

Mise au point

Bases cérébrales de l'acquisition du langage : apport de la neuro-imagerie

Cerebral bases of language acquisition: contribution of neuro-imaging techniques

G. Dehaene-Lambertz ^{a,b}

^a *Unité Inserm 562, service hospitalier Frédéric-Joliot, CEA/DRM/DSV, 4, place du Général-Leclerc, 91401 Orsay cedex, France*

^b *Service de neuropédiatrie, centre hospitalier universitaire de Bicêtre (AP-HP), France*

Reçu le 20 février 2004 ; accepté le 6 septembre 2004

Résumé

Chez l'adulte, le fonctionnement cognitif repose sur l'activation de réseaux neuronaux spécialisés. Pour le langage par exemple, nous savons depuis Broca et Wernicke que l'intégrité des régions périsylviennes gauches est essentielle à un fonctionnement linguistique correct chez l'adulte. Comment se développe cette spécialisation ? Est-elle présente dès le plus jeune âge ? Existe-t-il comme chez l'adulte des asymétries fonctionnelles entre les hémisphères droit et gauche ? Quelles sont les contraintes que l'architecture cérébrale initiale fait peser sur le développement linguistique et cette organisation cérébrale peut-elle nous permettre de comprendre le fonctionnement du sujet mature ? Grâce aux progrès de l'imagerie cérébrale, nous pouvons désormais étudier les corrélats cérébraux des compétences linguistiques précoces. Des résultats obtenus en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et en potentiels évoqués haute-densité chez des nourrissons pendant les premiers mois de vie montrent que dès cet âge le cerveau est organisé en réseaux fonctionnels proches de ceux de l'adulte. Cette similarité indique une continuité dans les processus et les structures neurales sous-jacentes entre le nourrisson et l'adulte et suggère que l'exposition à la langue maternelle ne crée donc pas de nouveaux réseaux mais façonne des réseaux précontraints par notre patrimoine génétique.

© 2004 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Speech processing in adults relies on precise and specialized networks, located primarily in the left hemisphere. Behavioral studies in infants indicate that a considerable amount of language learning already takes place in the first year of life in the domains of phonology, prosody, and word segmentation. However, little is known about the brain mechanisms underlying these abilities. Progress in brain-imaging techniques now allows us to address this question. Results obtained with functional magnetic resonance imaging (fMRI) and event-related potentials (ERP) show that speech perception, at both the segmental and supra-segmental levels, activates similar brain areas in infants and adults. This similarity suggests continuity in processing and neural structure and that native language does not create new networks but shapes pre-constrained networks.

© 2004 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Nourrisson ; IRMf ; Potentiels évoqués ; Spécialisation cérébrale

Keywords: Infant; fMRI; Evoked potentials; Brain specialization

Lorsque nous entendons une phrase comme « Viens à table », nous la comprenons sans effort et nous ne sommes pas conscients de la succession d'opérations cognitives qui

aboutit à la compréhension de ce signal sonore. Pourtant, de l'arrivée de l'onde acoustique sur la cochlée à l'action de se diriger vers la table du dîner, une série de calculs s'est produit dans des réseaux neuronaux successifs. Sans passer par l'ensemble de la chaîne de traitement, voici quelques exemples

Adresse e-mail : ghis@lscp.ehess.fr (G. Dehaene-Lambertz).

des opérations que doit effectuer notre cerveau : Découper le stimulus sonore en mots. En effet la parole est un signal acoustique continu sans silence entre les mots. Identifier les sons qui composent les mots, que la voix soit grave ou aiguë, avec un débit rapide ou lent, dans le bruit ou non. Tous ces éléments modifient les caractéristiques physiques du signal et pourtant nous avons l'impression que les sons qui constituent les mots (ou phonèmes) sont invariants. Il faut ensuite attribuer un sens à cette suite de phonèmes, sens qui est totalement arbitraire, et activer toutes les associations possibles que ce sens évoque. Il faut identifier les marqueurs grammaticaux pour structurer la chaîne de mots car l'ordre des mots n'est pas suffisant pour comprendre la phrase. Il faut parallèlement localiser la source sonore, identifier le locuteur, déterminer l'émotion contenue dans le débit syllabique, la ligne mélodique, l'accentuation particulière. Enfin, il faut faire le lien entre toutes ces informations, les mettre en contexte pour aboutir à une compréhension de la scène qui bien sûr, ne se limite pas à une compréhension littérale de la phrase. Nous prenons parfois conscience de la complexité de ces opérations lorsque nous nous trouvons en difficulté, par exemple dans une conversation dans une langue étrangère, dans un bar bruyant ou lorsqu'un accident vasculaire cérébral empêche l'accès à l'une ou l'autre de ces opérations. L'étude du langage nécessite de comprendre chacune de ces étapes. On ne peut pas, en particulier, négliger les étapes précoces de décodage du message sonore par le cerveau car elles conditionnent l'intégrité du message transmis jusqu'aux étapes d'intégration et d'interprétation.

