

**Cours 2014:**

**Fondements cognitifs des apprentissages scolaires**

Stanislas Dehaene  
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°1

**Education, plasticité cérébrale,  
et recyclage neuronal**

# Sciences cognitives et éducation: un dialogue indispensable

## Du point de vue des sciences cognitives:

Comprendre **comment le cerveau humain se transforme sous l'effet de l'éducation** est l'un des grands problèmes ouverts en neurosciences cognitives.

Comment l'apprentissage du langage, de la lecture ou des mathématiques modifie-t-il les représentations que nous héritons de notre évolution?

Pourquoi l'espèce humaine est-elle la seule qui modifie ainsi son cerveau par l'éducation?

## Du point de vue des spécialistes de l'éducation:

On ne peut pas enseigner convenablement sans avoir un bon modèle mental de ce qui se passe dans la tête de l'enfant.

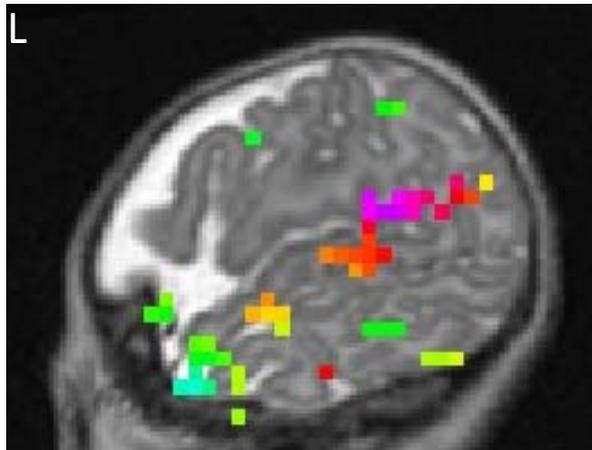
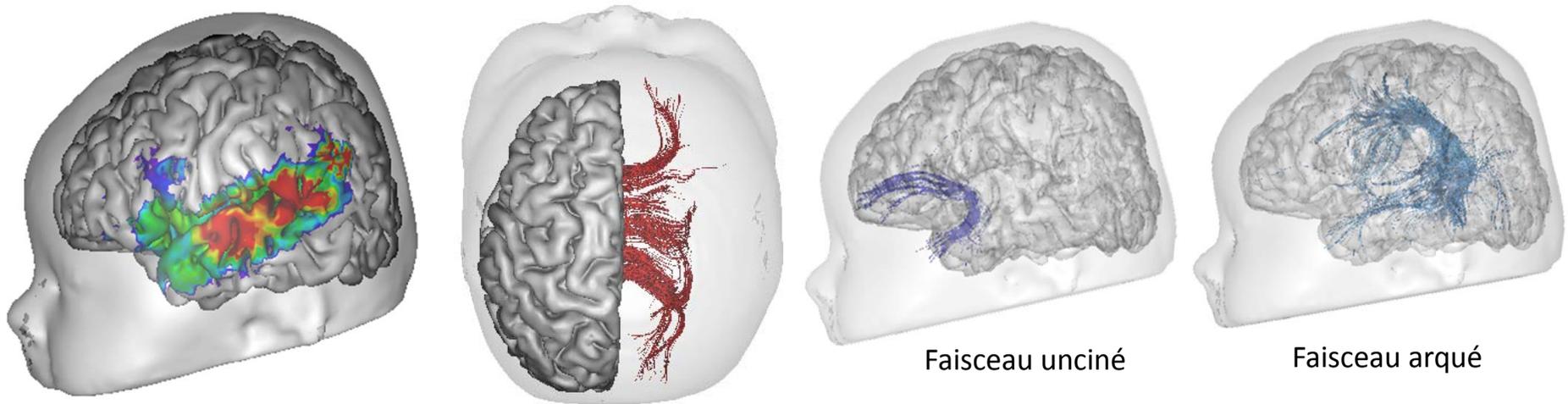
Comprendre les principes fondamentaux de la plasticité cérébrale et des apprentissages:

- Les **compétences précoces de l'enfant**: vision, langage, nombres, géométrie...
- Ses **algorithmes d'apprentissage**: le rôle de l'attention, du sommeil...
- Les **difficultés** que tous les enfants rencontrent, mais aussi les réelles pathologies: dyslexie, dyscalculie, dyspraxie, troubles de l'attention.

