

UNE EMPREINTE DANS LE CORTEX DES VIOLONISTES

Thomas Elbert,
Brigitte Rockstroh

Une étonnante plasticité jusqu'aux confins du pathologique

THOMAS ELBERT et
BRIGITTE ROCKSTROH
sont professeurs de
psychologie à l'université
de Constance.

Comment rendre compte des capacités d'adaptation dont le cerveau fait la démonstration à tout âge ? Des observations simples sur le cortex des violonistes apportent la preuve d'une étonnante plasticité : la stimulation répétée d'une partie du corps (en l'occurrence les doigts de la main gauche) entraîne une modification significative des zones de représentation sensorielle à l'intérieur du cerveau. Pour certains virtuoses, l'ampleur de ces modifications a une conséquence pathologique : la perte de la capacité à bouger séparément les doigts.

Longtemps, une opinion a prévalu chez les spécialistes des neurosciences : les connexions entre les neurones se forment avant la naissance et au début de l'enfance, puis, chez l'adulte, les voies nerveuses sont plus ou moins fixes et immuables. Néanmoins, pour les psychologues qui étudient les fabuleuses capacités du cerveau à s'adapter aux nécessités de l'environnement, cette théorie a toujours été difficile à accepter. Nous savons tous que « *c'est en forgeant que l'on devient forgeron* ». Mais quels changements se produisent dans les structures nerveuses centrales lorsque l'on acquiert ou perfectionne une compétence ? Par exemple, lorsqu'on apprend à jouer d'un instrument de musique ?

A la fin des années 1940, l'éminent neuropsychologue américain Donald Hebb a formulé une théorie qu'on appelle la règle de Hebb : « *Les cellules qui déchargent ensemble se lieront ensemble* » (*Cells that fire together wire together*). En d'autres termes, lorsque les neurones déchargent simultanément, leur capacité à s'activer mutuellement augmente⁽¹⁾. Les preuves expérimentales de ce principe n'ont commencé à apparaître que trente ans après la formulation de Hebb, lorsque l'on a appris à repérer et à corré-

ler les décharges de neurones isolés. Toutefois, on croyait que seules les cellules du cerveau participant aux processus de mémorisation présentaient cette plasticité de câblage. Des recherches récentes montrent qu'en fait des modifications plastiques se produisent à tous les niveaux du système nerveux central : le cerveau est un système dynamique qui s'auto-organise.

L'information sensorielle fournie par la surface corporelle se transmet au cortex somatosensoriel. Lorsque nous touchons un objet, les impulsions transmises par les nerfs sensoriels des doigts déclenchent une réponse dans la partie correspondante du cortex. Selon les idées traditionnelles, si le trajet entre l'information sensorielle d'une partie du corps et sa représentation corticale est interrompu par une détérioration quelconque, la région correspondante du cerveau sera inerte. Mais des preuves de plus en plus nombreuses démontrent le contraire : grâce à une réorganisation et à des changements plastiques, le cerveau peut s'adapter à ces interruptions du fonctionnement sensoriel normal.

Ces résultats fort surprenants sont apparus pour la première fois au cours d'expérimentations animales. Mike M. Merzenich, William M. Jenkins et leur équipe de l'université de Californie à San Francisco^(2,4) l'ont mis en évidence chez le singe en 1990 : le blocage des impulsions nerveuses qui se transmettent d'un doigt au cerveau ne se traduit pas par une inactivité durable de la région corticale qui, habituellement, traite les signaux envoyés par ce doigt. Contrairement à ce que l'on attendait, cette région « désafférentée » commence à répondre, après un certain laps de temps, lorsque les doigts adjacents sont stimulés.

Sur le plan de la cartographie, la désafférentation ou le non-usage d'un membre a donc une conséquence : la zone corticale adjacente de représentation sensorielle envahit celle qui correspondait auparavant au membre désafférenté. Par ailleurs, l'usage ou la stimulation accrue d'un membre entraînent une augmentation de la représentation corticale. A l'intérieur de cette

représentation corticale accrue, les dimensions de chaque champ réceptif, c'est-à-dire de la région de la peau à laquelle un neurone donné répond, sont bien plus petites, d'où une plus grande capacité de résolution spatiale.

