géométrique qui ne sont pas les mêmes que ceux traités par l'hémisphère gauche (Deruelle, de Schonen, 1991b ; Deruelle, de Schonen, sous presse). Il en va de même avec les visages (Deruelle, de Schonen 1991a ; Deruelle, de Schonen, soumis). L'hémisphère droit est, par exemple, sensible à l'orientation, dans un visage, du long axe des yeux ou à la taille des yeux. De même, il est sensible, dans un pattern géométrique, à la disposition spatiale des éléments constitutifs du pattern alors que l'hémisphère gauche est peu sensible à ces aspects. En revanche, l'hémisphère gauche est sensible à la forme du contour des yeux, ou, dans un pattern géométrique, à la forme des éléments constitutifs de ce pattern géométrique. Chez l'adulte on trouve également des différences de ce type entre les informations traitées par les deux hémisphères (Hillger, Koenig, 1991). Ainsi, les physionomies telles qu'elles sont codées par l'hémisphère droit sont différentes de celles de l'hémisphère gauche, et ceci très précocement. Il se peut que cette particularité de l'hémisphère droit soit l'une des raisons de son avantage dans la reconnaissance. Sans être spécifique des visages, cette caractéristique de l'hémisphère droit permet probablement de coder une information sur les visages permettant de les reconnaître à travers leurs diverses transformations. Le codage de la configuration, et en particulier des distances ou des systèmes de distances entre traits, constitue peut-être un codage plus efficace pour la reconnaissance de l'identité que le codage de la forme des traits locaux réalisé par l'hémisphère gauche.

Il est tout à fait possible que les compétences spécifiques de chacun des hémisphères telles qu'elles sont observées dans la première année de vie ne soient pas encore celles que l'on observe chez l'adulte. Il est possible aussi que d'autres compétences perceptives, les unes traitant de certains traits des visages, d'autres d'aspects plus globaux, émergent plus tard dans le prolongement de ces premières compétences ou à titre de compétences nouvelles (voir, par exemple, Ellis et Ellis, 1994). L'existence précoce de caractéristiques anatomofonctionnelles des traitements analogues à celles observées chez l'adulte ne signifie pas que toutes les caractéristiques des traitements adultes sont présentes précocement. Ces faits ne permettent pas non plus de savoir si les traitements d'émergence plus tardive sont le résultat du fonctionnement préalable des traitements d'apparition plus précoce ou bien s'il s'agit de compétences nouvelles sans lien avec les précédentes (le même type de questions s'était posé jadis à propos des stades successifs dans la théorie de Piaget. Piaget répondait qu'un stade était une

organisation nécessaire à l'émergence du suivant, mais les preuves étaient difficiles à produire). Ainsi, par exemple, la coordination entre deux traitements, contrôlés l'un par l'hémisphère droit, l'autre par l'hémisphère gauche, ne devient possible que vers l'âge de 24 mois (de Schonen, Liégeois, 1995). L'accès par un hémisphère à l'information acquise par l'autre est impossible jusqu'à cet âge (de Schonen, Mathivet, 1990 ; Deruelle et de Schonen, 1991b). Pourtant l'information liée à la reconnaissance catégorielle du faciès de l'espèce est transmise d'un hémisphère à l'autre dès l'âge de 4 mois et demi ; cependant, cette transmission pourrait fort bien être le fait de voies sous-corticales (de Schonen, Bry, 1987). Or la coordination des traitements propres à chacun des deux hémisphères est probablement la base de compétences cognitives nouvelles n'existant pas encore chez le tout petit enfant. A partir de l'âge de 2 ans de nombreuses compétences nouvelles pourraient être liées à la maturation fonctionnelle du corps calleux. Les conditions nécessaires au fonctionnement de cette commissure néocorticale comme voie de coordination interhémisphérique sont peut-être à trouver à la fois dans l'état de maturation des synapses des fibres calleuses et dans l'organisation fonctionnelle des zones connectées, organisation fonctionnelle qui est probablement en partie (mais en partie seulement) le résultat de leur fonctionnement.

Quoi qu'il en soit, même si l'exercice et la fréquentation des visages modifient, élaborent et spécifient les compétences de traitement des visages, on peut conclure que ces apprentissages sont néanmoins guidés par des contraintes anatomofonctionnelles présentes précocement.

Ces contraintes anatomofonctionnelles présentes précocement ont probablement un rôle crucial puisqu'une lésion corticale néonatale ou certaines malformations unilatérales sont susceptibles de perturber de façon importante le développement de certaines compétences de traitement des visages en laissant intactes d'autres compétences. A l'âge de 6 à 8 ans, par exemple, des enfants atteints d'une lésion périnatale corticale unilatérale ou porteurs d'un syndrome de Sturge-Weber avec angiome occipital droit peuvent avoir appris à lire, à traiter certains aspects des visages, mais présenter des troubles importants pour le traitement d'autres aspects du visage (Mancini, de Schonen, Deruelle, Massoulier, 1994). Ainsi, bien que l'environnement ait offert à l'enfant des visages et des raisons de les traiter et les mémoriser pendant six à huit ans, certaines compétences n'ont pas pu se développer normalement. Ceci suggère clairement que les différentes informations codées à partir des visages par l'activité neuronale ne peuvent l'être par n'importe quels réseaux de neurones des zones associatives impliquées dans le traitement figural. Les réseaux impliqués dans la reconnaissance des formes des lettres dans la lecture ne sont pas capables d'assurer le traitement des visages. Si l'on examine la littérature sur les lésions cérébrales chez l'adulte on peut parvenir aux mêmes conclusions (Farah, 1990). Cela dit, il ne faut pas exclure l'éventualité qu'au-delà de 6 à 8 ans l'entraînement à un codage, différent du codage habituel des visages, soit possible.

De même que nous avons observé l'existence dès l'âge de 4 à 5 mois d'une latéralisation de deux modes de traitement différents de l'information visuelle (voir ci-dessus), de même Stiles-Davis, Janowski, Engel, Nass (1988), Stiles et Nass (1991) ont montré qu'une lésion cérébrale survenue

avant l'âge de 6 mois affecte, selon le côté de la lésion, des traitements figuratifs différents. Les enfants porteurs d'une lésion droite présentent un handicap dans le traitement de la configuration globale tandis que les enfants porteurs d'une lésion gauche présentent des difficultés dans le traitement local des patterns.

La limitation de la plasticité post-lésionnelle en ce qui concerne les capacités de traitement visuo-figural, dans le cas de lésions survenues avant l'âge de 6 mois, contraste avec la plasticité post-lésionnelle dans le cas du développement du langage (Stiles, 1995). Les raisons de ces différences dans les capacités de redéploiement des compétences peuvent être multiples. L'une d'elles peut tenir au fait que les réseaux neuronaux impliqués dans les compétences visuo-figurales n'ont pas le même rythme de maturation fonctionnelle que ceux qui sont impliqués dans l'émergence du langage (de Schonen, Mathivet, 1989 ; Stiles, 1995).

Nous avons tenté de rendre compte par un scénario (de Schonen, 1989 ; de Schonen, Mathivet, 1989 ; Sergent 1989a, b ; de Schonen, Deruelle, Pascalis, Mancini, 1993 ; Turkewitz, 1989, 1993) à la fois des contraintes anatomofonctionnelles précoces déterminant la latéralisation du traitement des visages et les caractéristiques de ces traitements, et aussi de l'existence d'une certaine variabilité interindividuelle de cette latéralisation (une partie des filles semblent moins latéralisées que l'ensemble des garçons ; de Schonen, Mathivet, 1989 ; Deruelle, de Schonen, 1991a ; Deruelle, de Schonen, soumis). L'idée générale de ce scénario est d'abord que des vagues successives de maturation fonctionnelle du cortex se succèdent. Il s'agit ensuite de faire jouer un rôle crucial à l'horaire relatif de maturation de différentes structures neuronales et différentes fonctions. Le traitement « configural » des visages se stabiliserait dans l'hémisphère droit parce que le cortex associatif postérieur (celui qui reçoit des afférences visuelles nécessaires au codage d'objets, dont les visages) deviendrait fonctionnel dans l'hémisphère droit avant son homologue gauche à une période de vie, les deux premiers mois de vie, où les afférences visuelles fonctionnelles seraient essentiellement des voies portant des fréquences spatiales basses. Lorsqu'on ne retient que les fréquences spatiales basses d'un visage, ce sont les caractéristiques configurales des visages qui permettent alors de différencier ce visage d'un autre (la distance entre les traits, l'orientation du long axe des yeux, de la bouche, etc.), tandis que la forme des traits est plus difficile à déterminer (voir, par exemple, Hughes, Fendrich, Reuter-Lorenz, 1990), ce qui a pour conséquence qu'un codage de la forme des traits entraîne des confusions plus nombreuses entre physionomies.

Les premières physionomies qui seraient reconnues, identifiées, sans confusion avec d'autres, et donc insérées dans un réseau d'informations diverses mais unique, seraient celles codées par le cortex droit dans le courant du deuxième mois de vie. Par ailleurs, il est possible que la croissance plus rapide à droite qu'à gauche des arborisations dendritiques corticales (Scheibel, 1993) favorise des champs récepteurs larges, ce qui contribuerait éventuellement à favoriser un codage configural. Lorsque le cortex temporal postérieur gauche devient fonctionnel à son tour, les voies transmettant les fréquences spatiales moyennes et une partie de fréquences hautes seraient entre-temps devenues fonctionnelles. L'organisation synaptique ne serait alors plus du tout

la même que celle qui existait un peu avant dans le cortex droit. L'hémisphère droit et le gauche recevraient chacun des fréquences spatiales hautes et basses à ce moment-là, mais le décalage temporel aurait permis d'introduire et de stabiliser des différences dans la distribution spatiale de la connectivité liées à ces informations dans les zones associatives.

Des variations dans l'ampleur des décalages temporels pourraient augmenter ou diminuer les différences entre hémisphères et c'est ce qui rendrait compte des différences inter-individuelles, en particulier des différences entre une partie de la population des filles et celle des garçons. Un scénario analogue peut être appliqué au développement du langage, si l'on admet qu'il existe des vagues de maturation successives amenant des ensembles de réseaux à fonctionner dans différentes zones des cortex associatifs à des moments divers du développement (Turkewitz, 1989, 1993).