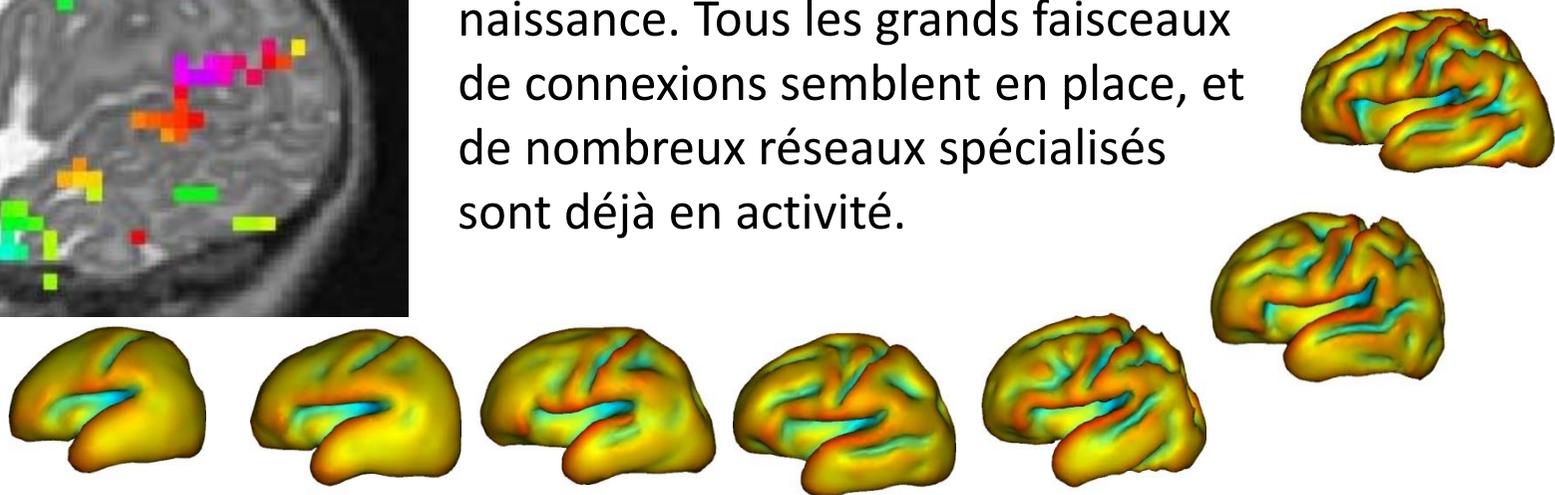
Nous avons tous une organisation cérébrale similaire: tous les enseignants doivent respecter certains principes fondamentaux.

Ces principes sont compatibles avec une grande liberté pédagogique.

## Idée 1: Le cerveau de l'enfant est structuré dès la naissance



- Le cerveau est organisé dès la naissance. Tous les grands faisceaux de connexions semblent en place, et de nombreux réseaux spécialisés sont déjà en activité.



## Idée 2: Le cerveau est une formidable machine à apprendre « Le bébé statisticien » (cours 2013)

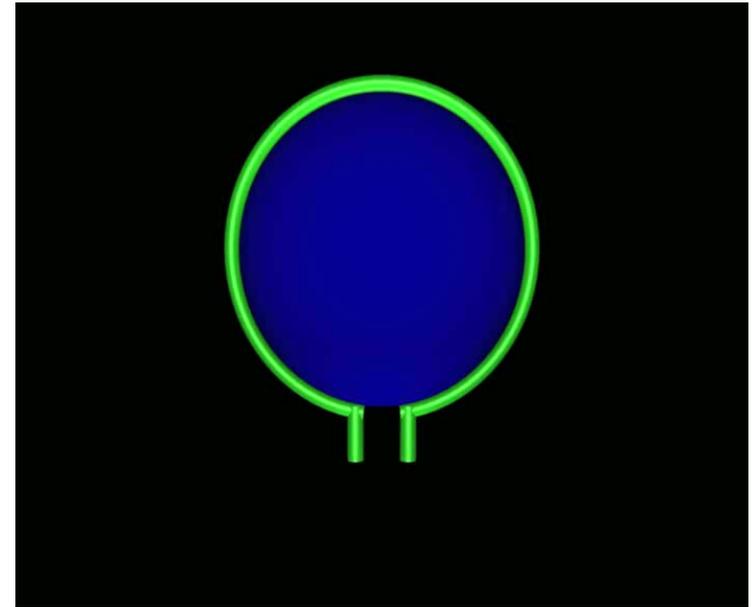
Le cerveau contient, dès la naissance, un **algorithme d'apprentissage statistique** extrêmement sophistiqué (apprentissage statistique Bayésien)

L'enfant se comporte comme « un scientifique au berceau (Gopnik):

- Le cerveau dispose, d'emblée, d'un jeu d'**hypothèses hiérarchiques**, qu'il projette sur le monde extérieur, et dont certaines sont très abstraites (exemples: « le monde est constitué d'objets rigides »; « principe de causalité » )

**Noyaux de connaissances** (« *core knowledge* ») proposés par Elizabeth Spelke.

- Il sélectionne ces hypothèses ou schémas mentaux en fonction de leur **plausibilité** au vu des expériences qu'il fait ou des entrées qu'il reçoit.
- L'attention, la récompense, l'erreur, la curiosité, le sommeil, sont des éléments importants de cet algorithme encore imparfaitement compris.



L'enfant regarde plus longtemps les événements impossibles ou improbables

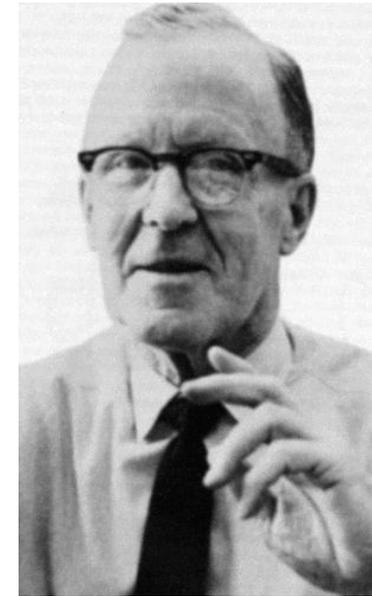


## Potentiel inné et environnement stimulant: Les deux facteurs essentiels de l'éducation

« Deux facteurs déterminent la croissance intellectuelle: un potentiel inné, absolument indispensable, et un environnement stimulant, tout aussi indispensable. Il est inutile de se demander lequel est le plus important. On pourrait supposer que l'intelligence croît jusqu'à la limite fixée par l'hérédité *ou* par l'environnement – le minimum des deux. Dans un environnement parfait, c'est la structure innée qui donne le rythme; mais en partant d'une hérédité de génie, c'est l'environnement qui domine. »

- Comprendre l'organisation innée du cerveau de l'enfant
- Etudier la manière dont sa plasticité permet l'apprentissage de facultés radicalement nouvelles (lecture, mathématiques...)
- Optimiser l'organisation de l'enseignement en fonction de ces contraintes.