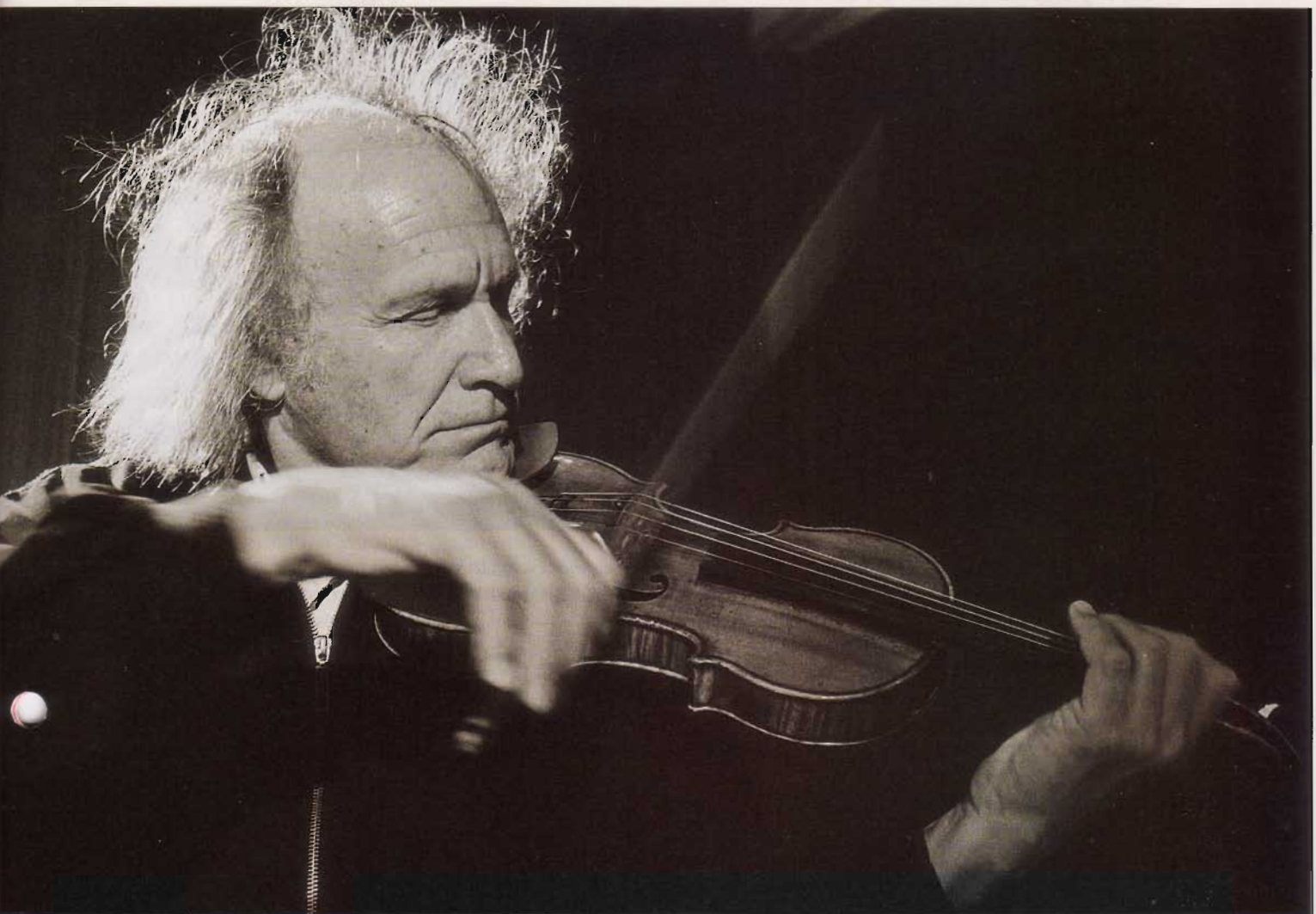
La découverte d'une plasticité similaire dans les zones corticales représentant d'autres parties du corps et l'étude d'autres modalités sensorielles, comme voir et entendre, suggèrent donc fortement que le cerveau se réorganise en permanence à l'âge adulte. Grâce à l'entraînement, par exemple, on peut parvenir à réaliser une tâche motrice complexe, telle une suite rapide des mouvements des doigts. La pratique intensive et quotidienne permet au musicien d'atteindre cette virtuosité qui fait l'admiration de son public.