Pour comprendre comment l'enfant acquiert le langage, et comprendre là où la déviance, voire le déficit, peut surgir, il est nécessaire de se pencher sur chacune de ces étapes, d'en établir la chronologie d'apparition, les contraintes cérébrales, d'examiner leurs interactions. Depuis les années 1970, les recherches en psychologie ont permis de montrer que très tôt, bien avant la production des premiers mots, le nourrisson apprend sa langue maternelle. Dès deux mois, il sait reconnaître que des phrases proviennent ou non de sa langue maternelle en utilisant les informations mélodiques et rythmiques [1]. Vers 4–6 mois, il réagit plus aux voyelles de sa langue maternelle qu'à celles utilisées dans d'autres langues mais absentes de sa langue maternelle [2], vers dix mois ce sont les consonnes auxquelles il devient sensible [3]. À ce même âge, il sait également quelles sont les chaînes de phonèmes les plus probables au début des mots, par exemple en français /fr/ est un début de mot possible mais pas /kn/ [4]. Vers huit mois, il est capable de diviser une phrase en ses sous-éléments en utilisant des indices prosodiques. Par exemple il préfère écouter des phrases avec un silence introduit entre le sujet et le verbe, qui est une frontière naturelle, qu'entre le verbe et le complément d'objet qui n'est pas une frontière naturelle [5]. Il a également appris à cet âge le schéma accentuel des mots de sa langue [6]. Par exemple en anglais, la forme sonore la plus fréquente des mots est une syllabe forte suivie d'une syllabe faible. Tous ces indices, permettent au nourrisson d'isoler des mots du signal continu

de la parole et P. Jusczyk et son équipe ont pu montrer que des nourrissons de sept mois sont capables de repérer la répétition de formes sonores, correspondant à des mots, dans des énoncés, sans bien sûr avoir accès au sens de ces mots. Les nourrissons exposés à une dizaine de répétitions d'un mot comme « king » préfèrent ensuite écouter des phrases où ce mot apparaît que des phrases sans ce mot. Il est remarquable de constater que si les enfants sont exposés à « king », « kingdom » présenté ensuite n'entraîne aucune préférence, démontrant que les nourrissons ont correctement isolé le mot « king » [7]. Ils sont également capables de mémoriser ces formes acoustiques plusieurs jours. Après avoir écouté une demi-heure d'histoire pendant dix jours, des nourrissons de huit mois préfèrent écouter, 15 jours plus tard, des listes de mots extraits de ces histoires plutôt que des listes de mots qu'ils n'avaient jamais entendus [8]. Cette expérience démontre que les nourrissons sont capables de stocker des formes acoustiques qui surviennent fréquemment dans la parole, indépendamment de leur sens. Le nourrisson possède donc à la fin de la première année de vie un moule, une forme acoustique de ce que sont les mots de sa langue. Ensuite commence une autre étape, où l'enfant va faire correspondre ces formes acoustiques à un sens et augmenter de façon rapide, en quelques mois, son stock lexical. Parallèlement, il va organiser ces mots et devenir sensible à leur hiérarchie dans la phrase, et donc à la syntaxe. De la reconnaissance de la prosodie de sa langue maternelle dès les premiers mois de vie à l'explosion lexicale deux ans plus tard, le cerveau de l'enfant a donc dû résoudre un certain nombre des problèmes posés par le décodage du signal de parole. Grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, nous pouvons étudier quels sont les corrélats cérébraux de ces capacités précoces et répondre à une question débattue depuis de nombreuses années. Quelle est l'organisation cérébrale initiale ? Les régions périsylviennes gauches cruciales chez l'adulte pour le langage sont-elles également cruciales pour l'apprentissage du langage ? Ou y-a-t-il une équipotentialité des différentes régions cérébrales ?

1. Les techniques d'imagerie cérébrale : IRMf et PE

Pour étudier ces questions, nous avons deux techniques d'imagerie cérébrale non invasive à notre disposition, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et les potentiels évoqués cartographiques (PE). Ces deux techniques sont complémentaires et apportent des informations différentes. L'IRMf est fondée sur la mesure des modifications du signal liées aux variations d'oxygénation sanguine ou effet BOLD (*Blood Oxygenation Level Dependent*). L'activation cérébrale entraîne une importante augmentation du flux sanguin cérébral local (environ 50 %), qui n'est pas compensée par une augmentation équivalente de la consommation en oxygène (environ 5 %). La résultante de ces deux effets est une augmentation de la saturation en oxygène dans le territoire de drainage de l'aire activée, et donc une diminu-

tion de la concentration relative en déoxyhémoglobine. Or, contrairement à l'oxyhémoglobine, la déoxyhémoglobine est paramagnétique et influence le signal par un effet de susceptibilité magnétique. Il est donc possible de mesurer une variation du signal magnétique consécutif à l'exécution d'une tâche mentale. Chez l'adulte, la réponse hémodynamique démarre dès la présentation du stimulus et augmente pour atteindre un plateau environ six secondes après. Ce plateau se maintient tant que dure la stimulation et redescend doucement dès que la stimulation cesse (voir [9] pour une description plus complète de l'IRMf). Généralement, les paradigmes expérimentaux en IRMf alternent des phases de stimulation et des phases de repos. Après un prétraitement des images permettant de les aligner et de les normaliser dans un espace commun à tous les volontaires, on recherche à travers tous les éléments de volume du cerveau (ou voxels) quels sont ceux qui présentent ce profil hémodynamique, c'est-à-dire une augmentation de signal décalée de six secondes par rapport à la stimulation et une diminution dès que la stimulation cesse (Fig. 1). Les images présentées sont donc des images statistiques, c'est-à-dire que sont présentées en couleur les régions donc l'activité est statistiquement corrélée au pattern de stimulation. Élever le seuil de significativité statistique augmente le nombre de régions visibles, le baisser diminue ce nombre de régions. Il est important de conserver cette notion à l'esprit lorsque l'on étudie des images IRMf. Ces images statistiques sont superposées à des images anatomiques du même volontaire obtenues juste avant les images

fonctionnelles. La résolution spatiale de l'IRM est donc excellente. Sa résolution temporelle est en revanche, insuffisante puisque la réponse HRF se développe sur plusieurs secondes alors que les processus neuronaux sont à l'échelle de la milliseconde.