La plus grande précocité des voies transmettant des fréquences spatiales basses est plausible (voir Banks, Danemiller, 1987 ; Banks, Stephens, Hartmann, 1985 ; Suter, Suter, Roessler, Parker, Armstrong, Powers, 1994). Par ailleurs, plusieurs arguments militent en faveur de l'idée que certaines zones du cortex droit comportent des réseaux neuronaux qui deviennent fonctionnels avant leurs homologues gauches. Aux arguments que nous avons déjà mentionnés en 1989 (de Schonen, Mathivet, 1989), il faut ajouter le fait que les zones des cortex du gyrus temporal supérieur et moyen de l'hémisphère droit sont plus actifs chez le nourrisson de 2 mois que leurs homologues gauches lorsque le nourrisson est attentif à un cercle lumineux aussi bien qu'à des visages (étude par tomographie d'émission de positons avec $(H_2O) 15$). Sous stimulation visuelle, à l'âge où le nourrisson commence à traiter les physionomies et non plus seulement le contour de la tête, on observe une plus grande activité dans le cortex temporal droit que gauche, cette asymétrie n'est pas observée dans les cortex occipitaux ou pariétaux. La conjecture que l'activité des réseaux du cortex temporal droit plutôt que gauche représente des informations sur les visages à partir des informations visuelles apportées par des fréquences spatiales basses, c'est-à-dire essentiellement des informations sur la disposition des traits en une configuration caractéristique de chaque visage, est donc plausible.

Ce scénario, pour être vraisemblable, suppose que d'une manière ou d'une autre l'expérience quotidienne que le nourrisson a des visages se fixe pendant les premières semaines et mois de vie. Le nourrisson mémorise-t-il des exemplaires de têtes et de visages ou bien le système de traitement se modifie-t-il au fur et à mesure de l'expérience quotidienne sans mémoire des exemplaires distincts ?

Deux expériences sur la reconnaissance du visage de la mère après qu'un délai de deux à trois minutes se soit écoulé sans que le nouveau-né ait pu voir, entendre ou sentir sa mère (Bushnell et al., 1989 ; Pascalis et al., 1995) révèlent qu'il y a mémoire d'un exemplaire ; mais il est difficile de savoir dans quelle mesure cette mémorisation requiert l'ensemble des stimulations et des renforcements qui sont associés à la présence du visage maternel. De plus, le fait que la fixation visuelle soit préférentiellement dirigée sur la mère ne favorise pas l'attention et la mémorisation de visages nouveaux autres que celui de la mère.

Une autre étude a cependant montré qu'après habitude avec la photographie d'une tête-visage, un nouveau-né de 4 à 5 jours à qui on présente simultanément la même photographie et celle d'une autre tête-visage fixe préférentiellement le stimulus nouveau, même après un délai de deux minutes (Pascalis, de Schonen, 1994) (ce délai de deux minutes a été adopté parce qu'il est considéré dans la littérature comme requérant une mémoire à long terme ; les amnésiques ne manifestent pas de préférence visuelle pour un stimulus nouveau dès que le délai de rétention atteint deux minutes, McKee, Squire 1993).

Ainsi, en dehors de sa mère, la mémorisation d'une tête-visage par le nourrisson dans sa première semaine de vie aboutit ensuite à orienter l'attention visuelle vers une tête-visage nouvelle. On retrouve également cette orientation et cette préférence visuelle pour le stimulus nouveau à l'âge de 3 mois et de 6 mois, même après un délai de 24 heures (Pascalis, Matheny, de Schonen, Nelson, 1994 ; Pascalis, de Schonen, 1995). Mais à l'âge de 3 mois la physionomie elle-même est mémorisée et non plus seulement le contour de la tête. Cependant, comme on l'a vu plus haut, ce n'est qu'aux alentours de l'âge de 3 mois que la représentation d'un visage unique à partir de plusieurs vues sur ce visage semble émerger (voir plus haut, Pascalis et de Schonen, 1995). Mais à l'âge de 2 mois, âge auquel s'amorcent des changements importants dans le traitement des visages, on n'observe pas de résultats clairs dans les tests de reconnaissance mnésique. On peut donc conclure qu'une certaine forme de mémoire de reconnaissance des exemplaires de têtes puis de physionomies (à 3 mois) est associée aux capacités de traitement, mais qu'à l'âge de 2 mois survient un changement, soit dans les capacités mnésiques, soit dans les traitements.

On sait que bien après l'âge de 4 mois, on observe encore des modifications dans les compétences de traitement des visages (voir, par exemple, Ellis et Ellis, 1994) et des modifications profondes dans les caractéristiques de la mémoire. L'existence précoce de compétences dans la reconnaissance des visages, celle d'une latéralisation hémisphérique et d'une dissociation entre les modes de traitement de chacun des hémisphères, l'existence dès l'âge de 2 mois d'un pattern d'activité corticale temporal associé à l'attention visuelle à des patterns (en l'occurrence des visages) ne signifient pas que l'histoire de la reconnaissance des visages s'arrête là. Mais, en ce qui concerne cette période de la première année de vie, nous aboutissons à l'idée que les apprentissages sont précontraints et guidés, même s'ils contribuent au modelage de l'architecture neuronale et à la stabilisation de celle-ci. En ce sens, ils sont des facteurs de spécialisation corticale, mais ils le sont dans la mesure où ils sont orientés par des contraintes structurales préexistantes (architecture neuronale, architecture des connexions, type de transmission synaptique, constante de temps de travail, ordre de maturation des groupes de réseaux, etc.) qui peuvent résulter elles-mêmes d'une coopération entre des contraintes préexistantes et des apprentissages antérieurs. L'ensemble de ces contraintes rend possibles l'émergence et « l'acquisition » de certains patterns d'activités neuronales représentant des aspects de l'environnement et en exclut d'autres momentanément ou définitivement, selon les cas. En ce sens-là, nous nous autoriserons à conclure qu'il existe des fonctionnements spécialisés qui permettent des représentations des visages individuels.

RÉFÉRENCES

- [1] ALLISON (T.), GINTER (H.), McCARTHY (G.), NOBRE (A.C.), PUCE (A.), LUBY (M.), SPENCER (D.): « Face recognition in human extrastriate cortex », *Journal of Neurophysiology*, 71, 1994, pp. 821-825.
- [2] ATKINSON (J.), HOOD (B.), WATTAM-BELL (J.), ANKER (S.), TRICKLEBANK (J.): « Development of orientation discrimination in infancy », *Perception*, 17, 1988, pp. 587-595.
- [3] BANKS (M.S.), DANNEMILLER (J.L.): « Infant visual psychophysics », in Salapatek P., Cohen L. (eds), *Handbook of Infant Perception* (vol. 1), Orlando, Academic Press, 1987, pp. 115-184.
- [4] BANKS (M.S.), STEPHENS (B.R.), HARTMANN (E.E.): « The development of basic mechanisms of pattern vision. Spatial frequency channels », *Journal of Experimental Child Psychology*, 40, 1985, pp. 501-527.
- [5] BUSHNELL (I.W.R.), SAI (F.), MULLIN (J.T.): « Neonatal recognition of the mother's face », *British Journal of Developmental Psychology*, 7, 1989, pp. 3-15.
- [6] CORBETTA (M.), MIEZIN (F.M.), DOBMEYER (S.), SHULMAN (G.L.), PETERSEN (S.E.): « Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans », *Science*, 248, 1990, pp. 1556-1559.
- [7] DAVIDOFF (J.), MATTHEWS (W.B.), NEWCOMBE (F.): « Observations on a case of prosopagnosia », in Ellis H.D., Jeeves M.A., Newcombe F., Young A. (eds), *Aspects of face processing*, Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 1986, pp. 279-290.
- [8] DE SCHONEN (S.): « Some reflections on brain specialisation in faceness and physiognomy processing », in Young A., Ellis H.D. (eds), *Handbook of research on face processing*, Amsterdam, North Holland, 1989, pp. 379-389.
- [9] DE SCHONEN (S.), LIÉGEOIS (F.): « Interhemispheric integration of visual information in infants. Poster presented at the VIIth European Conference on Developmental Psychology », Cracovie, 22-26 août 1995.
- [10] DE SCHONEN (S.), BRY (I.): « Interhemispheric communication of visual learning: a developmental study in 3-6-month-old infants », *Neuropsychologia*, 25, 1987, pp. 601-612.
- [11] DE SCHONEN (S.), MATHIVET (E.): « First come first served: a scenario about development of hemispheric specialization in face recognition during infancy », *European Bulletin of Cognitive Psychology (CPC)*, 9, 1989, pp. 3-44.
- [12] DE SCHONEN (S.), MATHIVET (E.): « Hemispheric asymmetry in a face discrimination task in infants », *Child Development*, 61, 1990, pp. 1192-1205.
- [13] DE SCHONEN (S.), GIL DE DIAZ (M.), MATHIVET (E.): « Hemispheric asymmetry in face processing in infancy », in Ellis H.D., Jeeves M.A., Newcombe F., Young A. (eds), *Aspects of face processing*, Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 1986, pp. 199-208.
- [14] DERUELLE (C.), DE SCHONEN (S.): « Configural and componential visual pattern processing by infants: hemispheric specialization », *Perception*, 20, 1991a, p. 123.
- [15] DERUELLE (C.), DE SCHONEN (S.): « Hemispheric asymmetries in visual pattern processing in infancy », *Brain and Cognition*, 16, 1991b, pp. 151-179.
- [16] DERUELLE (C.), DE SCHONEN (S.): « Pattern processing in infancy: hemispheric differences in the processing of shape and location of visual components », *Infant Behavior and Development* (sous presse).
- [17] ELLIS (D.M.), ELLIS (H.D.): « Développement des capacités à traiter des transformations faciales chez l'enfant », *Psychologie Française*, 39, 1994, pp. 287-300.
- [18] FARAH (M.J.): *Visual agnosia*, Cambridge, Mass, London, MIT Press, 1990.
- [19] GOREN (C.C.), SARTY (M.), WU (P.Y.K.): « Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants », *Pediatrics*, 56, 1975, pp. 544-549.
- [20] HAXBY (J.V.), GRADY (C.L.), HORWITZ (B.), UNGERLEIDER (L.G.), MISHKIN (M.), CARSON (R.E.), HERSCOVITCH (P.), SCHAPIRO (M.B.), RAPOPORT (S.I.): « Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex », *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 88, 1991, pp. 1621-1625.
- [21] HILLGER (L.A.), KOENIG (O.): « Separable mechanisms in face processing: evidence from hemispheric specialization », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 1991, pp. 42-58.
- [22] HUGHES (H.C.), FENDRICH (R.), REUTER-LORENZ (P.A.): « Global versus local processing in the absence of low spatial frequencies », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2, 1990, pp. 272-282.
- [23] JOHNSON (M.H.), DZIURAWIEC (S.), ELLIS (H.D.), MORTON (J.): « Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline », *Cognition*, 40, 1991, pp. 1-19.
- [24] JOHNSON (M.H.): « Cortical maturation and the development of visual attention in early infancy », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2, 1990, pp. 81-95.
- [25] JOHNSON (M.H.), MORTON (J.): *Biology and cognitive development: the case of face recognition*, Oxford, Blackwells, 1991.
- [26] KOSSLYN (S.M.): « Seeing and imagining in the cerebral hemispheres: a computational approach », *Psychological Review*, 94, 1987, pp. 148-175.
- [27] MANCINI (J.), DE SCHONEN (S.), DERUELLE (C.), MASSOULIER (A.): « Face recognition in children with early right or left brain damage », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 36, 1994, pp. 156-166.
- [28] McKEE (R.D.), SQUIRE (L.R.): « On the development of declarative memory », *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 19, 1993, pp. 397-404.
- [29] MORTON (J.): « Mechanisms in infant face processing », in de Boysson-Bardies B., de Schonen S., Juszyk P., MacNeilage P., Morton J. (eds), *Developmental Neurocognition: Speech and Face Processing in the First Year of Life*, Dordrecht, Kluwer, 1993, pp. 93-102.
- [30] MORTON (J.), JOHNSON (M.H.): « Conspic and conlern: a two-process theory of infant face recognition », *Psychological Review*, 98, 1991, pp. 164-181.
- [31] PASCALIS (O.), DE SCHONEN (S.): « Recognition memory in 3-4-day-old human neonates », *Neuroreport*, 5 (14), 1994.
- [32] PASCALIS (O.), DE SCHONEN (S.): « Long term recognition memory in neonates, 2-, 3- and 6-month old infants », Poster présenté au 2^e Colloque de la Société des Neurosciences, Lyon, 14-18 mai 1995.
- [33] PASCALIS (O.), DE SCHONEN (S.), MORTON (J.), DERUELLE (C.), FABRE-GRENET (M.): « Mother's face recognition in neonates: a replication and an extension », *Infant Behavior and Development*, 18, 1995, pp. 79-86.
- [34] PASCALIS (O.), MATHENY (L.), DE SCHONEN (S.), NELSON (C.H.): « Neural correlates of face recognition by 3-month-old infants », *Infant Behavior and Development*, 17, 1994, p. 861.
- [35] SCHEIBEL (A.B.): « Dendritic structure and language development », in de Boysson-Bardies B., de Schonen S., Juszyk P., MacNeilage P., Morton J. (eds), *Developmental Neurocognition: Speech and Face Processing in the First Year of Life*, Dordrecht, Kluwer, 1993, pp. 51-62.
- [36] SERGENT (J.), OHTA (S.), MACDONALD (B.): « Functional neuroanatomy of face and object processing. A positron emission tomography study », *Brain*, 115, 1992, pp. 15-36.
- [37] SERGENT (J.): « Structural processing of faces », in Young A.W., Ellis H.D. (eds), *Handbook of Research on Face Processing*, Oxford, North-Holland, 1989a, pp. 57-91.