La pratique du violon accroît la dextérité d'une seule main : comment cette symétrie comportementale se traduit-elle dans le cortex ?

Les individus qui jouent d'un instrument à cordes utilisent les doigts de la main gauche plus fréquemment que ceux de la main droite. Ils stimulent aussi les doigts de la main gauche bien plus souvent que les gens qui ne jouent pas d'un instrument. Ces musiciens semblent ainsi constituer un échantillon idéal pour mettre à l'épreuve cette hypothèse : la stimulation répétée d'une partie du corps entraîne une modification des zones de représentation sensorielle du cerveau. Si cette théorie est vraie, on s'attend à ce que ce changement apparaisse dans la région du cerveau qui reçoit l'information des doigts de la main gauche.

La tomographie par résonance magnétique rassemble des informations structurales sur le cerveau. Avec différentes coupes obtenues grâce à l'IRM, on peut reconstituer une image tridimensionnelle de la structure du cerveau (fig. 1). Les informations fournies par ces images ne sont toutefois pas suffisantes pour voir le cerveau en fonction-

Recherche a publié :
(1) Les mille et une vies de la synapse de Hebb, juillet-août 1994.



by Gilis
Cliché P. Box/Rapho

nement. Dans les années 1990, on a développé des techniques fonctionnelles qui, enfin, permettent de localiser la partie du cerveau activée pendant une tâche particulière.

Lorsque les cellules nerveuses communiquent entre elles, des courants électriques se propagent le long des « tentacules » du neurone, les dendrites, qui recueillent l'information et la transmettent électriquement au corps cellulaire du neurone. Quand la cellule atteint un certain niveau de dépolarisation, elle se décharge et transmet une information aux cellules voisines, dont le nombre peut être compris entre 5 000 et 10 000. Comme tout courant électrique, celui qui se propage le long des dendrites produit un champ magnétique. Lorsque des dizaines de milliers de neurones sont simultanément actifs, leurs champs magnétiques se cumulent pour former un champ d'une force susceptible d'être détectée hors du cerveau à l'aide de dispositifs ultrasensibles, les SQUID (*Super-conducting Quantum Interference Device*). A l'instar du repérage de l'émetteur d'une station radio pirate, l'information spatiale fournie par un certain nombre de capteurs permet de localiser la structure du cerveau active à un moment donné. Ce procédé, l'image-

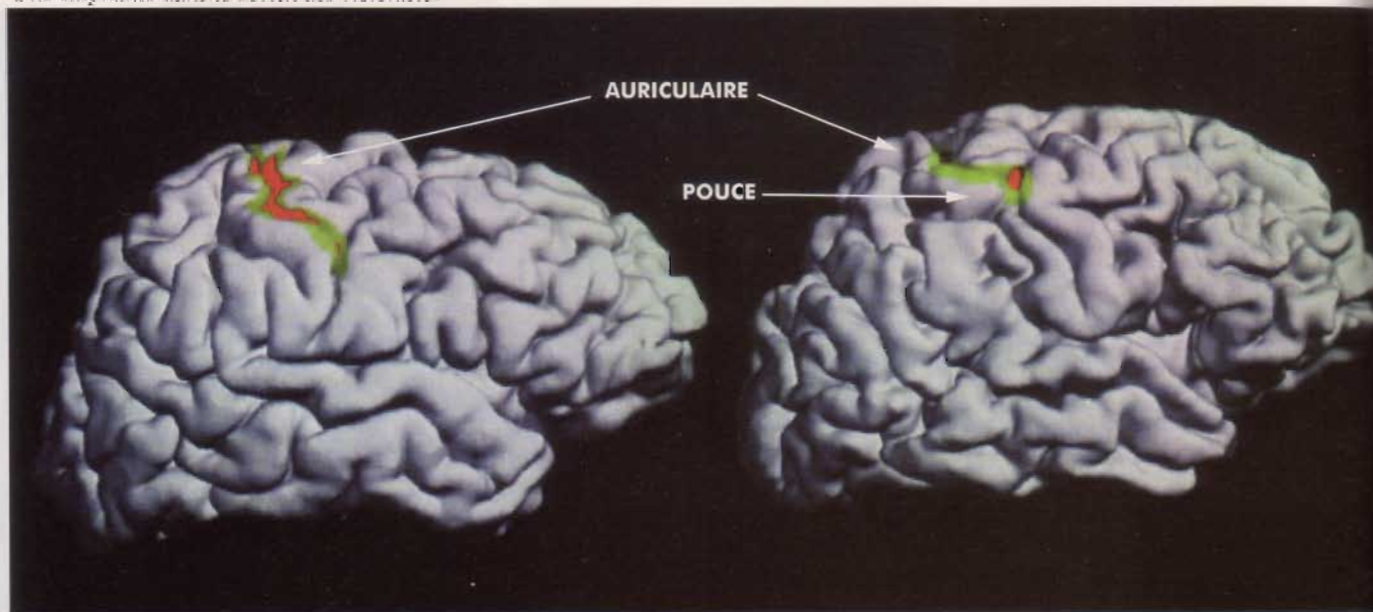
rie par source magnétique (ISM), a l'avantage particulier d'offrir une résolution temporelle illimitée. Cela permet de localiser l'activité, même en cas d'excitation très courte et transitoire, comme cela se produit dans le cortex somatosensoriel lors d'une stimulation tactile.