Les potentiels évoqués cartographiques sont issus des techniques électroencéphalographiques, et consistent en l'enregistrement de 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 la séquence des événements électriques liée au traitement du stimulus. Ceux-ci sont en effet reproductibles d'un essai à l'autre alors que l'activité électrique de fond est aléatoire par rapport au stimulus (voir [10] pour une description plus complète des PE). La résolution temporelle des potentiels évoqués est excellente puisque le signal se modifie de milliseconde en milliseconde. Sa résolution spatiale est limitée du fait que le voltage mesuré à la surface de la tête à un moment donné est la résultante de l'activation de toutes les régions cérébrales actives à cet instant. Comme nous ne savons pas a priori quelles sont les régions actives, un grand nombre de solutions est possible pour expliquer les sources du voltage de surface. Néanmoins, les données anatomiques, de neuropsychologie, et provenant des autres techniques d'imagerie permettent de retenir les solutions les plus plausibles. De plus, l'utilisation d'un grand nombre d'électrodes (129 chez l'adulte et 65 chez le nourrisson dans notre système d'enre-

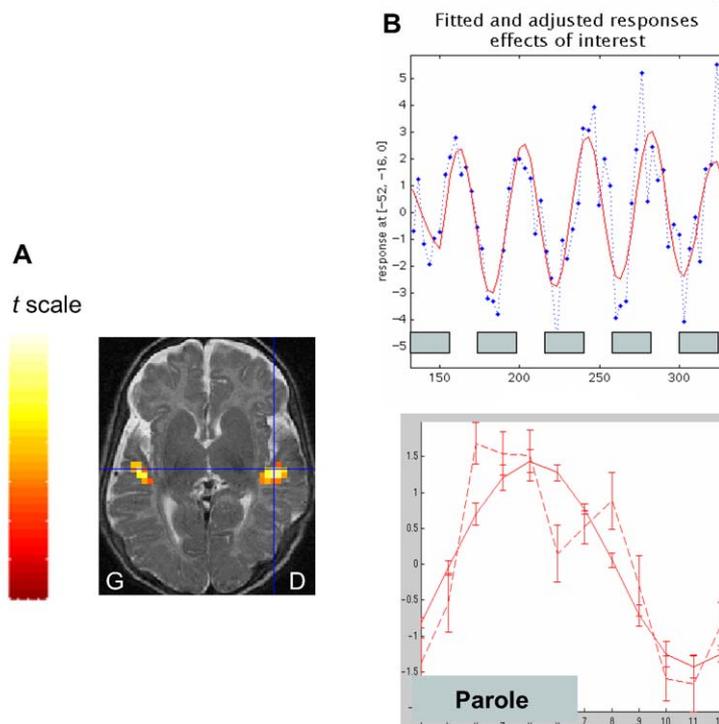


Fig. 1. Réponse hémodynamique à la parole chez un nourrisson de trois mois endormi. **A**, Les régions significativement corrélées avec la présentation du stimulus sonore, ici les deux régions temporelles postérieures, sont présentées sur l'anatomie suivant un code de couleur. **B**, Un exemple de données enregistrées à partir d'un voxel temporel droit (identifié par le centre de la croix bleue sur A). Les blocs de 20 secondes de parole à l'endroit et à l'envers alternent avec des périodes de 20 secondes de silence. La courbe bleue correspond aux données du bébé et la courbe rouge à la courbe théorique. **C**, Moyenne à travers toutes les présentations sonores de la réponse hémodynamique (moyenne \pm écart-type).

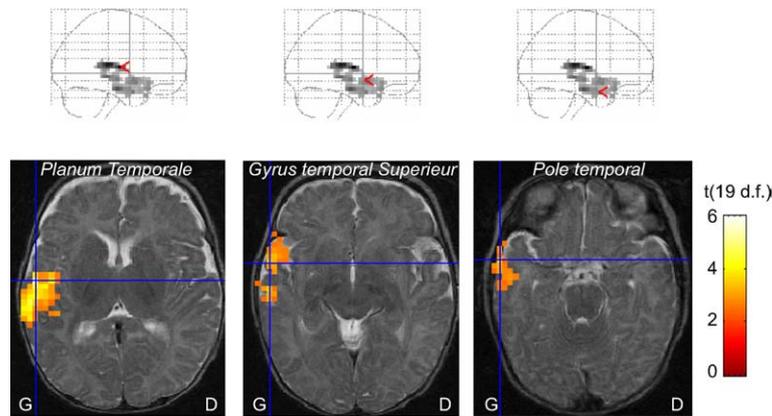


Fig. 2. Localisation des activations en réponse à la parole à l'envers et à l'endroit par rapport aux périodes de silence chez des nourrissons de trois mois (analyse de groupe) à trois niveaux de coupes axiales dans le lobe temporal.

gissement) permet d'enregistrer des différences de topographies même légères entre conditions et donc d'affirmer que des réseaux neuronaux différents sont impliqués dans deux conditions proches, ce qui est parfois une information suffisante. Les potentiels évoqués sont particulièrement adaptés pour des stimuli courts, comme des syllabes et l'IRMf pour des stimuli longs comme des phrases. C'est pourquoi nous avons utilisé ces deux techniques pour étudier les bases cérébrales des capacités linguistiques des nourrissons. Ces deux techniques ne nécessitent pas de précautions particulières pour l'enfant par rapport à celles mises en œuvre pour l'adulte. Nous sommes en particulier particulièrement attentifs à la protection sonore indispensable lors des examens IRM, la machine étant très bruyante.