- [38] SERGENT (J.) : « Ontogenesis and microgenesis of face perception », *European Bulletin of Cognitive Psychology (CPC)*, 9, 1989b, pp. 123-128.
- [39] SLATER (A.M.) : « Visual perceptual abilities at birth: implications for face perception », in de Boysson-Bardies B., de Schonen S., Jusczyk P., MacNeilage P., Morton J. (eds), *Developmental Neurocognition: Speech and Face Processing in the First Year of Life*, Dordrecht, Kluwer, 1993, pp. 125-134.
- [40] STILES (J.) : « Plasticity and development: evidence from children with early occurring focal brain injury », in Julesz B, Kovacs I. (eds), *Maturational Windows and Adult Cortical Plasticity*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. XXIV, Addison-Wesley, 1995, pp. 1-20.
- [41] STILES-DAVIS (J.), JANOWSKI (J.), ENGEL (M.), NASS (R.) : « Drawing ability in four young children with congenital unilateral brain lesions », *Neuropsychologia*, 26, 1988, pp. 359-371.
- [42] STILES, NASS : « Spatial grouping activity in young children with congenital right or left hemisphere brain injury », *Brain and Cognition*, 15, 1991, pp. 201-222.
- [43] SUTER (P.S.), SUTER (S.), ROESSLER (J.S.), PARKER (K.L.), ARMSTRONG (C.A.), POWERS (J.C.) : « Spatial-frequency-tuned channels in early infancy: VEP evidence? », *Vision Research*, 34, 1994, pp. 737-745.
- [44] TURKEWITZ (G.) : « Face processing as a fundamental feature of development », in Young A., Ellis H.D. (eds), *Handbook of Research on Face Processing*, Amsterdam, North Holland, 1989, pp. 401-404.
- [45] TURKEWITZ (G.) : « The origins of differential hemispheric strategies for information processing in the relationships between voice and face perception », in de Boysson-Bardies B., de Schonen S., Jusczyk P., MacNeilage P., Morton J. (eds), *Developmental Neurocognition: Speech and Face Processing in the First Year of Life*, Dordrecht, Kluwer, 1993, pp. 165-170.
- [46] VALENZA (E.), SIMION (F.), MACCHI (N.), CASSIA (V.), UMLTA (C.) : « Face preference at birth », Paper given at the First European Research Conference on The Development of Sensory, Motor and Cognitive Capabilities in Early Infancy, Maratea, october 1994.

Développement visuel : modèles neurobiologiques des fonctions visuelles

L. BOUTKHIL, I. OTTO, Y. BURNOD

Neurosciences et modélisation, U.P.M.C, Paris VI, Paris, France.

RÉSUMÉ : *Développement visuel : modèles neurobiologiques des fonctions visuelles.*

L'objectif est de proposer un modèle neuronal de construction des capacités de reconnaissance visuelle invariante par le nourrisson de 0 à 6 mois. Nous tentons d'interpréter en termes computationnels (traitement de l'information) les différents apprentissages qui ont lieu par rapport au substrat neuronal, et ce de manière systématique. Notre approche consiste donc à interpréter les données de la psychologie du développement visuel en termes de mécanismes neuronaux dans le cadre conceptuel de la théorie des réseaux connexionnistes. L'architecture et les propriétés du modèle connexionniste proposé sont inspirées des propriétés connues en neurobiologie du cortex cérébral : architecture entre les aires corticales assurant une coopération étroite entre plusieurs traitements parallèles, maillage neuronal du tissu cortical permettant un contrôle précis des interactions spatiales et temporelles, maturation progressive « guidant » les apprentissages successifs. Dans le cadre de ce réseau connexionniste, on s'attache au problème de l'acquisition de l'invariance visuelle que l'on décompose en une suite d'apprentissages progressifs à partir des données développementales avec la mise en place des relations fonctionnelles qui peuvent permettre la constance perceptive.

Mots clés : Neurosciences computationnelles — Modèles connexionnistes coopératifs — Apprentissage — Développement perceptif du nourrisson — Invariances perceptuelles.

SUMMARY: *Visual development: a neuro-biological model of ocular function.*

Our aim is to propose a neuronal model of the construction of invariant visual recognition ability by the newborn from birth to six months. We tempt to interpret in computational terms (information processing) the different learning steps that take place relatively to the neural substrate, and this systematically. Our approach consists therefore to interpret the developmental psychological data concerning vision in terms of neuronal mechanisms within the conceptual framework of the theory of connexionnist nets. The architecture and properties of the connexionnist model proposed are inspired from the known properties in neurobiology of the cerebral cortex : architecture between cortical areas allowing a narrow cooperation between several parallel processings, neuronal networking of the cortical tissue allowing an accurate control of spatial and temporal interactions, progressive maturation « guiding » the successive learnings. Within this connexionnist framework, the acquisition of invariance is decomposed in a set of progressive learning stages in direct correspondence with developmental data with the setting of functional relations which could enable perceptive constancy.

Key words: Computational neurosciences — Connectionnist computational modelling — Cooperative connexionnist models — Learning — Perceptiv development of infant — Perceptual invariances.

DÉVELOPPEMENT VISUEL ET NEUROSCIENCES

Les changements les plus importants au sein du système visuel de l'enfant interviennent pendant la première année de la vie. Les composantes optiques et neurologiques continuent de se développer bien après la naissance : citons, par exemple, la maturation de la rétine qui conditionne l'acuité visuelle du nourrisson, la myélinisation du nerf optique qui assure la transmission du message visuel, la maturation des neurones du cortex visuel qui extrait les caractéristiques élémentaires de l'image, comme les contours ou les courbures.

Le développement des capacités visuelles du jeune enfant apparaît ainsi comme la conséquence d'une étroite interaction entre un processus de maturation nerveuse et un processus d'apprentissage par interaction avec l'environnement. Or, les recherches en neurobiologie permettent aujourd'hui de mieux comprendre la relation entre le substrat nerveux et le traitement de l'information visuelle (voir par exemple Tanaka, 1993). Etant donné la richesse des données psychologiques (Aslin et al., 1988 ; Banks et al., 1987) et un certain nombre de repères neurobiologiques concernant le nourrisson, on peut tenter de comprendre l'aspect neuronal de l'état initial des compétences du nourrisson, ainsi que le rôle de la maturation nerveuse dans le contrôle de ses apprentissages (voir en particulier Johnson, 1995). L'approche est d'abord synthétique et théorique. Ainsi les théories de Bronson (1974) et Johnson (1990) tentent d'établir une relation causale entre la maturation postnatale du système nerveux et le développement des capacités visuelles.