Toutefois, un grand nombre de régions du cerveau sont actives à n'importe quel moment. Si l'on veut isoler l'activité correspondant à un événement spécifique, il faut que cet événement se répète un grand nombre de fois afin de découvrir quelle est la réponse récurrente. On procède généralement en faisant une moyenne des réponses au même type de stimulation. La figure 2 illustre ce processus et montre les impulsions brèves qui peuvent être enregistrées lors d'une simple stimulation de l'extrémité des doigts.

L'emplacement de l'aire corticale qui devient active environ 50 millisecondes après la stimulation tactile — la zone représentationnelle de l'extrémité des doigts — a été superposée en couleur sur l'image corticale dans la figure 1. L'image de gauche est celle du cerveau de B.R., une femme droitrière de 45 ans : joueuse de piano, elle a aussi commencé la pratique du violoncelle à 11 ans. La

partie droite de la figure 1 représente le cerveau de T.E. : on voit que, dans son cas, une région plus petite correspond à la stimulation des doigts de la main gauche. T.E. est lui aussi âgé de 45 ans et droitier, mais il n'a jamais touché un instrument à cordes, ni pratiqué aucune activité exigeant une habileté particulière de la main gauche. Est-ce que l'on observe toujours cette différence entre musiciens et non-musiciens ?

Au cours d'une étude menée en collaboration avec Edward Taub (université d'Alabama, à Birmingham), Christof Pantev et Christian Wienbruch (université de Münster, Allemagne), nous avons étudié six violonistes, deux violoncellistes et un guitariste. Nous avons mesuré par ISM l'activité cérébrale dans le cortex somatosensoriel des sujets en réponse à des stimuli légers sur l'extrémité des doigts, puis nous avons comparé les résultats obtenus sur des musiciens et des non-musiciens. Au toucher des doigts de la main gauche, les musiciens ont activé une région du cortex plus grande que les non-musiciens : en particulier, la représentation corticale de l'auriculaire gauche était augmentée chez les musiciens⁽¹⁾. La représentation du pouce gauche, un doigt beaucoup moins utilisé que les autres, était à peine