2. La perception des phrases

Nous avons testé 20 nourrissons normaux âgés de 2–3 mois. Ces nourrissons étaient soit naturellement endormis, soit éveillés. Dans ce cas, pour les maintenir calmes pendant la durée de l'examen, des images intéressantes pour des enfants de cet âge (spirales, visages) leur étaient présentées. Pendant l'acquisition des images fonctionnelles, les enfants écoutaient des séquences alternant 20 secondes de parole avec 20 secondes de silence. Les séquences de parole étaient alternativement soit une histoire en français (langue maternelle des enfants) lue par une femme, soit le même enregistrement diffusé à l'envers. La parole à l'envers possède les mêmes caractéristiques acoustiques de base que la parole à l'endroit (intensité, fréquence, etc.) mais la parole à l'envers viole plusieurs des propriétés du langage. Par exemple, certains phonèmes à l'envers comme /p/ ou /b/, ne sont pas prononçables par un tractus vocal humain. Les caractéristiques universelles de la prosodie qui imposent un ralentissement du débit syllabique, et une diminution de l'intensité et de la fréquence fondamentale à la fin des phrases, sont également transgressées, de même les contours intonatifs propres à la langue ne sont plus reconnaissables. Les études comportementales ont montré que les nourrissons sont sen-

sibles à ces violations. Par exemple des nouveau-nés de quatre jours discriminent leur langue maternelle d'une langue étrangère lorsque les phrases sont présentées à l'endroit mais pas lorsqu'elles sont présentées à l'envers [11]. La comparaison des activations obtenues pour la parole à l'endroit et pour la parole à l'envers avait donc pour but d'isoler les régions linguistiques des régions acoustiques.

Les résultats ont montré que la parole à l'envers et à l'endroit active le gyrus temporal supérieur, de sa partie postérieure, *planum temporale*, jusqu'au pôle temporal (Fig. 2). Des activations plus faibles étaient présentes dans les régions symétriques droites mais ne franchissaient pas le seuil statistique. La seule région pour laquelle l'activation était significativement plus forte à gauche qu'à droite était le *planum temporale*. Cette région est anatomiquement asymétrique chez l'adulte et est impliquée notamment dans le traitement phonétique. Cette asymétrie est moins importante dans des groupes de sujets dyslexiques par rapport à la population normale. Même si le degré d'asymétrie n'est pas corrélé avec le niveau linguistique, cette région est sans doute une des régions cruciales dans la compréhension du langage. Une asymétrie anatomique est décelable dès 31 semaines d'aménorrhée. Nos résultats montrent que cette asymétrie anatomique est associée à une asymétrie fonctionnelle.

Nous n'avons pas mis en évidence au niveau de ces régions temporales de différences entre parole à l'endroit et à l'envers bien que les maximums d'activité soient à des localisations différentes, plus dorsal et postérieur pour la parole à l'endroit que pour la parole à l'envers. L'absence de différence significative dans la région temporale est un peu surprenante car cette différence est présente chez l'adulte [12] et a été retrouvée également chez le nouveau-né [13]. Nous avons utilisé la spectroscopie en proche infrarouge chez des nouveau-nés avec un dessin expérimental similaire à celui utilisé en IRMf. La spectroscopie en proche infrarouge permet de mesurer les variations de la teneur en oxy- et déoxyhémoglobine dans le cortex en dessous des diodes grâce à l'absorption par ces molécules de la lumière dans deux longueurs d'onde différentes. Comme l'IRMf, la spectroscopie est donc sensible à l'effet BOLD. Grâce à cette technique,

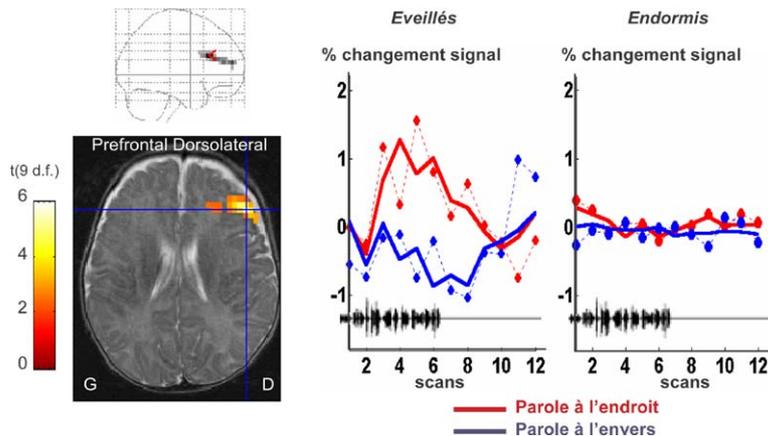


Fig. 3. Interaction entre l'état de vigilance des nourrissons et la nature linguistique des stimuli. Cette comparaison isole la région dorsale du préfrontal droit. Cette région est inactive chez les bébés endormis alors qu'elle s'active lors de l'écoute des phrases de la langue maternelle chez les bébés éveillés.

nous avons enregistré une différence d'activation tout au long de la partie supérieure du lobe temporal gauche entre parole à l'endroit et à l'envers chez des nouveau-nés. Il est possible qu'un manque de puissance statistique explique l'absence de différence significative en IRMf dans cette région.