Un premier niveau d'analyse consiste à relier l'horloge de maturation de chaque grande structure nerveuse (colliculus, hippocampe, ganglion de la base, cortex cérébral, cortex cérébelleux) avec l'apparition des différentes capacités comportementales : ainsi, le colliculus permet d'orienter le regard du nourrisson vers des stimuli visuels avant la maturation du cortex cérébral, qui peut donc apprendre à partir d'un comportement exploratoire initial (Johnson, 1990). Un niveau plus fin d'analyse consiste à considérer les données sur les différentes connexions à l'intérieur de chaque structure nerveuse, telles que les données concernant la maturation des différentes couches et aires corticales (Johnson, 1990). Un aspect important de cette démarche est d'analyser les avantages adaptatifs que provoquent, de façon paradoxale, les limitations sensorielles dues à l'immaturité des organes récepteurs (Turkewitz, Kenny, 1985). Ainsi, par analogie avec les systèmes dynamiques, on peut considérer que la maturation biologique structure l'apprentissage en libérant l'un après l'autre ou concomitamment les différents degrés de liberté sensorielle.

DÉVELOPPEMENT VISUEL ET MODÈLES CONNEXIONNISTES

Chaque structure nerveuse est composée d'un très grand nombre de neurones (par exemple de l'ordre de 10^{10} pour le cortex cérébral), et chaque neurone a des propriétés de plasticité qui lui permettent de se spécialiser en fonction

des informations particulières qu'il reçoit sur les 10^4 synapses de son arbre dendritique. Pour comprendre de façon fine la relation entre maturation nerveuse et comportement, il est donc nécessaire de comprendre les capacités de traitement et d'apprentissage de larges ensembles de neurones et de leur réseau de connexions pour reconnaître un stimulus sur la rétine, pour reconnaître un objet ou un visage de façon invariante, indépendamment des mouvements ou de la position de l'œil, pour saisir et manipuler un objet indépendamment des diversités de formes et de positions, etc. Un cadre conceptuel intéressant est celui fourni par les modèles de traitement de l'information inspirés du fonctionnement du système nerveux regroupés sous le nom générique de « réseaux de neurones » ou modèles connexionnistes (Rumelhart et al., 1986). Ces modèles tentent de reproduire de telles capacités à partir d'un ensemble d'unités de traitement très simples, appelées par analogie « neurones ». Ces unités de traitement disposent de paramètres qui peuvent être modifiés par l'expérience propre à chacune et qui sont par analogie appelés « poids synaptiques ». Ces modèles mettent en valeur les avantages et particularités des systèmes nerveux biologiques (parallélisme massif, capacités d'apprentissage, mémoire distribuée, résistance aux dégradations...).

Les propriétés de ces modèles connexionnistes (Rumelhart et al., 1986) sont :

- une *représentation distribuée*, conférant des propriétés de robustesse du résultat du traitement vis-à-vis de données incomplètes, de résistance à la dégradation lors de la perte d'unités de traitement, et de tolérance au bruit ;
- un *apprentissage à partir des exemples* d'une fonction de traitement de l'information ;
- une *auto-organisation* permettant de faire émerger des apprentissages au niveau comportemental à partir d'une population d'unités possédant toutes les mêmes fonctions très simples, et ce dernier effet sans avoir à spécifier de « but », de « stimulus inconditionnel » ou de catégorie *a priori* que l'on veut reconnaître (pas besoin de « professeur ») ;
- une *généralisation* des apprentissages à des situations jamais vues auparavant.

Bates et Elman (1993) défendent l'utilité du cadre théorique des modèles connexionnistes comme outil de compréhension unifié du développement du système nerveux et des apprentissages cognitifs. L'un des apports de tels modèles serait de mieux comprendre comment les différentes structures nerveuses pré-câblées à la naissance peuvent influencer l'acquisition des connaissances (on pense aux propriétés du réseau nerveux qui font du cerveau humain une « machine à apprendre le langage... »). Bates et Elman (1993) montrent comment de tels modèles connexionnistes pourraient permettre de formaliser les mécanismes d'épistémologie génétique décrits par Piaget, tels que les processus d'équilibration dénommés *accommodation* et *d'assimilation*.

Il est intéressant de constater que ce sont les apprentissages sensorimoteurs effectués par l'enfant pendant les six premiers mois de la vie qui sont les plus difficiles à comprendre et reproduire en intelligence artificielle et en robotique (apprendre à attraper un objet et le manipuler, par exemple), alors que les apprentissages plus tardifs, « symboliques » et liés à la logique, sont maintenant souvent mieux réalisés par les machines. Les réseaux de neurones permettent de

faire un pas de plus vers la compréhension des apprentissages précoces de l'enfant très largement « sub-symboliques ». Malgré ces progrès, on n'est pas encore parvenu à reproduire par réseau de neurones artificiel les capacités de reconnaissance et de manipulation d'un enfant de 6 mois.

L'une des limitations actuelles des modèles connexionnistes vient surtout du réductionnisme très fort de la démarche (d'ailleurs inhérent à toute démarche de modélisation) et de la focalisation portant sur des apprentissages très restreints et des réseaux de capacités limitées, alors que l'une des grandes forces du cerveau humain vient de sa très grande richesse de connexions et du cumul dans le temps d'une grande variété d'apprentissages multimodaux.

MODÉLISATION DU RÉSEAU CORTICAL, MATURATION ET APPRENTISSAGE

Pour prendre en compte la richesse du substrat biologique et la richesse d'apprentissages du nourrisson, on peut adopter une démarche de sciences cognitives, associant neurosciences, psychologie expérimentale, clinique et modélisation connexionniste, pour tenter de représenter le développement nerveux, sensorimoteur et cognitif dans sa continuité et son unicité. On peut commencer par le développement de fonctions déjà bien balisées en neurosciences et connexionnisme, comme la reconnaissance visuelle invariante ou la préhension visuo-guidée. On se fonde sur un modèle simplifié des aires corticales visuelles et de leurs interactions (Otto et al, 1992) et on s'intéresse à l'enchaînement causal généré par ce réseau, liant par exemple le développement de l'exploration oculaire et celui des capacités perceptives (Boutkhil et Burnod, 1992).

Traitement de l'information par des populations de neurones corticaux

La première hypothèse est que tous les apprentissages et traitements que l'on représente peuvent être effectués par des populations de neurones possédant tous des mécanismes simples et similaires de plasticité. Ainsi, dans une aire visuelle primaire, chaque cellule peut acquérir une sensibilité spécifique pour une petite portion du champ visuel, et, dans cette fenêtre, pour l'orientation, la courbure et la couleur d'un stimulus. En présence d'une scène naturelle, ce sont des populations très larges de neurones qui vont réagir et qui vont, à partir des connexions cortico-colliculaires, influencer collectivement la direction du regard. L'attractivité de chaque stimulus, un visage par exemple, dépendra donc d'abord de la distribution des différentes sensibilités neuronales dans la population (sensibilité aux courbures par exemple, à différentes échelles autorisées par la maturation rétinienne), puis de la façon dont les différents neurones cumulent leurs activations individuelles en une décision collective (voir, par exemple, Marchal, 1993 ; Kochlin et Burnod, 1994).

Si l'on considère attentivement la structure neuronale du cortex, on voit que l'unité de traitement locale qui permet d'apprendre n'est pas simplement un neurone, mais un petit réseau local formant un module stéréotypé, la colonne corticale, similaire sur l'ensemble des aires corticales (revue

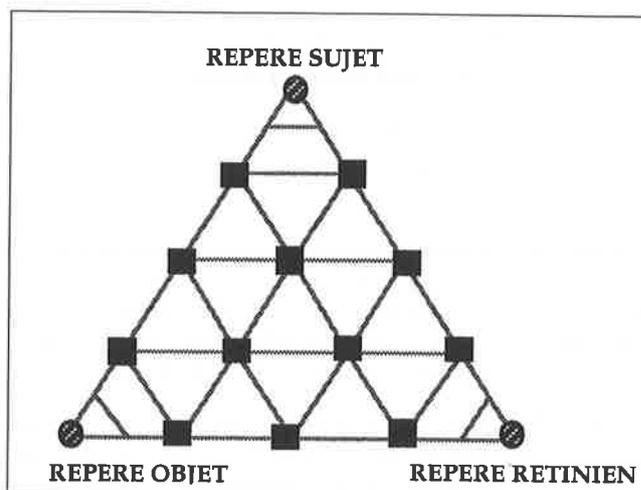


Figure 1.A. Le réseau cortical : chaque nœud représenté par un petit carré noir correspond à une carte corticale.

dans Mountcastle, 1978). Les différents types de neurones et les différentes connexions s'organisent en couches, parallèles à la surface, et les différentes informations traitées par ces couches sont intégrées par des neurones pyramidaux perpendiculaires à la surface. On peut modéliser un tel module comme une structure cristalline répétée sur toute la surface du manteau cortical, avec des règles d'activation, de propagation et d'apprentissage similaires pour l'ensemble des aires corticales (Burnod, 1988 ; Alexandre et al., 1990). Ce n'est que l'origine des entrées de chaque colonne ainsi que la destination de ses sorties qui, par apprentissage, vont faire émerger une spécialisation fonctionnelle propre à chacune.

Apprentissages guidés par la structure du réseau cortical

La deuxième hypothèse de base est que les apprentissages se mettent en place de façon progressive dans les populations de neurones sur les différentes cartes corticales, à partir des grandes combinaisons organisées par le réseau cortical entre les différents types d'informations sensorielles et motrices. Les régions du cortex impliquées dans la reconnaissance invariante et la préhension visuo-guidée peuvent être modélisées par un réseau en triangle (figure 1.A). Chacun des pôles du triangle correspond à un « système de coordonnées » ou repère des informations sensorimotrices : (1) le repère rétinien (pôle occipital du cortex) où les cartes corticales représentent les informations visuelles en provenance de la rétine ; (2) le repère objet où les cartes corticales représentent les objets visuels sous forme de prototypes invariants (cortex temporal antérieur) ; (3) le repère sujet où les cartes corticales représentent les informations motrices, tactiles et proprioceptives. Les grandes fonctions comportementales telles que la reconnaissance visuelle invariante et la préhension visuo-guidée sont effectuées par des ensembles de cartes corticales formant des graphes à l'intérieur de ce réseau (de type réseau multicouche dans les modèles connexionnistes) :

— La reconnaissance visuelle invariante est effectuée par un graphe en Y, avec un tronc commun issu du repère rétinien et deux branches, l'une formée par les aires corti-

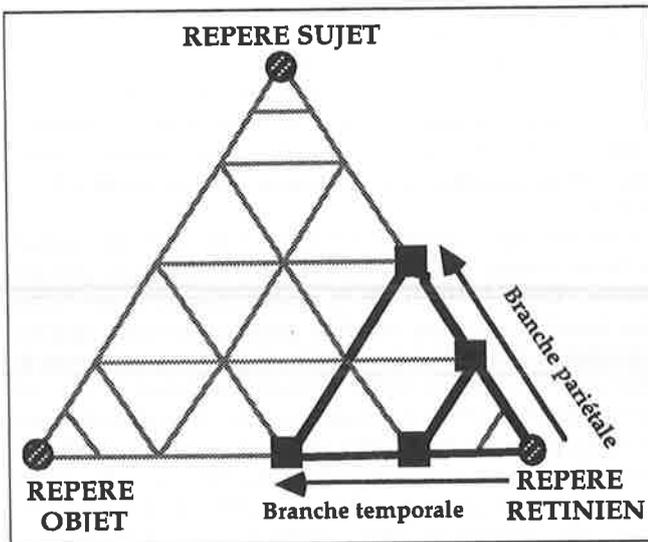


Figure 1.B. Réseau fonctionnel impliqué dans la reconnaissance visuelle invariante.

cales temporales en direction du repère objet, l'autre formée par les aires corticales pariétales en direction du repère sujet (figure 1.B). La branche « pariétale » permet la reconnaissance de mouvements et de positions relatives et répond donc à la question « Où ? » ; la branche « temporale » permet la reconnaissance des caractéristiques locales et des configurations, et répond donc à la question « Quoi ? » (Mishkin, Ungerleider, 1982).