« Les éléments essentiels de cette influence de l'environnement ne sont pas encore connus (...). Le fait est que nous ne savons presque rien de précis sur cette question. A notre insu, notre pays est peut-être peuplé de génies potentiels. Découvrir les conditions qui développent au mieux les aptitudes de l'enfant, quelles qu'elles soient, devrait constituer une des priorités de la psychologie. »

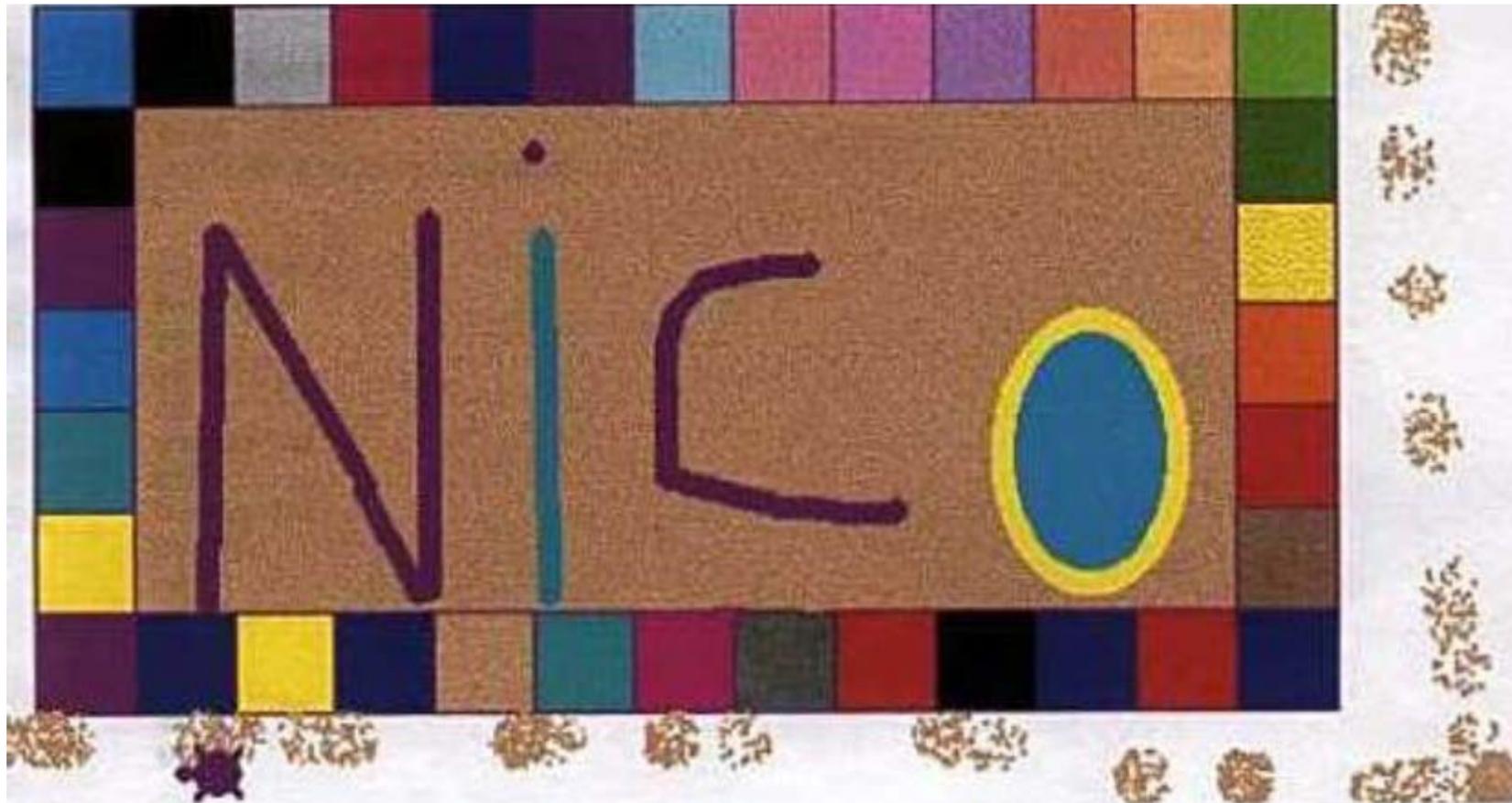


Donald Hebb (1949)  
*The organization of  
behavior*

# Etendue et limites de la plasticité cérébrale

## L'exemple de Nico

Dessin réalisé par Nico sur ordinateur à l'âge de 8 ans:



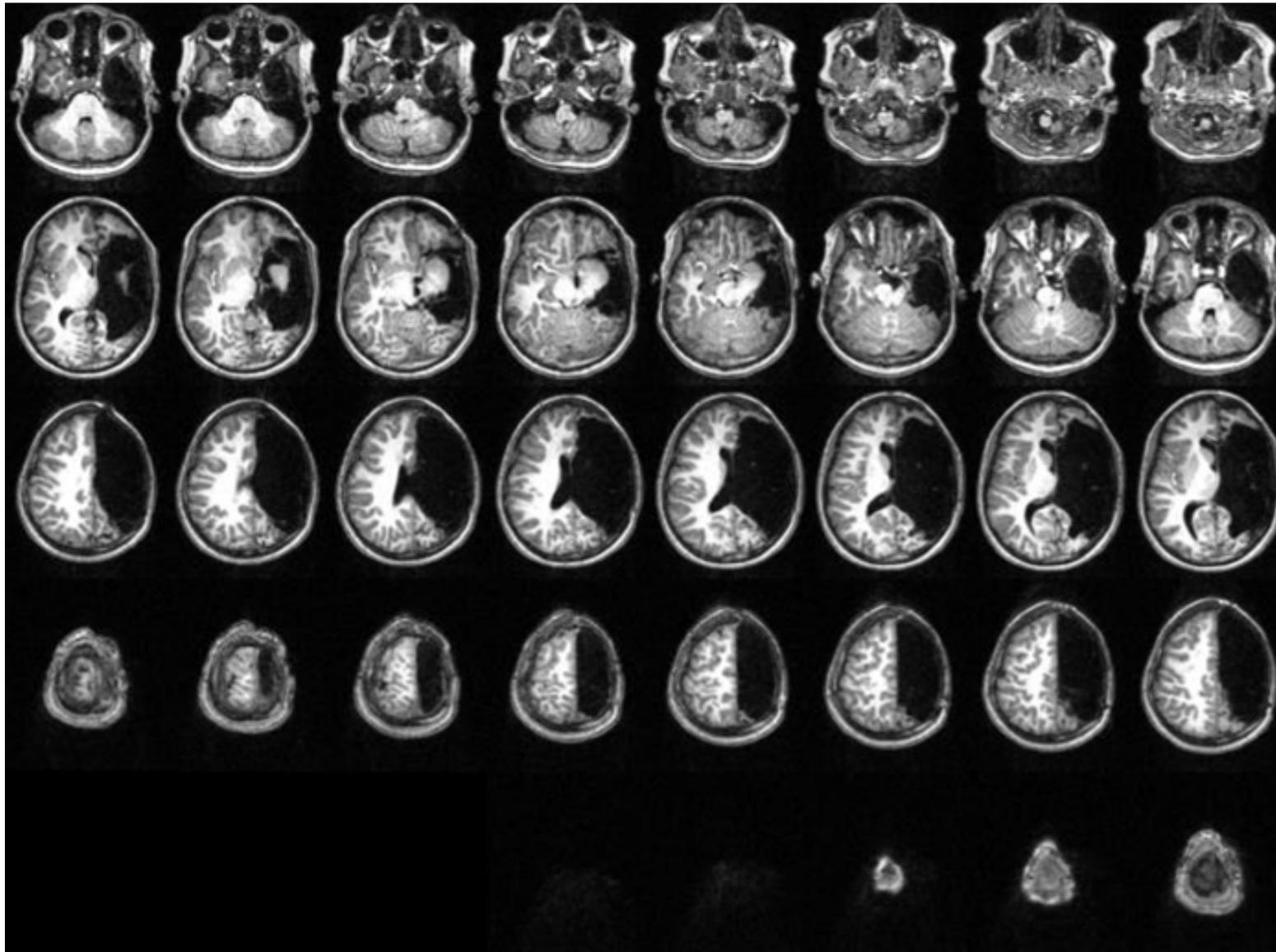
« L'art de l'escrime »



« Papillons »

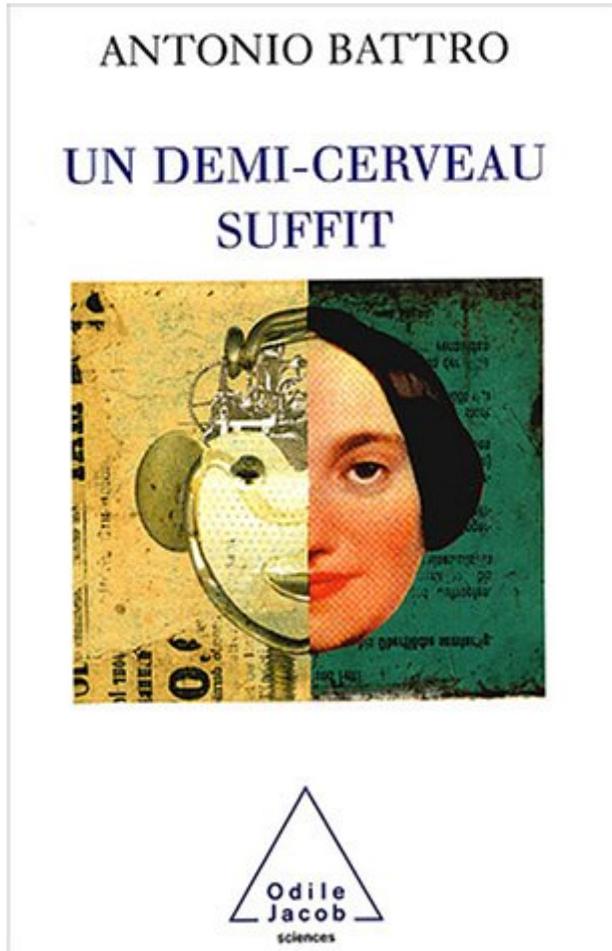


Le cerveau de Nico



# Etendue et limites de la plasticité cérébrale

Battro, A. (2003). *Un demi-cerveau suffit : L'histoire de Nico*. Paris: Editions Odile Jacob.