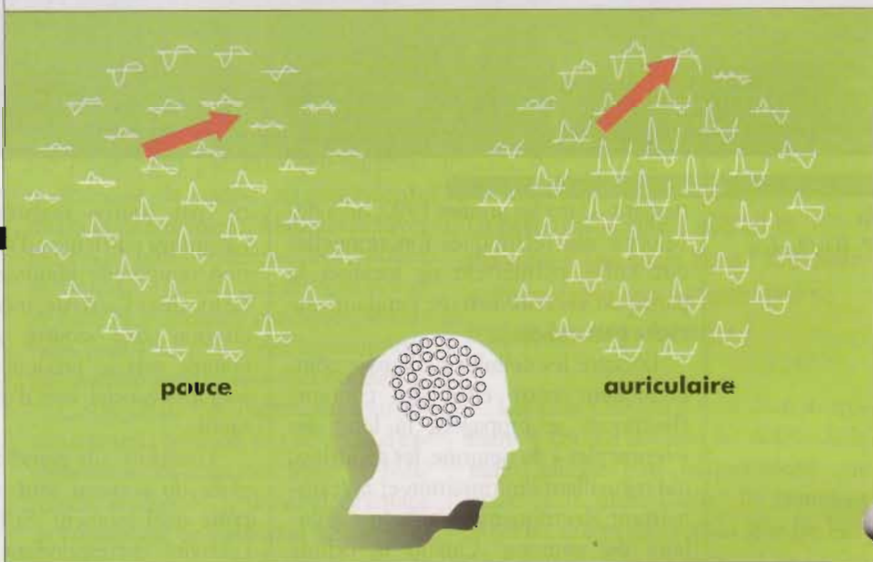
... plus grande, et l'on n'a observé aucune différence en ce qui concerne les représentations des doigts de la main droite. L'agrandissement de la représentation de l'auriculaire gauche était plus important pour les sujets qui ont commencé à pratiquer avant l'âge de 13 ans, mais il était également substantiel chez ceux qui ont commencé plus tard (fig. 3). Ces observations montrent que si le cerveau peut se modifier plus facilement dans l'enfance, il est encore remarquablement plastique chez les adultes. Une telle plasticité n'était pas du tout reconvenue il y a seulement dix ans.

Figure 1. La forme du cortex a été déterminée grâce à des tomographies par résonance magnétique. Comme on peut le voir en comparant les cortex des deux auteurs de cet article (B.R., instrumentiste, à gauche, et T.E., qui ne joue d'aucun instrument, à droite), il y a une variation importante dans la position et les angles des scissures. La zone représentant les doigts est en couleurs. On observe chez l'instrumentiste une réponse plus générale lorsque les doigts de la main gauche (hémisphère droit) sont stimulés. On n'observe aucune différence pour la stimulation de la main droite/hémisphère gauche (non représentée). (Nous remercions Marty Sereno et Anders Dale pour la reconstitution des aires corticales)

Confirmant une prédiction de Hebb, des études animales montrent que la stimulation répétée des doigts modifie leur représentation corticale

L'idée que le cerveau est une masse immuable de cellules dont les circuits de base se forment avant la naissance ou peu après n'est donc plus admissible. Lorsque nous aurons compris les mécanismes de la réorganisation du cerveau, on pourra alors envisager de les stimuler ou de les manipuler en vue d'un meilleur apprentissage et, surtout, d'un remplacement des fonctions perdues à la suite de lésions cérébrales.

Comment y parvenir ? Nous savons que les représentations corticales de la perception sensorielle sont en relation avec la disposition spatiale des récepteurs périphériques. Comme nous l'avons dit, l'ISM permet de déterminer la cartographie corticale de l'espace visuel, de la surface corporelle ou de la fréquence des sons. Ainsi, les doigts de la main sont représentés le long de la paroi postérieure du gyrus central. Le pouce occupe toujours une position inférieure par rapport aux autres doigts,



l'auriculaire étant le plus médian (voir fig. 1). Le fait de modifier l'importance relative des connexions du système nerveux en augmentant la stimulation ou en désactivant une voie nerveuse peut entraîner un changement de l'organisation cartographique. Une prédiction de Hebb a été confirmée par des études sur des animaux : une stimulation synchrone sur des sites adjacents (c'est-à-dire d'autres doigts) a pour résultat une intégration de la représentation de ces doigts, alors qu'une stimulation asynchrone sépare les représentations⁽⁷⁾.

Alon Mogilner, Urs Ribary et leurs collègues (université de New York)⁽⁸⁾ ont constaté des faits analogues : ils ont comparé la représentation de la région

Figure 2. L'ensemble des tracés représente les réponses magnétiques évoquées qui apparaissent suite à un léger toucher de l'extrémité des doigts. Les réponses sont moyennes pour le pouce (à gauche) et l'auriculaire (à droite). Le schéma inférieur représente la distribution des capteurs. La flèche indique la direction et la localisation du flux principal de courant qui a créé le champ maximal à environ 50 ms. La représentation du pouce est localisée plus bas que celle de l'auriculaire, une organisation homonculaire observée dans la majorité des sujets. En général, le pouce produit une plus grande réponse que l'auriculaire. Ce rapport est inversé dans le cas présent, celui d'un violoniste. Il faut que 30 000 à 40 000 arbres dendritiques soient activés pour produire le pic principal à 50 ms.