— La *préhension manuelle sous contrôle visuel* est un Y inversé où deux branches du réseau, l'une en provenance du repère rétinien, l'autre du repère sujet, convergent vers une commande motrice unique, de projection de la main vers l'objet (figure 1.C).

Les cartes corticales qui forment ce triangle sont connectées par des voies de traitement qui permettent de faire passer les informations d'un repère à un autre. Ce sont des voies bidirectionnelles, chaque repère utilisant les informations en provenance des autres repères. A l'intérieur de chaque carte, les circuits neuronaux qui forment les colonnes combinent

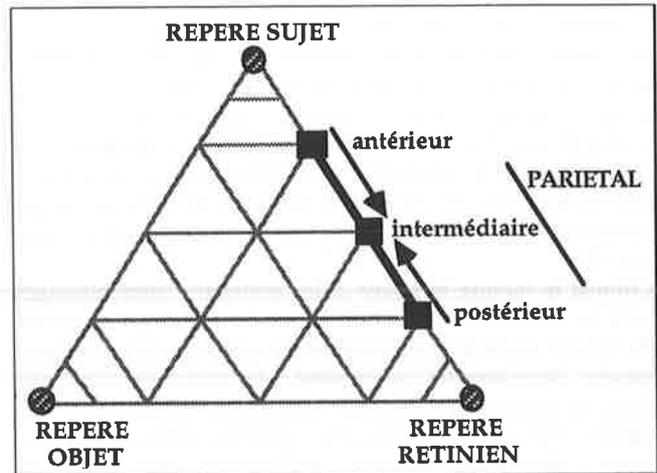


Figure 1.C. Réseau fonctionnel impliqué dans la préhension visuo-guidée.

ainsi plusieurs types d'informations dans leurs couches de connexion. Ainsi, dans la branche temporale du réseau entre le pôle rétinien et le pôle objet, les colonnes combinent des informations rétinienne par des connexions montantes en provenance du pôle visuel avec des prédictions sur la nature de l'objet par des connexions descendantes en provenance du pôle objet. Les colonnes reçoivent aussi des informations en provenance des autres flux d'information, ainsi que des informations des autres colonnes de la même carte par des connexions latérales.

Ces différents flux et connexions ne servent pas seulement pour le traitement de l'information en mode opérationnel chez l'adulte, ils sont aussi fondamentaux pour l'apprentissage local sont les mêmes pour toutes les colonnes, et la spécialisation que va acquérir chaque colonne ne dépend que des informations localement disponibles, et donc des combinaisons effectuées par chaque carte corticale sur le réseau. Chaque carte corticale est un nœud sur le réseau, et chaque couche de connexion des colonnes de cette carte permet un nouveau type d'apprentissage par un nouveau type de

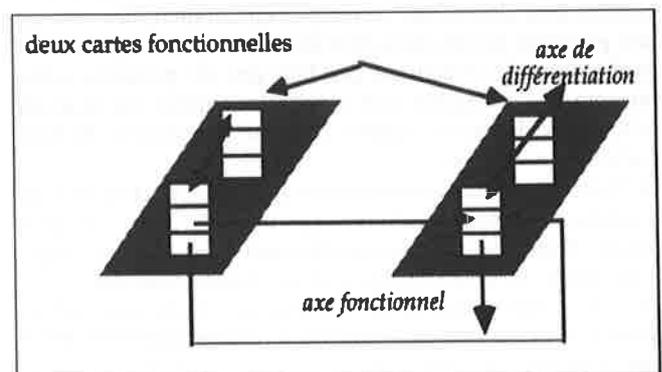
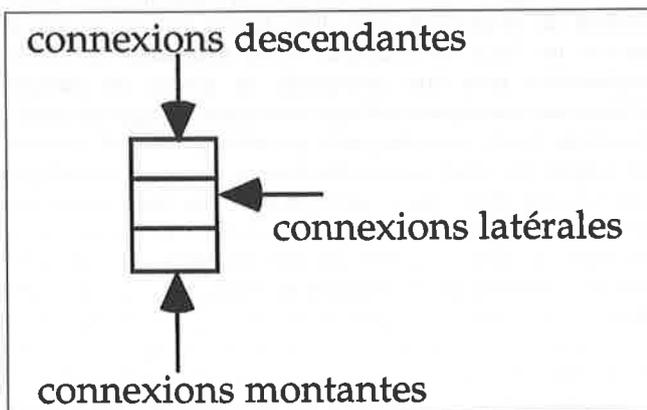


Figure 2. A gauche : l'unité de traitement « colonne corticale » et ses différentes couches.

A droite : deux cartes corticales sont représentées en gris avec deux unités de traitement sur chacune (« colonne corticale » représentée à gauche avec ses différentes connexions). L'axe fonctionnel (vertical) correspond à l'apparition d'une nouvelle fonction suite à la mise en route d'une interaction nouvelle entre deux couches d'une même unité de traitement. L'axe de différenciation (oblique) décrit les apprentissages qui ont lieu au sein de la même carte corticale : il représente la distribution des propriétés de sélectivité dans la carte après apprentissage.

combinaison des informations en provenance des trois pôles du réseau. On peut donc analyser les capacités comportementales générées par chacun de ces apprentissages, en relation directe avec les nouvelles compétences de l'enfant à chaque âge. Le modèle de réseau cortical apparaît ainsi comme une grille d'analyse du développement sensorimoteur du nouveau-né, où chaque nœud de la grille et chaque connexion sur ce nœud rythment les apprentissages successifs.

Comme le montre la *figure 2*, les nouveaux apprentissages vont se faire selon deux dimensions liées à la nature même du réseau cortical. La première dimension, que l'on peut appeler fonctionnelle, correspond à la mise en place d'une nouvelle interaction entre deux connexions différentes d'une même carte, et donc entre deux couches différentes d'une même colonne (par exemple combinaison entre des informations visuelles et motrices). Ainsi, une nouvelle fonction apparaît, par la mise en route d'une nouvelle relation sur une carte, qui à son tour génère de nouvelles informations pour les autres cartes. Le cortex ayant une centaine de cartes, avec chacune au moins cinq types de connexions, il y a donc au moins 500 nouvelles fonctions. La deuxième dimension, que l'on peut appeler une dimension de différenciation, correspond aux différents apprentissages de même type permis par les différents groupes neuronaux d'une même carte. On peut estimer à au moins 10^4 le nombre de ces groupes sur chaque carte, formés chacun de 10^4 neurones. Il existe donc au moins 10^4 différenciations possibles de chaque type d'apprentissage (nombre de groupes de neurones), chaque possibilité pouvant être apprise avec les 10^8 synapses des 10^4 neurones du groupe.

DÉVELOPPEMENT DES INVARIANTS PERCEPTIFS VISUELS

Le système visuel peut reconnaître des objets même lorsque leur projection rétinienne est considérablement modifiée par des variations de taille, position ou angle de vue. Les données de psychologie expérimentale montrent que cette propriété d'invariance perceptive est acquise durant les six premiers mois. À 6 mois, les aspects successifs d'une même personne (ou d'un même objet) qui se déplacent sont alors reliés et articulés en une même perception identifiée comme une personne ou un objet. Si l'on observe le comportement exploratoire du nourrisson pendant ces six premiers mois, on note une évolution tout à fait particulière qui pourrait refléter les différentes étapes de cette acquisition de l'invariance perceptive.

Si l'on considère des unités de traitement à couches de type « colonne corticale », notre hypothèse de base est qu'à chaque étape de développement les nouveaux apprentissages sont dus à la mise en place d'une interaction spécifique entre les couches des colonnes, chaque couche étant reliée à une aire de traitement différente. C'est sur cette hypothèse que nous nous basons pour représenter l'apprentissage progressif des invariants visuels. Pour les figures qui représentent les étapes (*figure 3*), on s'attache principalement aux unités de traitement de la carte associative temporale (CAT) pour illustrer les différentes interactions qui ont lieu à chaque étape.

Étape 1. De l'exploration aléatoire à la fixation sur un point caractéristique de l'objet (voir *figure 3.1*)

À la naissance, en présence d'un champ uniforme ou en l'absence de lumière, il existe des mouvements oculaires spontanés. En présence d'un stimulus, le regard peut s'orienter vers ce stimulus et le poursuivre s'il est mobile (Aslin, 1987).

Le nourrisson a tendance à fixer ou poursuivre des stimuli à haute densité de contour, avec des fréquences spatiales basses (Karmel, 1969). Or la modélisation des sensibilités des neurones des aires visuelles primaires de types simples, complexes et « end-stop » montrent que les populations de neurones des aires visuelles primaires préfèrent de tels stimuli (Marchal, 1993). Le modèle fournit un résultat similaire à l'interprétation de Haith (1985) qui voit les premières saccades comme un système de recherche active des points caractéristiques ayant pour but de maximiser l'activité corticale du nourrisson. Deux apprentissages peuvent alors s'effectuer sur cette première boucle visuo-motrice : un réglage de gain qui permet de calibrer la commande de la saccade vers le stimulus ; une auto-organisation qui stabilise les sensibilités d'orientation et de courbure des neurones des aires visuelles primaires, similaire à celle qui a été démontrée chez le chaton (Buisseret et al., 1978).