A l'âge de 3 ans et 7 mois, Nico a du subir une intervention chirurgicale appelée « hémisphérectomie » (ablation de l'hémisphère droit), afin de mettre fin à une épilepsie dévastatrice.

Soutenu par sa famille et par Antonio Battro (Harvard Graduate School of Education), il a suivi une scolarité élémentaire à Buenos Aires, puis est allé au Lycée à Madrid jusqu'à 18 ans.

Son langage oral et écrit, sa mémoire, ses compétences spatiales sont excellentes. Il a un diplôme de secrétariat informatique. Il présente des talents remarquables pour l'escrime (il est membre de l'équipe nationale de handisport) ainsi que pour le dessin.

Il est toutefois hémiparétique et hémianopsique.

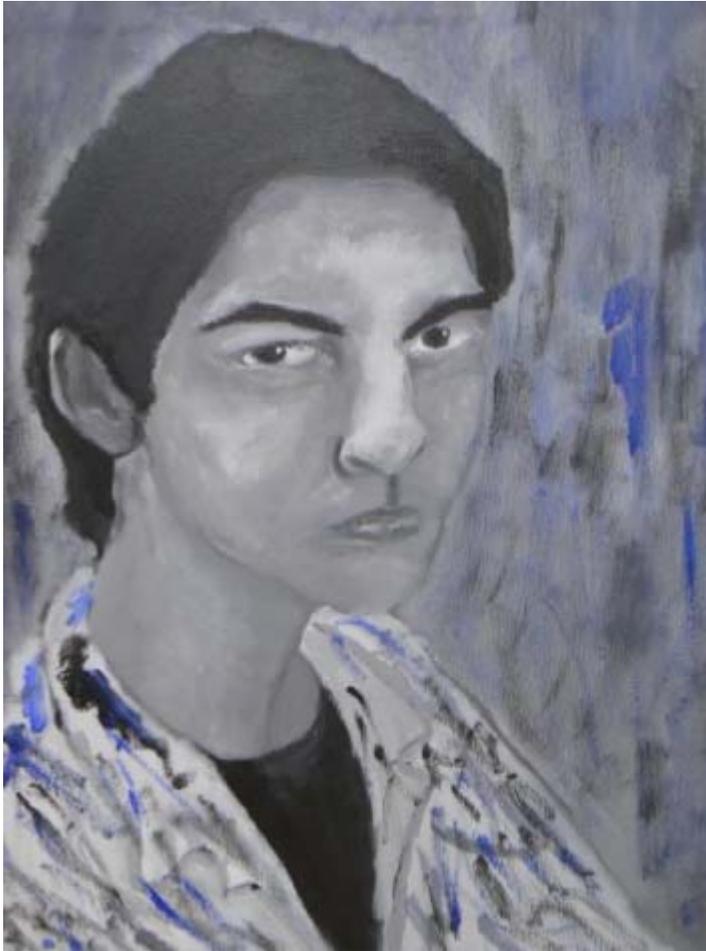
De nombreuses fonctions classiquement associées à l'hémisphère droit ont été compensées, par exemple l'attention « globale »:

E E E E E E E E E E	E E E	E E E
E E E E E E E E E E	E E E	E E E
E E E	E E E	E E E
E E E E E E E E E E	E E E	E E E E E E E E E E
E E E E E E E E E E	E E E	E E E E E E E E E E
E E E	E E E	E E E
E E E	E E E	E E E
E E E E E E E E E E	E E E	E E E
E E E E E E E E E E	E E E	E E E

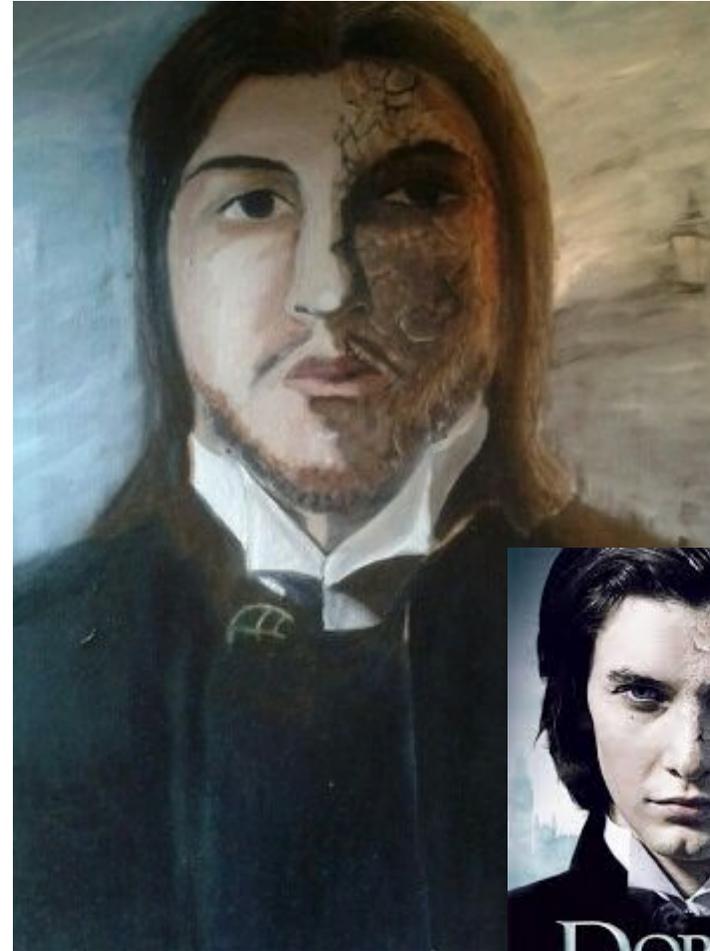


**Copie d' "Impression Soleil Levant" de Monet réalisée lors d'un voyage à Paris**

Auto-portrait de Nico:

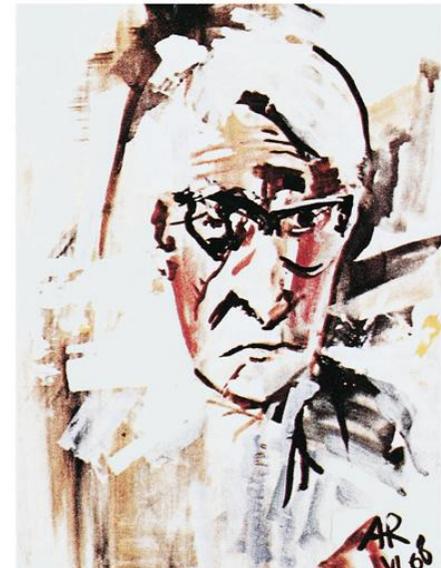
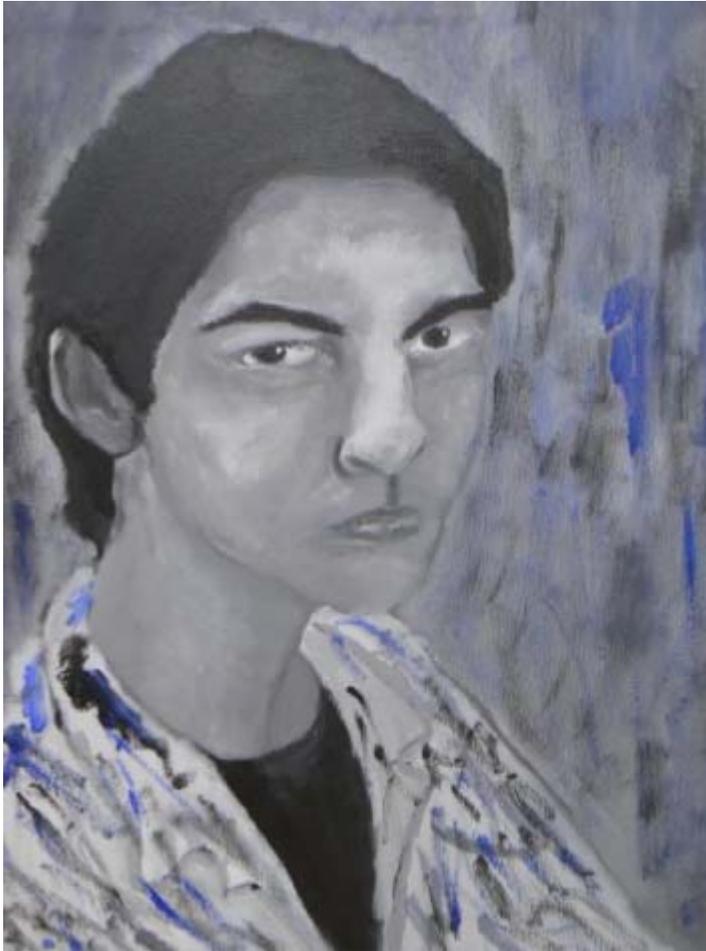


« Le portrait de Dorian Gray »



Auto-portraits de Anton Räderscheidt  
à la suite d'une lésion pariétale droite

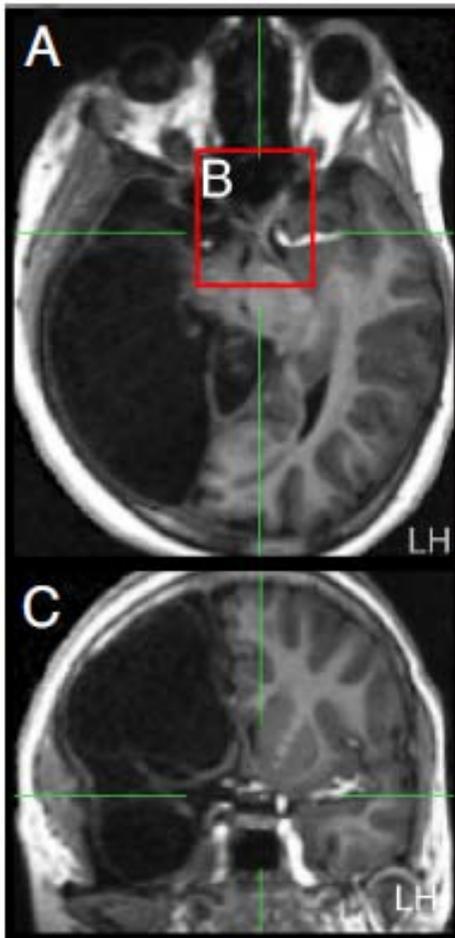
Auto-portrait de Nico:



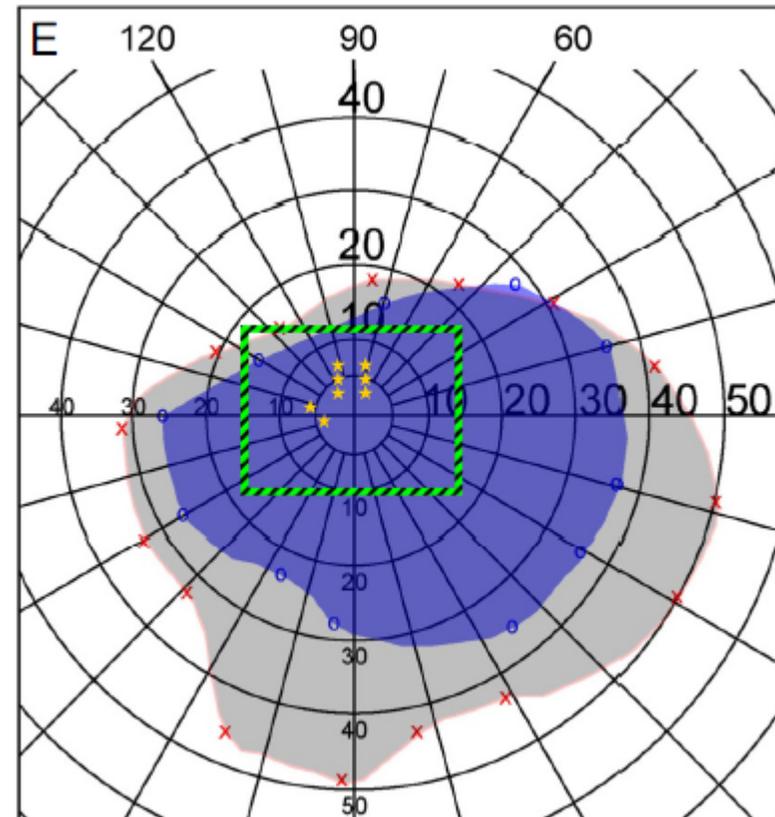
# Réorganisation des cartes visuelles en l'absence d'un hémisphère

Muckli, L., Naumer, M. J., & Singer, W. (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(31), 13034–13039.

Ce patient a souffert d'une malformation embryonnaire qui a causé l'arrêt complet du développement de l'hémisphère droit (avant 7 semaines de gestation)



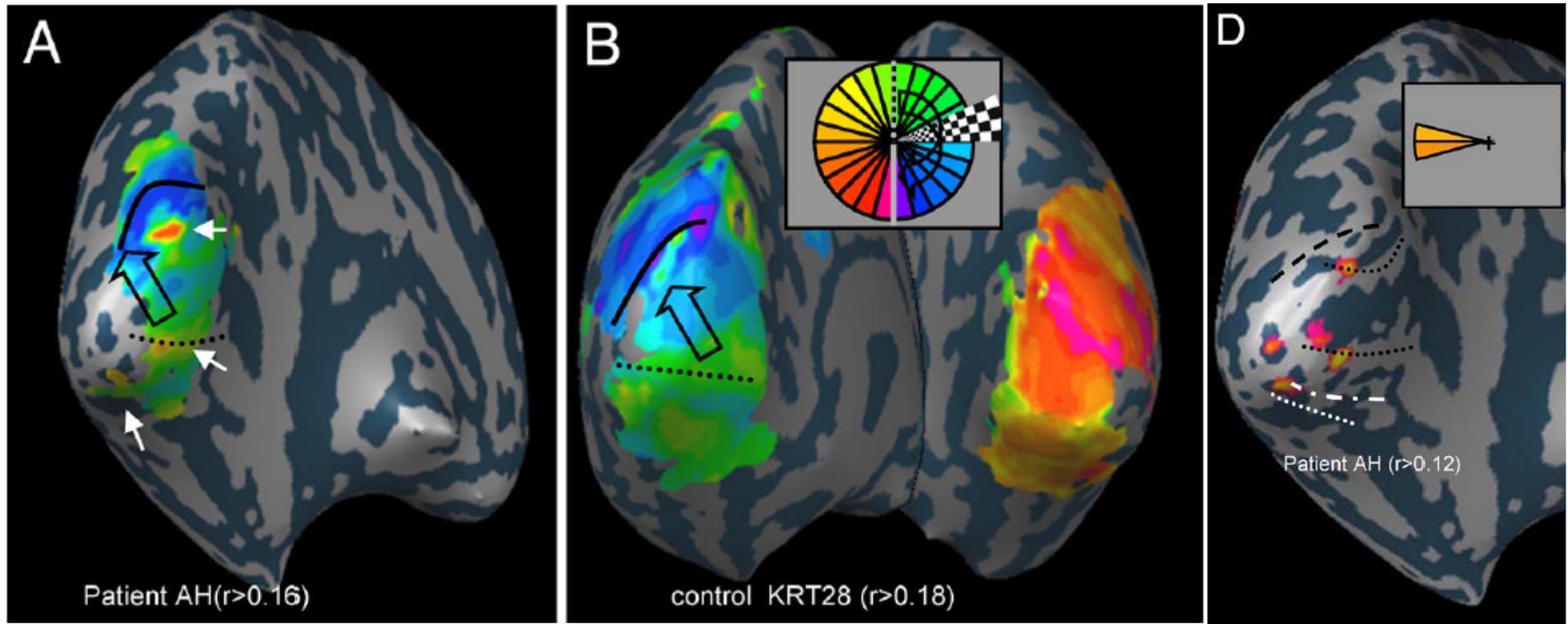
En dépit de l'absence totale d'hémisphère droit (diencéphale et télencéphale), le patient est capable de détecter la lumière et le mouvement dans l'hémichamp gauche.