(1) T. Elbert, C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh, E. Taub, *Science*, 270, 305, 1996.
 (2) W.M. Jenkins, M.M. Merzenich, G. Recanzone, *Neuropsychologia*, 28 (6), p. 573, 1990.
 (3) W.M. Jenkins et al., *Journal of Neurophysiology*, 63 (1), p. 82, 1990.
 (4) M.M. Merzenich, W.M. Jenkins, « Cortical plasticity, learning, and learning dysfunction », in B. Julez et I. Kovacs. *Maturational Windows and Adult Cortical Plasticity*, Proceedings Vol. 22, Santa Fe Institute, Studies in the Sciences of Complexity, New York, Addison Wesley, 1995, p. 247.

...

de la main dans le cortex d'adultes humains « normaux » avec celle de sujets souffrant de syndactylie (leurs doigts sont soudés à la naissance). L'ISM a révélé d'une part que la représentation globale de la main était diminuée chez ces sujets et, d'autre part, que leurs doigts n'étaient pas organisés de manière somatotopique*. Enfin, lorsque les doigts d'un sujet sont séparés par une opération chirurgicale, leur représentation individuelle dans le cortex se développe en quelques semaines.

On observe par ailleurs que les zones corticales de représentation des orteils ne sont en général pas bien séparées chez la majorité d'entre nous. Cela s'explique : le port de chaussures ne facilite pas la stimulation individuelle des orteils et nous n'avons pas l'habitude de les bouger individuellement. De fait, la capacité à discriminer — sans regarder — lequel des trois orteils médians est stimulé tient souvent du hasard. En revanche, la plupart d'entre nous peuvent identifier avec certitude quel doigt de la main est touché dans ce type d'expérience. Mais ce n'est pas toujours le

Ainsi, on peut affirmer que la représentation corticale détermine bien les capacités perceptives.

Dans le même ordre d'idées, les musiciens qui travaillent leur instrument chaque jour pendant des heures s'habituent à stimuler presque simultanément certains doigts. En utilisation normale de la main chez les non-musiciens, la stimulation des doigts ne s'effectue pas suffisamment rapidement pour être qualifiée de simultanée au regard du laps de temps (5-20 ms) qui semble gouverner le chevauchement des zones représentationnelles dans le cortex. Mais, si une stimulation simultanée l'emporte sur cette activation asynchrone chez un virtuose, les zones représentationnelles des doigts peuvent fusionner. Alors, la capacité à discriminer les stimuli appliqués à ces doigts, voire la capacité à les bouger séparément, peut disparaître. Le célèbre compositeur Robert Schumann, par exemple, souffrait de cette « dystonie focale » de la main qui l'empêchait de jouer du piano. Cette pathologie est encore très répandue chez les musiciens

de la lecture en braille par un sujet débutant a entraîné une augmentation de la représentation des doigts « lecteurs » au bout de quelques jours seulement (après 30 heures d'apprentissage)⁽⁶⁾. A l'évidence, la représentation des différentes parties du corps dans le cortex somatosensoriel primaire de l'homme peut changer rapidement pour s'adapter aux nécessités du moment et à l'expérience individuelle.

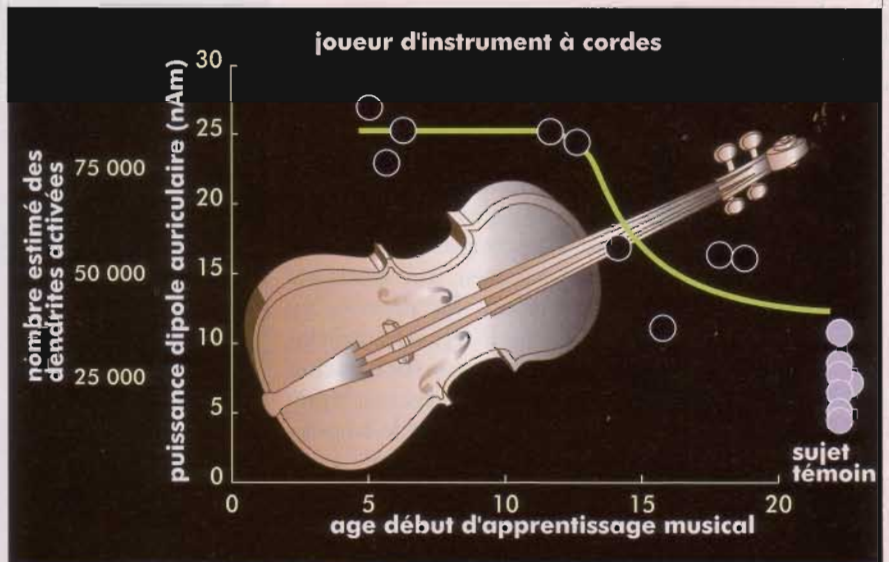
**Comment se réorganise le cerveau ?
La définition de programmes de
rééducation dépend de la réponse
à cette question**