Lorsqu'on modélise une telle boucle, le regard a tendance à se fixer sur le stimulus qui l'attire, de façon tout à fait similaire à « l'attention obligatoire » observée chez le nourrisson entre 1 et 2 mois. L'un des grands avantages de cette fixation obligatoire est que les populations de neurones des cartes visuelles associatives temporales peuvent apprendre par auto-organisation les configurations locales de caractéristiques élémentaires des stimuli les plus attractifs. La structure du réseau cortical favorise cet apprentissage dans les connexions montantes de la carte visuelle primaire vers les cartes associatives.

Étape 2. De l'exploration locale entre deux points caractéristiques à la reconnaissance d'un objet sous un angle d'observation donné (voir *figure 3.2*)

L'enregistrement oculaire du nourrisson entre 1 et 2 mois montre le passage de la fixation obligatoire sur un seul point caractéristique (vertex d'un triangle par exemple) à un mouvement de va-et-vient entre deux points caractéristiques à travers un front de contraste. Cette différence de mode exploratoire peut être interprétée au niveau du modèle comme une conséquence directe des apprentissages de configurations locales permise par la première période de fixation prolongée. En effet, la reconnaissance d'une telle configuration locale déjà apprise peut générer une forte activation des populations neuronales qui ont appris cette forme. Cette activation génère en retour un effet inhibiteur qui ouvre la boucle visuomotrice de fixation prolongée. Le regard peut alors se fixer plus rapidement sur un second point caractéristique : le modèle prédit ainsi un mouvement de va-et-vient entre deux points caractéristiques d'un même objet. Le résultat de ce va-et-vient est de favoriser un nouvel apprentissage à partir des connexions montantes des cartes associatives temporales (qui avaient reconnu chaque configuration locale dans un repère rétinien) : en effet les populations de neurones des cartes sémantiques (dernier niveau de traitement) qui reçoivent ces informations peuvent mémo-

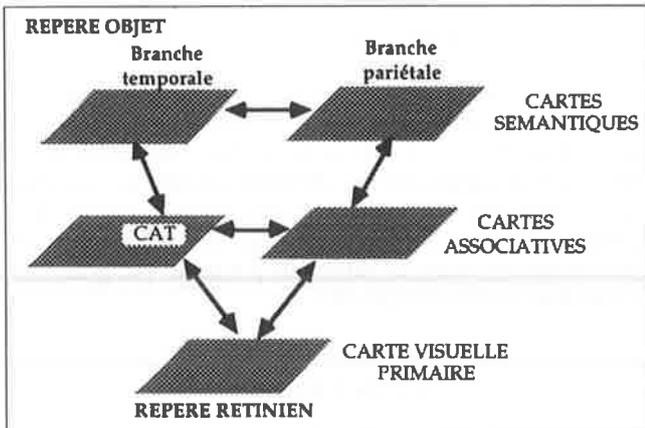


Figure 3.A.

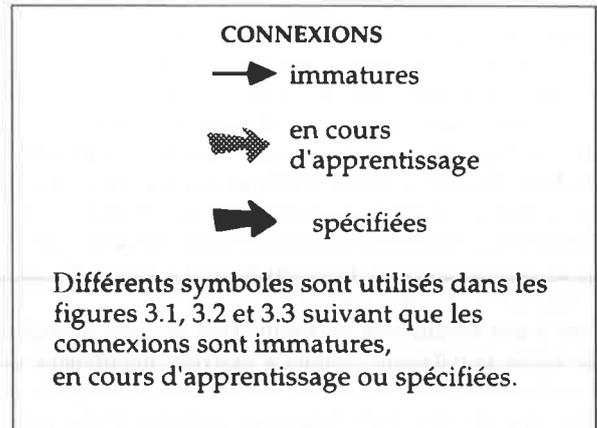


Figure 3.B.

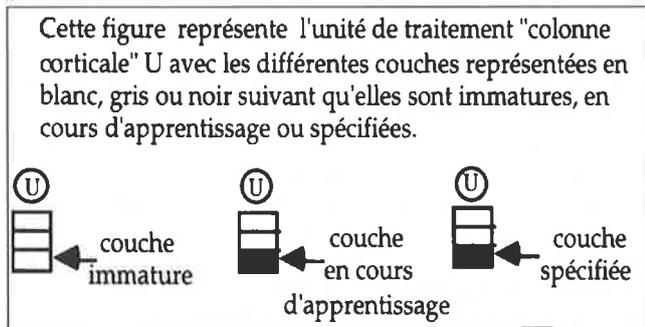


Figure 3.1 ►

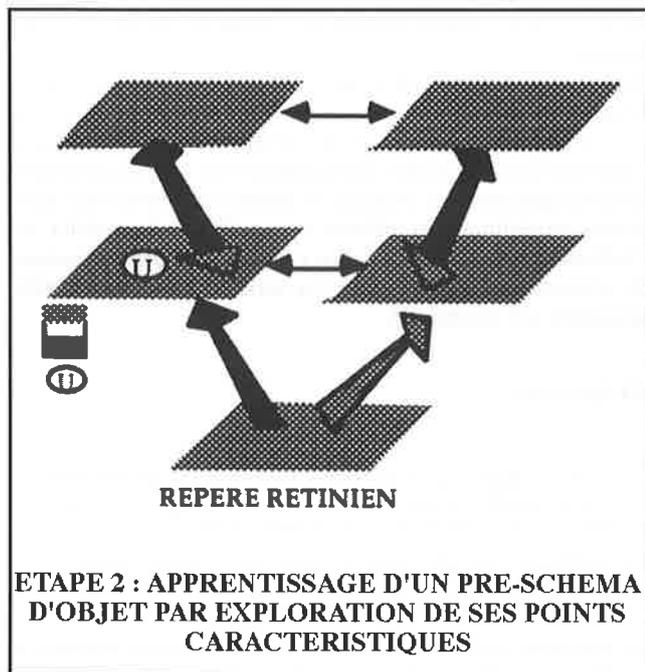
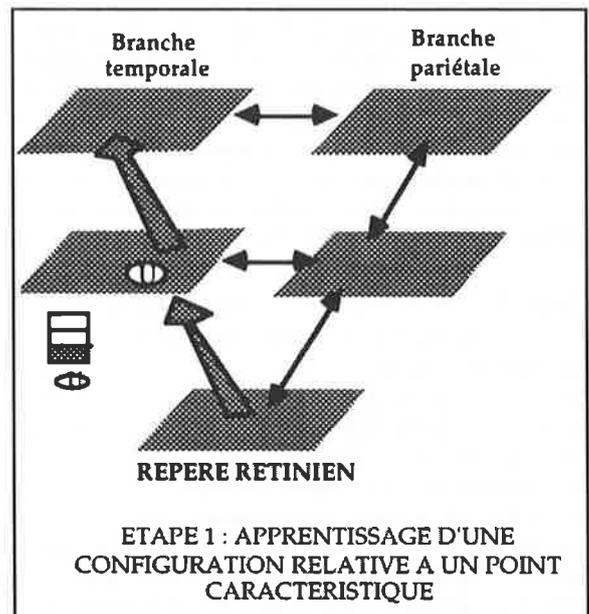


Figure 3.2

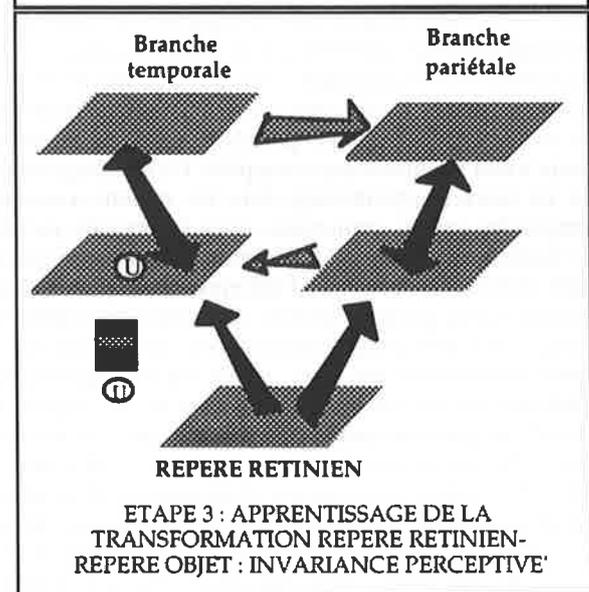


Figure 3.3

Figure 3. Le réseau fonctionnel en Y impliqué dans la reconnaissance visuelle invariante est représenté sur la partie A avec les dénominations des cartes à chaque niveau de traitement. A chaque étape (figures 3.1, 3.2, 3.3), une unité de traitement U appartenant à la carte associative temporelle (CAT) est représentée avec l'état de ses connexions suivant l'apprentissage qui a lieu.

riser à la fois les différents points caractéristiques d'un même objet, ainsi que les relations spatiales entre ces points, signalées par les mouvements oculaires de va-et-vient. Sur les cartes sémantiques, un mécanisme d'auto-organisation peut ainsi spécialiser des groupes de neurones pour représenter des configurations globales qui sont des « pré-schémas » d'objet. Ces pré-schémas stockent à la fois la connaissance de chaque point caractéristique de l'objet dans les connexions montantes vers chaque neurone de la population, et la connaissance de la configuration d'ensemble dans les connexions latérales entre ces neurones.

Grâce aux connexions en retour vers les aires associatives, de telles populations « objet » peuvent maintenant guider l'exploration vers les autres points caractéristiques, même plus fins (de plus forte fréquence spatiale). Cette influence descendante prédit un mode d'exploration de la périphérie vers l'intérieur d'un objet, similaire à celui des nourrissons de 2 mois qui passent de l'exploration du contour (effet d'« externalité », Milewski, 1976, cité par Banks et Salapatek, 1987) à l'exploration des informations plus internes à la forme. Ce mode d'apprentissage de la structure d'un objet prédit également que les trajets oculaires seront relativement similaires lors de la présentation répétée d'un stimulus complexe, ce qui semble vérifié expérimentalement (Miller, 1972 ; Bronson, 1990).