Il existait pourtant des différences entre parole à l'endroit et à l'envers chez les nourrissons de trois mois. Elles étaient dans le gyrus angulaire gauche s'étendant vers la partie mésiale du lobe pariétal. De plus lorsque les nourrissons étaient éveillés mais pas lorsqu'ils dormaient, la parole à l'endroit causait une activation plus importante que la parole à l'envers dans la région dorsolatérale préfrontale droite (Fig. 3). La latéralisation droite de cette activation était significative. Chez l'adulte, le gyrus angulaire gauche est mis en évidence lorsque l'écoute de mots est opposée à l'écoute de non-mots [14], ou l'écoute de la langue maternelle à celle d'une langue étrangère ou à celle de la parole à l'envers. Cette région semble donc impliquée dans le stockage des formes auditives des mots. De plus, la région pariétale mésiale ou précunéus, et la région dorsolatérale préfrontale droite sont activées quand les adultes doivent retrouver activement des informations verbales mémorisées. L'activation de ces régions chez le nourrisson de deux mois confirme que lorsque les nourrissons écoutent leur langue maternelle, ils reconnaissent des contours intonatifs comme les expériences comportementales l'avaient suggéré [15]. De plus, l'activation de régions qui sont impliquées dans le stockage lexical chez l'adulte suggère que ces contours intonatifs servent de « proto-mots » aux bébés.

Le cerveau du nourrisson n'est donc pas une cire molle attendant d'être façonnée par le monde extérieur. Il est structuré en régions fonctionnelles. Un circuit temporopariétofrontal, très semblable à celui de l'adulte est activé lorsque les nourrissons écoutent leur langue maternelle. Ce réseau présente des asymétries, prouvant que les deux hémisphères ne sont pas équivalents même initialement. Enfin, les régions frontales à cause de leur immaturité ont souvent été considérées comme non fonctionnelles dans les premiers mois de vie. Ceci n'est pas le cas et elles contribuent dès le départ aux compétences cognitives des nourrissons. Avant de discuter

plus avant de ce que ces résultats impliquent pour notre compréhension du développement cérébral et cognitif, nous allons voir avec la perception des phonèmes un autre exemple de la spécialisation cérébrale initiale.

3. La perception des phonèmes

La perception des phonèmes présente différentes caractéristiques qui l'isolent de la perception des autres sons. Deux propriétés sont essentielles pour la compréhension de la parole, la normalisation et la catégorisation. La normalisation est notre capacité à identifier le même phonème malgré des différences acoustiques importantes entre différents exemplaires. Par exemple, nous n'avons aucun mal à identifier le même phonème /ba/ que celui-ci soit produit par un enfant à la voix aiguë ou un homme à la voix grave. La catégorisation est liée au fait que la perception des phonèmes n'est pas continue contrairement, par exemple, à la perception de la hauteur ou de l'intensité d'un son. Autrement dit, une même différence physique sera perçue si les phonèmes se trouvent de part et d'autre d'une frontière phonémique alors qu'elle ne sera pas perçue s'ils appartiennent à la même catégorie. Ces propriétés de normalisation et de catégorisation sont présentes chez le nourrisson [16,17] dès les premiers mois de vie.

Chez l'adulte, les données de la neuropsychologie ont montré que les régions périsylviennes postérieures sont essentielles pour permettre une perception correcte des phonèmes. Plus récemment, les données de neuro-imagerie fonctionnelle ont permis de montrer que les propriétés des sons étaient codées en parallèle. Par exemple, à l'écoute d'une syllabe, des réseaux neuronaux différents dans les régions temporales vont coder l'intensité, la durée, l'intonation mais aussi la voix, et l'identité phonémique. Les régions essentielles pour le codage phonémique sont à gauche dans la partie postérieure du gyrus temporal et dans le gyrus supramarginal. Les nourrissons possèdent-ils déjà des réseaux neuronaux particuliers pour traiter les phonèmes ?

Pour répondre à cette question, nous avons utilisé les potentiels évoqués dans un paradigme d'habituation-désa-

bituation. Dans ce paradigme, deux types d'essais sont présentés aléatoirement : des essais contrôles et des essais déviants. Dans les essais contrôles, le même stimulus est répété (A A A A), dans les essais déviants, un changement de stimulus se produit pour le dernier stimulus de l'essai (B B B A). C'est donc le potentiel évoqué au même stimulus (le dernier) qui est étudié. Seul le contexte dans lequel ce dernier stimulus est présenté est différent. La répétition d'un stimulus entraîne une diminution de l'activité dans les réseaux codant les caractéristiques de ce stimulus, alors qu'un changement entraîne une récupération de l'activité dans le réseau codant la caractéristique du son qui a été changée. Par exemple un réseau codant la voix réagit si on change la voix mais pas si on change un phonème alors qu'un réseau codant les phonèmes aura un comportement inverse. En variant le paramètre sur lequel porte le changement, il est ainsi possible de caractériser les différentes représentations calculées à partir d'un son et d'examiner s'il existe des réseaux spécifiques dédiés au traitement phonétique.