Du point de vue de l'évolution, cette réorganisation plastique permanente des structures corticales confère un avantage évident aux membres d'une espèce donnée. La contribution éventuelle de la réorganisation corticale à la récupération d'une fonction après une lésion du système nerveux central pourrait ainsi être un résultat fortuit, lié

SOMATOTOPIE
représentation du corps, point par point, par des éléments nerveux discrets au sein de structures nerveuses.



Figure 3. Le moment magnétique, généré par les neurones lorsque l'extrémité de l'auriculaire est stimulée, est représenté en fonction de l'âge du début de la pratique de l'instrument. Chaque symbole représente un joueur d'instrument à cordes (points noirs). L'amplitude des réponses à la stimulation de l'auriculaire est significativement plus petite pour les sujets témoins (points bleus) que pour les musiciens. On notera l'augmentation importante du moment dipolaire pour les individus qui débutent l'apprentissage de l'instrument avant 12 ans.



cas. Les aveugles, par exemple, activent de manière synchrone leurs doigts lorsqu'ils lisent en braille. Or, ils éprouvent beaucoup plus de mal à déterminer quel doigt est stimulé par un contact léger. Annette Sterr (de notre équipe à l'université de Constance) a montré récemment que la pratique de la lecture en braille entraîne une fusion des zones représentationnelles des doigts dans le cortex somatosensoriel.

De fait, l'ensemble de la région dévolue à la représentation de la main est plus grande chez les lecteurs en braille ; les seuils de sensibilité sont abaissés tandis qu'en même temps la capacité de discriminer les différents doigts est amoindrie par rapport aux lecteurs voyants non praticiens du braille.

contemporains. L'ISM permet aujourd'hui de détecter la réorganisation corticale correspondante chez l'homme adulte, puis d'étudier ses conséquences comportementales. D'après les indices fournis par notre laboratoire, il est possible d'élaborer un programme d'apprentissage qui débouche sur une séparation des zones excitées. Les premiers patients ont commencé ce programme, mais il est encore trop tôt pour en percevoir les bénéfices à long terme.

A quelle vitesse les changements perceptifs et comportementaux peuvent-ils se produire dans le cerveau ? Pour l'instant, nous ne pouvons pas répondre clairement à cette question. Dans l'étude d'un cas isolé, nous avons découvert que l'apprentissage intensif

au mécanisme autorisant les processus plastiques plus essentiels nécessaires à l'apprentissage, à la croissance physique et à l'adaptation aux exigences de l'environnement.

Si nous pouvons déterminer les mécanismes qui sous-tendent la plasticité, nous pourrions enfin comprendre et surmonter les difficultés liées à l'apprentissage, depuis les troubles d'apprentissage jusqu'aux déficits provoqués par des lésions cérébrales. Il n'y a certainement pas de régénération des cellules nerveuses chez l'adulte, mais de nouvelles connexions peuvent s'établir assez rapidement pour permettre le recâblage, en contournant les régions lésées ou endommagées du cerveau.

T.E. et B.R. ■

(5) A. Mogilner et al., Proceedings of the National Academy of Science USA, 90, 1993, p. 3593.
(6) B. Rockstroh, S. Vanni, T. Elbert et R. Hari, « Extensive somatosensory stimulation alters somatosensory evoked fields », Brainmag'96, 1996.
(7) X. Wang, M.M. Merzenich, K. Sameshima, W.M. Jenkins, Nature, 378, 71, 1995.