Étape 3 : De la mise en correspondance de deux vues successives d'un même objet à l'invariance perceptive (voir figure 3.3)

Les données de la psychologie du développement mettent en évidence l'apprentissage de l'invariance perceptive à partir de trois mois, quelle que soit la transformation effectuée (translation, homothétie, rotation).

Le modèle de réseau cortical montre que l'invariance en translation peut être d'abord obtenue par une coopération entre les populations de neurones des deux branches pariétales et temporales (Otto et al., 1992). Lorsque les populations des aires sémantiques temporales ne sont que faiblement activées (signifiant que la reconnaissance n'est que partielle), elles « appellent » les populations de neurones des cartes pariétales qui peuvent commander un mouvement de recentrage des éléments préactivés dans la zone fovéale, jusqu'à leur reconnaissance complète. Ce recadrage va générer un nouvel apprentissage dans les régions associatives temporales sur les connexions avec la branche pariétale : cet apprentissage relie : 1) l'information montante partielle (non encore reconnue) ; 2) l'information en provenance du pariétal sur la position globale de l'objet par rapport à la fovéa ; 3) l'information descendante sur l'objet reconnu après mouvement oculaire. Après un tel apprentissage, l'information montante partielle associée à l'information globale de position peut être suffisante pour la reconnaissance. Le mécanisme fonctionnel qui en résulte peut être considéré comme un recadrage dynamique de l'information sur la carte associative temporale sans nécessiter de mouvement oculaire effectif de recadrage, similaire au mécanisme de « décalage » proposé sur des bases neurophysiologiques par Anderson et Van Essen (1987). Des mécanismes similaires peuvent permettre de modéliser les invariances en homothétie et en rotation grâce à l'association entre une information montante partielle et une information

de position globale venant de la branche pariétale (ici, respectivement sur la taille et l'orientation de l'objet).

La construction d'une représentation invariante d'un objet résulte ainsi au moins de l'effet cumulé de trois apprentissages : 1) l'apprentissage des différents points caractéristiques d'un objet et de leur configuration sous un point de vue ; 2) l'apprentissage des différents points de vue d'un même objet par les populations qui mémorisent les pré-schémas d'objet ; 3) l'apprentissage des prédictions des transformations entre les différents points de vue grâce aux connexions pariéto-temporales.

CONCLUSION

Nous avons donc exposé les principes généraux de notre démarche qui consiste à interpréter avec un « œil de modélisateur » les résultats de la psychologie et de la neuropsychologie sur le développement des capacités visuelles chez l'enfant. Notre objectif est de proposer, en nous plaçant dans le cadre conceptuel de la théorie des réseaux connexionnistes, un modèle neuronal de construction des capacités de reconnaissance visuelle invariante chez le nourrisson de 0 à 6 mois. Le comportement de l'enfant à chaque instant révèle l'apprentissage qui a lieu au niveau des circuits neuronaux sous-jacents. Les différents apprentissages sont interprétés en termes computationnels (traitement de l'information) et rapportés au substrat neuronal qui les soutient, et ce, de façon systématique. L'hypothèse de base sur laquelle nous travaillons est que les apprentissages vont se mettre en place de façon progressive à partir des combinaisons organisées par les circuits corticaux. La connaissance du cortex cérébral fournit ainsi une base anatomophysiological à la fois spatiale (les différentes aires corticales et leurs connexions) et temporelle (les étapes de maturation) à l'interprétation des données sur le développement.

Comme disait René Couteaux, « la modélisation permet de mesurer la distance entre ce que l'on sait et ce que l'on croit savoir ». Un tel modèle ne présente donc d'intérêt que s'il donne lieu à de réelles interactions avec les psychologues du développement et permet de mettre en œuvre des protocoles expérimentaux offrant la possibilité de valider ou d'infirmer les hypothèses faites en matière d'apprentissage. Un aller-retour continu entre la modélisation et l'expérimentation est nécessaire.

RÉFÉRENCES

- [1] ALEXANDRE (F.), GUYOT (F.), HATON (J.P.), BURNOD (Y.) : « The cortical column, a new processing unit for multilayered network », *Neural Networks*, vol. 4, 1990, pp. 15-25.
- [2] ANDERSON (C.H.), VAN ESSEN (D.C.) : Shifter circuits : « A computational strategy for dynamic aspects of visual processing », *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 84, 1987, pp. 6297-6301.
- [3] ASLIN (R.A.) : « Motor aspects of visual development in infancy », *Handbook of Infant Perception*, P. Salapatek and B. Cohen eds., vol. 1, New York : Academic Press, 1987, pp. 43-113.
- [4] ASLIN (N.A.), SMITH (L.-S.) : « Perceptual Development », in *Annual Review of Psychology*, Annual Reviews Inc. eds, 39, 1988, pp. 435-473.

- [5] BANKS (M.S.), DANNEMILLER (J.L.): « Infant visual psychophysics, in: *Handbook of Infant perception*, P. Salapatek and B. Cohen eds, New York, Academic Press, 1987, pp. 115-184.
- [6] BANKS (M.S.), SALAPATEK (P.): « Infant Visual Perception », in: *Handbook of child Psychology*, Vol. 2, *Infancy and Developmental Psychobiology*, MM. Haith & J.J. Campos eds, P.H. Mussen (Serie ed.), New York, Wiley, 1983, pp. 435-572.
- [7] BATES (A.E.), ELMAN (J.L.): « Connectionism and the study of change », in M.H. Johnson, *Brain Development and Cognition A Reader*, Oxford, Blackwell, 1993.
- [8] BOUTKHIL (L.), BURNOD (Y.): « Modélisation par réseaux de neurones de l'acquisition de la constance perceptive chez le jeune enfant », *Association pour la recherche cognitive*, Nancy, mars 1992, pp. 159-184.
- [9] BRONSON (G.W.): « The post-natal growth of visual capacity », *Child Development*, 45, 1974, pp. 873-890.
- [10] BRONSON (G.W.): « Changes in infants' visual scanning across the 2-to 14- week age period », *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 1990, pp. 101-125.
- [11] BUISSERET (P.), GARY-BOBO (E.), IMBERT (M.): « Ocular motility and recovery of orientational properties of visual cortical neurones in dark-reared kittens », *Nature*, 272, 5656, 1978, pp. 816-817.
- [12] BURNOD (Y.): « An adaptive neural network: the cerebral cortex », *Prentice Hall*, 1988.
- [13] CARON (A.J.), CARON (R.F.), CARLSON (V.R.): « Infant perception of the invariant shape of objects varying in slant », *Child Development*, 50, 1979, pp. 716-721.
- [14] GIBSON, OWSLEY, WALKER & MEGAN-NYCE : cités par Banks et Salapatek, 1983 ; Caron, Caron et Carlson, 1979 ; Milewski, 1979.
- [15] HAITH (M.M.): « Visual exploration and relative fixation time in early infancy », in: *Comportements n°3*, « Étudier l'enfant de la naissance à trois ans », sous la direction de Baudonnière P.M., Éditions du CNRS, 1985, pp. 69-92.
- [16] JOHNSON (M.H.): « Cortical maturation and the development of visual attention in early infancy », *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 2, number 2, 1990, pp. 81-95.
- [17] JOHNSON (M.H.): « The development of visual attention: a cognitive neuroscience perspective », in M.S. Gazzaniga, *The Cognitive Neurosciences*, Cambridge, Ma : MIT/Bradford Books, 1995.
- [18] KARMELE (B.Z.): « The effects of age, complexity, and amount of contour on pattern preferences in human infants », *Journal of Experimental Child Psychology*, 7, 1969, pp. 339-354.
- [19] KÄECHLIN (E.), BURNOD (Y.): « Dual population coding in the neocortex : a model of interaction between representation and attention in the visual cortex », *Journal of Cognitive Neurosciences*, in press, 1994.
- [20] MARCHAL : « Coopération entre la reconnaissance et l'exploration : modélisation fonctionnelle des aires corticales visuelles », Thèse de doctorat, Université Paris VI, France, 1993.
- [21] MILLER (J.D.): « Visual habituation in the human infant », *Child Development*, 43, 1972, pp. 481-493.
- [22] MILEWSKI (A.E.): « Visual Discrimination and Detection of Configurational Invariance in 3-Month Infants », *Developmental Psychology*, vol. 15, n° 4, 1979, pp. 357-363.
- [23] MISHKIN (M.), UNGERLEIDER (L.G.), MACKO (K.A.): « Object vision and spatial vision: two cortical pathways », *Trends in Neurosciences*, octobre, 1983, pp. 414-417.
- [24] MOUNTCASTLE (V.B.): « An organizing principle for cerebral function. The unit module and the distributed system », in: *The Mindful Brain*, MIT Press, 1978.
- [25] OTTO (I.), GUIGON (E.), BOUTKHIL (L.), GRANDGUILLAUME (P.), BURNOD (Y.): « Direct and indirect cooperation between temporal and parietal networks for invariant visual recognition », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 1992, pp. 35-54.
- [26] RUMELHART (D.), McCLELLAND (J.) and the PDP Research Group : *Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition*, vol. 1, Cambridge, Ma : MIT/Bradford Books, 1986.
- [27] TANAKA : « Neuronal mechanisms of object recognition », *Science*, vol. 262, 1993, pp. 685-688.
- [28] TURKEWITZ, KENNY : « The role of development limitations of sensory input on sensory/perceptual organization », *Developmental and Behavioral Pediatrics*, 6, 1985, pp. 302-306.

A.N.A.E

APPROCHE NEUROPSYCHOLOGIQUE DES APPRENTISSAGES CHEZ L'ENFANT

La revue internationale de neuropsychologie

- Les chemins de l'apprentissage
- La compréhension des phénomènes de développement
 - Les troubles des activités cognitives
 - L'élaboration des programmes thérapeutiques

Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant propose des articles en neuropsychologie clinique ou fondamentale.

La neuropsychologie chez l'enfant vise à comprendre le développement des différents processus mentaux nécessaires à tout apprentissage comme à définir l'origine structurale ou le type de dysfonctionnement de certaines structures cérébrales dans diverses pathologies.

A.N.A.E aborde des domaines extrêmement variés tels que la pédagogie appliquée aux enfants, les mécanismes des fonctions cognitives (mémoire, langage, perceptions visuelles et auditives) et les anomalies de leur développement ou leur détérioration.

A.N.A.E, réalisée par des spécialistes en neuropsychologie, offre la possibilité aux chercheurs (biologie, sciences cognitives, génétique, ...) et aux cliniciens de confronter leurs réflexions et observations dans le but d'une meilleure compréhension des processus intervenant lors de tout apprentissage.