Une première expérience portant sur la discrimination d'une syllabe déviante introduite après plusieurs syllabes identiques répétées a permis de montrer que les processus de détection d'un changement sonore chez le nourrisson de deux mois sont très semblables à ceux de l'adulte. Une première étape, temporelle, automatique, sans doute spécifique de la modalité auditive, vers 400 ms est suivie d'une seconde étape, dépendante de l'attention vers 600 ms, activant des aires cérébrales plus antérieures [15]. Cette succession de deux étapes, l'une spécifique de la modalité et l'autre amodale, est similaire à ce qu'on enregistre chez l'adulte dans des circonstances analogues (*Mismatch negativity* suivie d'une P300). Néanmoins, les latences de ces deux ondes sont beaucoup plus longues chez le nourrisson que leurs équivalents chez l'adulte. Chez l'adulte, la topographie de la réponse de discrimination initiale (connue sous le nom de *Mismatch negativity* ou *MMN* dans la littérature) varie suivant la nature du changement, ce qui témoigne de l'activation de réseaux neuronaux sous-jacents différents codant chacun des caractéristiques différentes du stimulus [18]. Est-ce donc également le cas chez le nourrisson ? Nous avons donc étudié à travers plusieurs expériences, les réponses à un changement de timbre dans des tons, à un changement de voix et à un changement de phonème dans des syllabes chez des nourrissons dans les premiers mois de vie. Comme chez l'adulte, la topographie du voltage sur la surface de la tête de la réponse de discrimination variait en fonction du type de changements étudié. Le cortex auditif des nourrissons est donc organisé fonctionnellement en différents réseaux impliqués dans le codage des caractéristiques d'un stimulus sonore.

L'un de ces réseaux possède-t-il les propriétés que nous avons décrites comme essentielles dans la perception des phonèmes, catégorisation et normalisation ? Nous avons donc contrasté chez des nourrissons de trois mois deux changements acoustiques, l'un sans valeur linguistique car se produisant à l'intérieur d'une catégorie phonétique (/ba₁ vs /ba₂), l'autre avec une valeur linguistique car chevauchant

une frontière phonétique (/da/ vs /ba₂). L'utilisation de syllabes synthétiques permet de s'assurer que le changement acoustique est similaire pour les deux types de changement. Si la réponse de discrimination est purement acoustique, elle devrait être similaire dans ces deux conditions, mais si elle est phonétique, elle devrait n'être présente que dans le cas du passage de /da/ à /ba/. C'est ce que nous avons constaté. Comme chez l'adulte, la réponse de discrimination est significativement plus importante dans le cas d'un changement phonétique que dans le cas d'un changement acoustique de même amplitude. Bien plus, la modélisation des régions actives au moment du changement montre qu'elles sont plus postérieures et dorsales pour un changement phonétique que pour un changement acoustique (Fig. 4). Là encore, ces résultats sont concordants avec les données de l'adulte en IRMf par exemple qui montrent que ce sont les régions temporales postérieures et pariétales qui sont cruciales dans le traitement phonétique.

Nous avons également testé la normalisation en comparant les réponses de discrimination lorsque les syllabes étaient prononcées par le même locuteur et lorsqu'elles étaient prononcées par des locuteurs différents. La réponse de discrimination n'était pas affectée par les variations de locuteurs. De plus, cette réponse est totalement automatique puisque dans cette étude les nourrissons étaient testés endormis. Enfin, ce réseau est fonctionnel très rapidement puisque les enfants étaient âgés de quelques jours seulement.

4. Spécialisation cérébrale initiale pour le langage ?

Ces expériences nous révèlent que l'organisation fonctionnelle cérébrale ne se retrouve pas seulement dans le partage de grandes fonctions entre les différentes régions cérébrales comme nous l'avons vu avec la perception des phrases en IRMf, mais qu'elle est également présente à un niveau plus local comme le cortex auditif. Parmi les réseaux codant les propriétés des stimuli sonores, l'un semble particulièrement adapté pour traiter les phonèmes puisqu'il présente des propriétés de catégorisation et de normalisation, associées chez l'adulte à la perception phonétique.

L'acquisition du langage est classiquement discutée en opposant deux hypothèses. Pour la première, le cerveau humain possède des processus de traitement du langage génétiquement déterminés qui donnent à l'enfant des compétences linguistiques précoces et lui permettent d'acquérir une langue particulière. Pour la seconde, le cerveau est initialement immature et plastique mais doté de capacités d'apprentissage importantes. L'exposition à un stimulus structuré comme le langage va progressivement spécialiser des régions cérébrales dont la localisation dépend de la structure physique de la parole et des connections neuronales privilégiées en place au moment de l'apprentissage. Sans totalement résoudre ce débat, car les nourrissons testés dans nos expériences étaient exposés depuis quelques mois au langage, nos résultats montrent des réseaux très adaptés au traitement du langage dès les