A.N.A.E est une revue internationale qui présente :

- des articles originaux, en français ou en anglais, de chercheurs et cliniciens dont la perspective est une meilleure compréhension des processus des apprentissages par une approche neuropsychologique,
- des articles thérapeutiques sur un plan pharmacologique mais aussi éducatif,
- de périodicité bimestrielle (sauf l'été), A.N.A.E publiera également : éditoriaux, cas cliniques, lettres, analyses d'articles et de livres, agenda des congrès, etc.

Les rubriques animées par les membres du Comité de Rédaction sont présentées en début de revue face au sommaire.

A.N.A.E

30, rue d'Armaillé, 75017 Paris

Tél. : 33 (1) 40 55 05 95 - Fax : 33 (1) 40 55 90 70

SERVICE LECTEUR

Dans les collections "A.N.A.E" et "LES CAHIERS PRATIQUES d'A.N.A.E", voici les productions mises à votre disposition.



p.u. : 245F (*)

◀ Épilepsie.

Ce numéro SPÉCIAL, préfacé par le professeur O. Dulac (Hôpital Saint-Vincent-de-Paul, Service Neuropédiatrie) permet de faire un point d'acquisitions récentes. Nous vous en proposons le sommaire :

- Neuropsychologie et chirurgie de l'épilepsie chez l'enfant,
- Épilepsie et bégaiement,
- Effets de la corticothérapie sur l'épilepsie et le fonctionnement mental d'un enfant présentant une encéphalopathie de Sjögren,
- Analyse des troubles du comportement

associés aux crises gélastiques : à propos d'une observation d'un enfant porteur d'un hamartome hypothalamique,

- Syndrome de Landau et Kleffner : évolution de l'aphasie et résultat dans un test d'écoute dichotique,
- Profils de déficits intellectuels chez l'enfant épileptique.

Ce numéro SPÉCIAL étant épuisé, nous vous le proposons en version intégrale, en photocopie.



p.u. : 225 F (*)

◀ "Questionnaire Langage & Comportement 3 ans 1/2"

La méthode simple de dépistage réalisée par les équipes de l'INSERM, C. Chevrie-Müller - J. Goujard

Objectif : un dépistage précoce des difficultés d'apprentissage du langage.

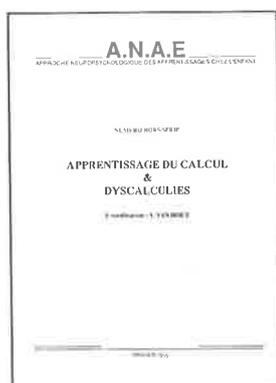
La méthode proposée «Questionnaire Langage et comportement - 3 ans 1/2» permet d'observer les aptitudes langagières et psychomotrices ainsi que le comportement de l'enfant en Petite Section de Maternelle.

Le «Questionnaire, Langage et comportement - 3 ans 1/2» est donné comme un guide qui permet, avec une méthode validée, de réaliser l'observation, par l'institutrice, avec des critères identiques pour chaque enfant. Il s'agit d'un moyen de dépistage de difficultés pouvant avoir des conséquences sur les apprentissages ultérieurs.

Ce dépistage, réalisé en temps utile, permet, alors, d'instituer une aide pédagogique et dans quelques cas une prise en charge d'ordre médical, psychologique ou orthophonique.

Présentation de la méthode :

Le "dossier-classeur", par classe de petite section de maternelle et par année scolaire, comprend : le **guide d'utilisation**, le **calendrier 95-96** permettant de consigner pour chaque enfant la période d'observation, et **32 fiches individuelles** (1 par enfant). Le dossier plastique - solide, léger à transporter - permet un rangement pratique.



p.u. : 245 F (*)

◀ Apprentissage du calcul et dyscalculies. Coordination : A. Van Hout

Ce numéro SPÉCIAL "Apprentissage du calcul et dyscalculies" propose des articles internationaux de synthèse présentant les deux principaux courants actuels de la neuropsychologie et l'état le plus récent des connaissances.

Portant sur la compréhension de l'acquisition des mécanismes du calcul et leurs perturbations, les études neuropsychologiques donnent :

- soit des corrélations entre profils cognitifs et capacités en calcul évaluées par des tests pédagogiques sur les groupes d'enfants,
- soit elles décrivent par présentation de cas uniques les troubles spécifiques du calcul d'origine développementale suivant une méthodologie cognitive.

Cela permet d'établir des similitudes entre pathologie du développement et troubles lésionnels chez l'adulte. Tout ceci est très développé dans ce numéro dont certains articles analysent également les troubles du calcul observables dans certaines pathologies de l'enfant telles que les dysphasies, les infirmités motrices, le syndrome de Williams.

VIENT DE SORTIR

Suite →

BON DE COMMANDE, à découper ou à photocopier, et à retourner à A.N.A.E, 30 rue d'Armaillé, 75017 Paris.

Je vous commande les dossiers suivants :

- Épilepsie 245 F x ex :
- Questionnaire Langage & Comportement 3 ans 1/2 ... 225 F x ex :
- Apprentissage du calcul et dyscalculies 245 F x ex :
- Autisme et communication 190 F x ex :
- Autisme, neuropsychologie et apprentissage 245 F x ex :
- La sensorialité et la perception chez le nouveau-né ... 245 F x ex :

TOTAL À RÉGLER(*)

M | Me | Mle Nom

Prénom

(établissement)

Adresse

Code Postal Ville

(*) Modalités de règlement, voir au dos.

COUPON À RETOURNER À : A.N.A.E - 30, rue d'Armaillé, 75017 PARIS



p.u. : 190 F (*)



p.u. : 245 F (*)



p.u. : 245 F (*)

◀ **Autisme et communication. Actes du Congrès international de Limoges (1994)**

Ce numéro SPÉCIAL s'articule autour de 8 ateliers pratiques bien adaptés aux praticiens, éducateurs, formateurs et 12 communications scientifiques faisant apparaître une très large place aux apports internationaux. En voici le sommaire :

- Les troubles du comportements. E. Schopler
- Personnes atteintes d'autisme sans retard mental. L. Wing
- Évaluation de la communication. A. Schuler
- État de la recherche et perspectives. J.P. Müh
- Comment développer la communication spontanée chez les personnes atteintes d'autisme ? Lee M. Marcus
- Intégration des personnes autistes de l'enfance à l'âge adulte. J. Fuentes
- Comment créer en France une structure locale pour enfants atteints d'autisme ? A. Rebourg
- Procédure de création d'un établissement pour enfants autistes. M. Artuso
- L'autisme est-il seulement un problème de

communication ? E. Schopler (*)

- Déterminisme génétique et neuropsychologie de l'autisme. J.P. Müh
- Qu'est-ce que la communication ? J. Corraze
- Communication et cognition. A. Schuler (*)
- Communication et socialisation. L. Howlin (*)
- Troubles de la communication non verbale dans l'autisme. B. Rogé
- Troubles de la communication verbale dans l'autisme. C. Gérard
- L'écholalie. A. Schuler (*)
- La communication avec support visuel : une des bases de l'éducation pour l'autisme. T. Peeters
- Généralisation et communication. G. Magerotte
- Stratégies pour la communication chez la personne verbale. R. Jordan (*)
- Le modèle TEACCH à Charlotte (Caroline du Nord). Lee M. Marcus (*)

(*) ces articles ont fait l'objet d'un résumé détaillé en français

◀ **Autisme, neuropsychologie et apprentissage. Coordination : O. Ramos**

Plusieurs équipes françaises travaillent actuellement avec des nouvelles conceptions théoriques et des nouvelles méthodes de prise en charge des enfants autistes.

Ce numéro SPÉCIAL fait le point sur le travail des équipes de Bretonneau à Tours et Robert-Debré à Paris, de laboratoires de recherche en psychologie et neuro-

psychologie et de l'unité d'évaluation de l'hôpital La Grave à Toulouse, dirigée par B. Rogé.

Par ailleurs, nous avons traduit l'article original de S. BARON-COHEN (Institut de Psychiatrie - Londres) qui avance l'hypothèse de l'existence d'un trouble cognitif spécifique, "la cécité mentale" dans l'autisme infantile.

◀ **La sensorialité et la perception chez le nouveau-né. Coordination : A. Picard**

Ce numéro spécial est important pour le **néonatalogiste**, le **pédiatre**, le **neuropédiatre**, le **psychologue clinicien** et ce, à plusieurs titres :

- les connaissances sur les compétences du nourrisson ont beaucoup évolué ces vingt dernières années, et donc une mise à jour s'impose,
- certaines de ces connaissances **remettent en cause l'hypothèse d'un appareil psychologique unitaire** (par exemple, le développement indépendant des capacités perceptives de lecture labiale, de reconnaissance des visages et celles des expressions faciales émotionnelles...

- dans certains domaines comme celui de la perception de la parole, l'étude d'enfants souffrant de lésions cérébrales permet de montrer des anomalies d'installation.

Cela ouvre la voie à l'**étude du développement pathologique du nourrisson**, tout d'abord des perceptions, puis des autres processus cognitifs, permettant le développement de la neuropsychologie du nourrisson.

VIENT DE SORTIR

(*) prix TTC incluant : TVA 2,10%, le port et la manutention

MODALITÉS DE RÈGLEMENT : Le montant de ma commande s'élève à F

- Ci-joint mon règlement de F à l'ordre d'A.N.A.E (1)
- Je vous joins un bon de commande administratif (2), uniquement si ma commande est supérieure à 400 F.
- ÉTRANGER :
Je vous règle par CARTE BLEUE — VISA(1) →

ÉTRANGER :

Paiement par Carte Bleue : Veuillez compléter, dater et signer.



Je donne mon accord de prélèvement au profit d'A.N.A.E, pour un montant de F

Numéro de la carte :

Validité

Date :

Signature :

- (1) UN REÇU VOUS EST AUTOMATIQUEMENT ADRESSÉ POUR DÉDUCTION FISCALE(3)
- (2) les bons de commandes administratifs ne peuvent être acceptés sur de faibles montants, ils sont acceptés à partir de 400 francs de montant de commande.
- (3) DÉDUCTION FISCALE : A.N.A.E est déductible de vos frais professionnels et plus spécifiquement de la TAXE SUR LA FORMATION PROFESSIONNELLE.