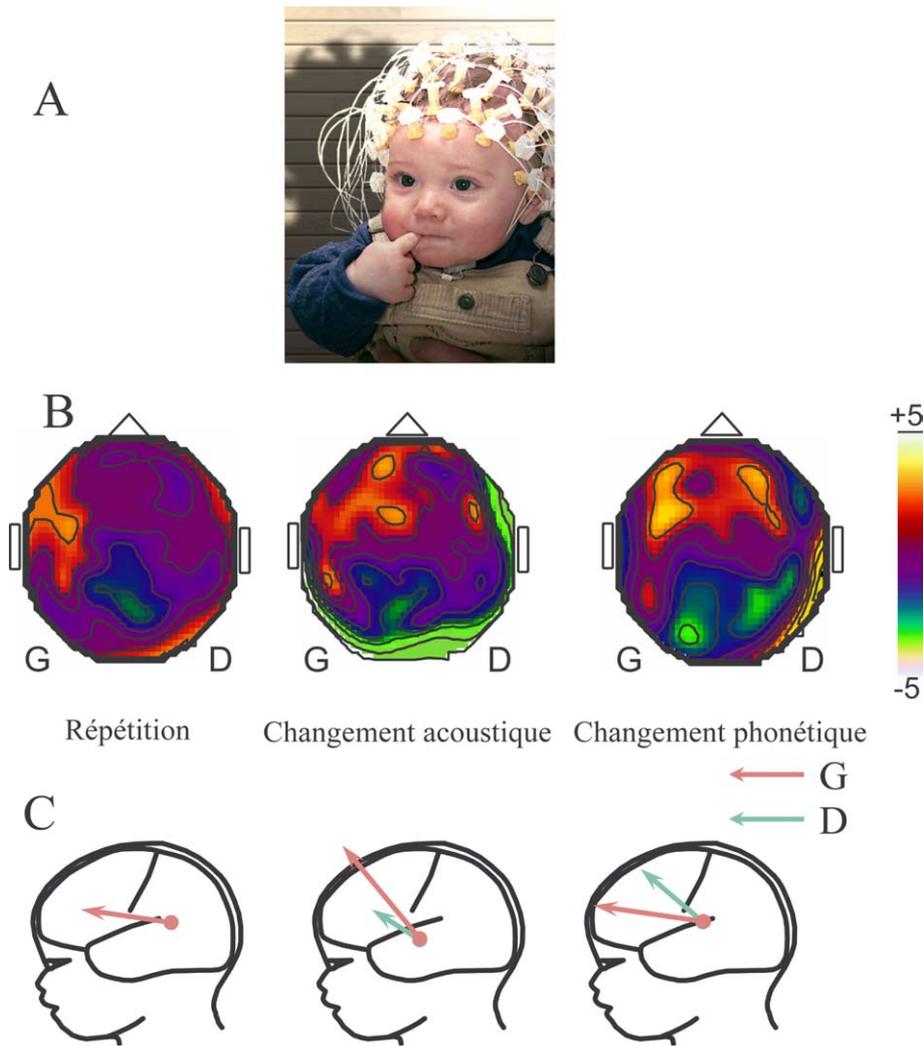


Fig. 4. Potentiels évoqués cartographiques. A : filet géodésique de 65 électrodes chez un nourrisson de six mois. Ce système permet de mettre en évidence des différences de distribution de voltage sur le scalp suggérant la mise en jeu de réseaux neuronaux différents dans le traitement d'un stimulus. B et C : Dans cet exemple, des différences de topographies ont pu être mises en évidence dans la réponse évoquée à une syllabe chez des nourrissons de trois mois et demi, suivant le contexte dans lequel cette syllabe a été présentée (B). En C : localisation des générateurs électriques à l'origine de l'activité électrique recueillie en surface. Répétition : la syllabe est identique aux syllabes précédentes, changement acoustique : la syllabe appartient à la même catégorie phonétique que les syllabes précédentes mais en est différente sur le plan acoustique, changement phonétique : la syllabe appartient à une catégorie phonétique différente de celle des syllabes précédentes mais le changement acoustique est similaire au cas précédent. Alors que le changement acoustique est similaire pour les deux changements, la réponse est plus importante et plus étendue lors du changement phonétique que lors du changement acoustique. Les générateurs sont plus dorsaux et postérieurs dans ce dernier cas. Grâce aux potentiels évoqués cartographiques, il est donc possible de démontrer l'activation de réseaux neuronaux différents dans ces deux cas et donc l'existence d'un traitement spécifique des informations linguistiques dès le plus jeune âge (d'après Dehaene-Lambertz, 1998).

premiers mois de vie et seraient donc plus en faveur de réseaux précontraints génétiquement. Ces réseaux particulièrement adaptés de la parole permettraient au nourrisson de trouver dans son environnement sonore l'input adéquat. Sous l'influence de cet input et sans doute par une analyse des régularités statistiques présentes dans le signal de parole [19,20], ces réseaux vont voir se modifier les poids de leurs connexions et ils vont devenir de plus en plus performants dans le traitement de la langue maternelle.

Les résultats obtenus tant en IRMf qu'en PE montrent donc une importante spécialisation cérébrale dès le plus jeune âge mais y-a-t-il une différence entre hémisphères ? En IRMf, nous avons vu que les deux hémisphères ne répondaient pas de façon équivalente. Le planum temporale était

plus activé à gauche et la région dorsale préfrontale était asymétrique en faveur de la droite. En PE également, les potentiels auditifs sont, dans toutes nos expériences, plus amples au-dessus de l'hémisphère gauche qu'au-dessus de l'hémisphère droit. Néanmoins, en IRMf et PE, cette asymétrie des réponses auditives en faveur de la gauche est globale et n'est pas plus importante pour des stimuli linguistiques que pour des stimuli auditifs non linguistiques. Ce pattern de latéralisation est donc différent de celui rencontré chez l'adulte où l'asymétrie en faveur de la gauche est significativement plus importante pour des stimuli linguistiques par rapport à d'autres stimuli auditifs. Il nous faudrait plus d'études pour confirmer que cette réponse plus forte à gauche est générale pour tous les stimuli auditifs, ou spécifique à cer-

tains types de stimuli comme ceux possédant des fréquences temporelles rapides. Mais il est possible que la spécialisation gauche pour le langage retrouvé chez l'adulte soit une conséquence indirecte d'une avance maturationale de la région temporale de cet hémisphère, qui le rend particulièrement efficace pour répondre à des stimuli sonores. Par le biais des connexions calleuses, cette réponse plus rapide et plus intense inhiberait la région controlatérale. Cette inhibition controlatérale serait plus importante dans les réseaux linguistiques car ceux-ci seraient moins figés du fait de la nécessité de leur modelage par l'environnement linguistique.

En conclusion, l'examen des capacités cognitives des nourrissons et l'étude des bases neurales de ces capacités nous montrent que le nourrisson est un acteur de son apprentissage et que son organisation cérébrale lui permet d'aller chercher dans son environnement l'input adéquat. Cette structure initiale n'est néanmoins pas une structure rigide et les conséquences des lésions cérébrales chez l'enfant sur l'acquisition du langage sont moins importantes que celles décrites chez l'adulte. Ceci témoigne d'une certaine plasticité et en particulier d'une prise en charge par les régions controlatérales des processus linguistiques normalement assurés par l'hémisphère gauche [21]. Grâce à l'imagerie cérébrale, nous pouvons désormais étudier les compétences très précoces et améliorer notre compréhension du développement.

Remerciements

Les résultats présentés dans cette revue ont été obtenus grâce à des subventions du Ministère français de la santé et de la recherche PHRC 1995 N° AOM95011, Groupement d'intérêt scientifique sciences de la cognition N° PO 9004, ACI Blanche 1999 « Plasticité neuronale et acquisition du langage », et de la fondation McDonnell.

Références

- [1] Dehaene-Lambertz G, Houston D. Faster orientation latency toward native language in two-month-old infants. *Lang Speech* 1998;41:21–43.
- [2] Kuhl PK, Williams KA, Lacerda F, Stevens KN, Lindblom B. Linguistic experiences alter phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science* 1992;255:606–8.
- [3] Werker JF, Lalonde CE. Cross-language speech perception: Initial capabilities and developmental change. *Dev Psychol* 1988;24:672–83.
- [4] Jusczyk PW, Hohne EA, Bauman A. Infants' sensitivity to allophonic cues for word segmentation. *Percept Psychophys* 1999;61:1465–76.
- [5] Jusczyk PW, Hirsh-Pasek K, Nelson DG, Kennedy LJ, Woodward A, Piwoz J. Perception of acoustic correlates of major phrasal units by young infants. *Cognit Psychol* 1992;24:252–93.
- [6] Jusczyk PW, Friederici A, Wessels J, Svenkerud V, Jusczyk A. Infants' sensitivity to the sound pattern of native language words. *J Mem Lang* 1993;32:402–20.
- [7] Jusczyk PW, Houston DM, Newsome M. The beginnings of word segmentation in english-learning infants. *Cognit Psychol* 1999;39:159–207.
- [8] Jusczyk PW, Hohne EA. Infants' memory for spoken words. *Science* 1997;277:1984–6.
- [9] Le Bihan D. In: Dehaene S, editor. *Le cerveau en action: Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive*. Paris: PUF; 1997.
- [10] Pernier J, Bertrand O. L'électro- et la magnéto-encéphalographie. In: Dehaene S, editor. *Le cerveau en action: Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive*. Paris: PUF; 1997. p. 71–95.
- [11] Mehler J, Lambertz G, Jusczyk P, Amiel-Tison C. Discrimination de la langue maternelle par le nouveau-né. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 1986;303:637–40 Série III.
- [12] Perani D, Dehaene S, Grassi F, Cohen L, Cappa SF, Dupoux E, et al. Brain processing of native and foreign languages. *Neuroreport* 1996;7:2439–44.
- [13] Pena M, Maki A, Kovacic D, Dehaene-Lambertz G, Koizumi H, Bouquet F, et al. Sounds and silence: An optical topography study of language recognition at birth. *Proc Natl Acad Sci USA* 2003;100:11702–5.
- [14] Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Bellgowan PS, Springer JA, Kaufman JN, et al. Human temporal lobe activation by speech and non speech sounds. *Cereb Cortex* 2000;10:512–28.
- [15] Dehaene-Lambertz G, Dehaene S. Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants. *Nature* 1994;370:292–5.
- [16] Eimas PD, Siqueland ER, Jusczyk PW, Vigorito J. Speech perception in infants. *Science* 1971;171:303–6.
- [17] Kuhl PK. Perception of auditory equivalence classes for speech in early infancy. *Infant Behav Dev* 1983;6:263–85.
- [18] Giard MH, Lavikainen J, Reinikainen R, Perrin F, Bertrand O, Pernier J, et al. Separate representations of stimulus frequency, intensity, and duration in auditory sensory memory: An event-related potential and dipole-model analysis. *J Cogn Neurosci* 1995;7:133–43.
- [19] Saffran JR, Aslin RN, Newport EL. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science* 1996;274:1926–8.
- [20] Kuhl PK. A new view of language acquisition. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000;97:11850–7.
- [21] Dehaene-Lambertz G, Pena M, Christophe A, Landrieu P. Phonetic processing in a neonate with a left sylvian infarct. *Brain and Language* 2004;88:26–38.