Dynamic Goldmann perimetry of the left eye. Visual field coordinates are given for the detection of inwards moving (point of appearance; blue circles) or outward moving isopters (points of disappearance; red crosses). The contralateral (*right*) visual hemifield is largely spared, with the only exception of a restricted upper visual field. The ipsilateral (*left*) hemifield shows small scotomata in the upper visual field quadrant (stars). The dashed frame indicates the location and size of the visually stimulated visual field region during the fMRI experiment.

# Réorganisation des cartes visuelles en l'absence d'un hémisphère

Muckli, L., Naumer, M. J., & Singer, W. (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(31), 13034–13039.



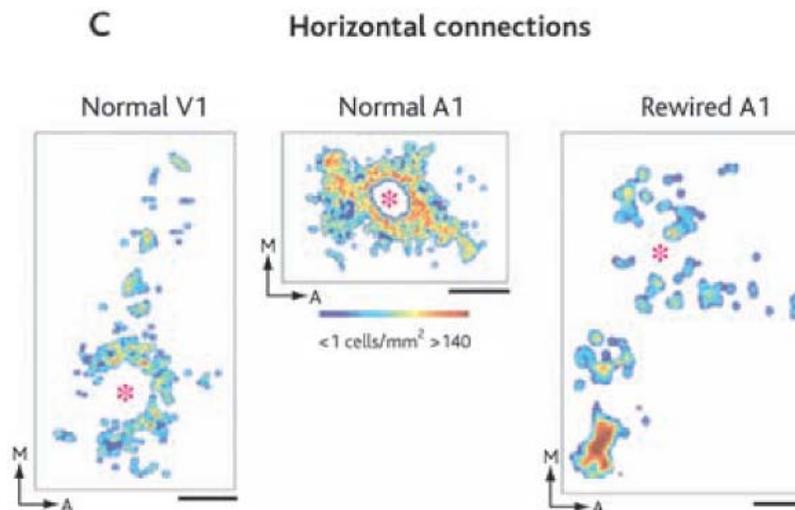
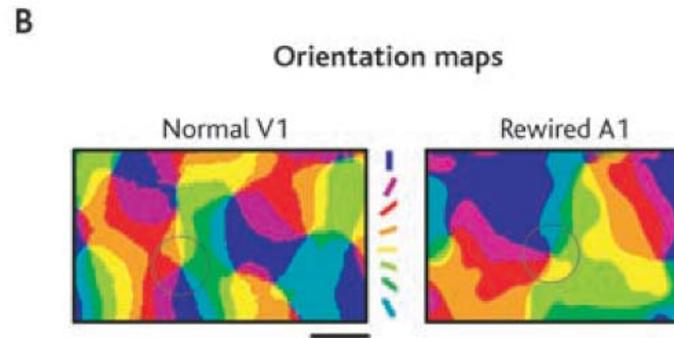
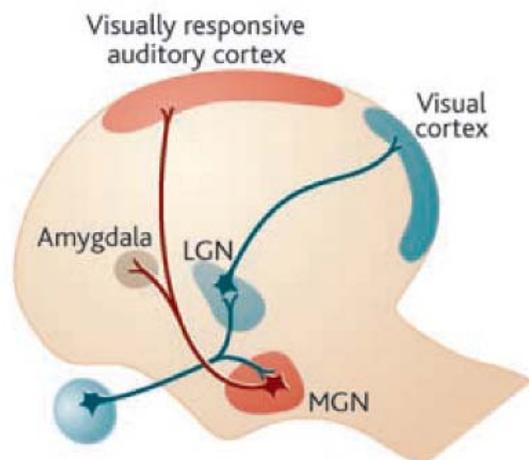
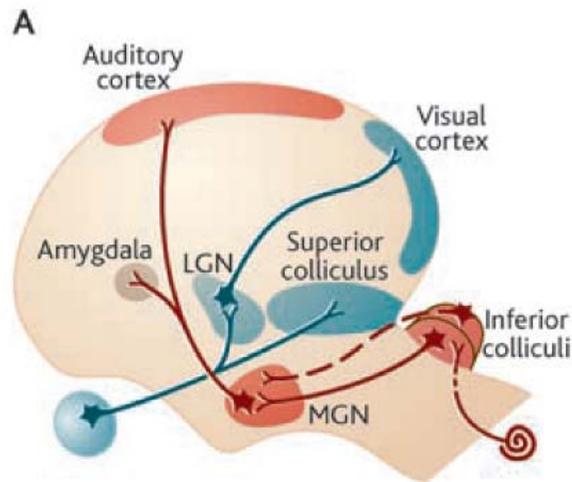
L'examen des cartes rétinotopiques met en évidence des « ilots » de représentation de l'hémichamp gauche dans le pôle occipital *gauche*.

L'analyse suggère que les cellules ganglionnaires de la rétine se sont réorientées: au lieu de se croiser dans le chiasma optique, elles innervent à présent le corps genouillé latéral du thalamus *ipsilatéral*.

# Un cas extrême de plasticité précoce: Réorganisation du cortex auditif en cortex visuel

Sur, M., & Rubenstein, J. L. R. (2005). Patterning and plasticity of the cerebral cortex. *Science*, 310(5749), 805–810.

- Chez le furet, déafférentation très précoce (néonatale) des entrées auditives normales du corps genouillé médian.
- Le cortex auditif se met à répondre à des entrées *visuelles*.



Faut-il conclure de ces données que la plasticité cérébrale est « massive » et que les entrées « organisent » le cortex?

Non:

1. La réorganisation est loin d'être parfaite: les cartes visuelles ne sont pas aussi bien différenciées.

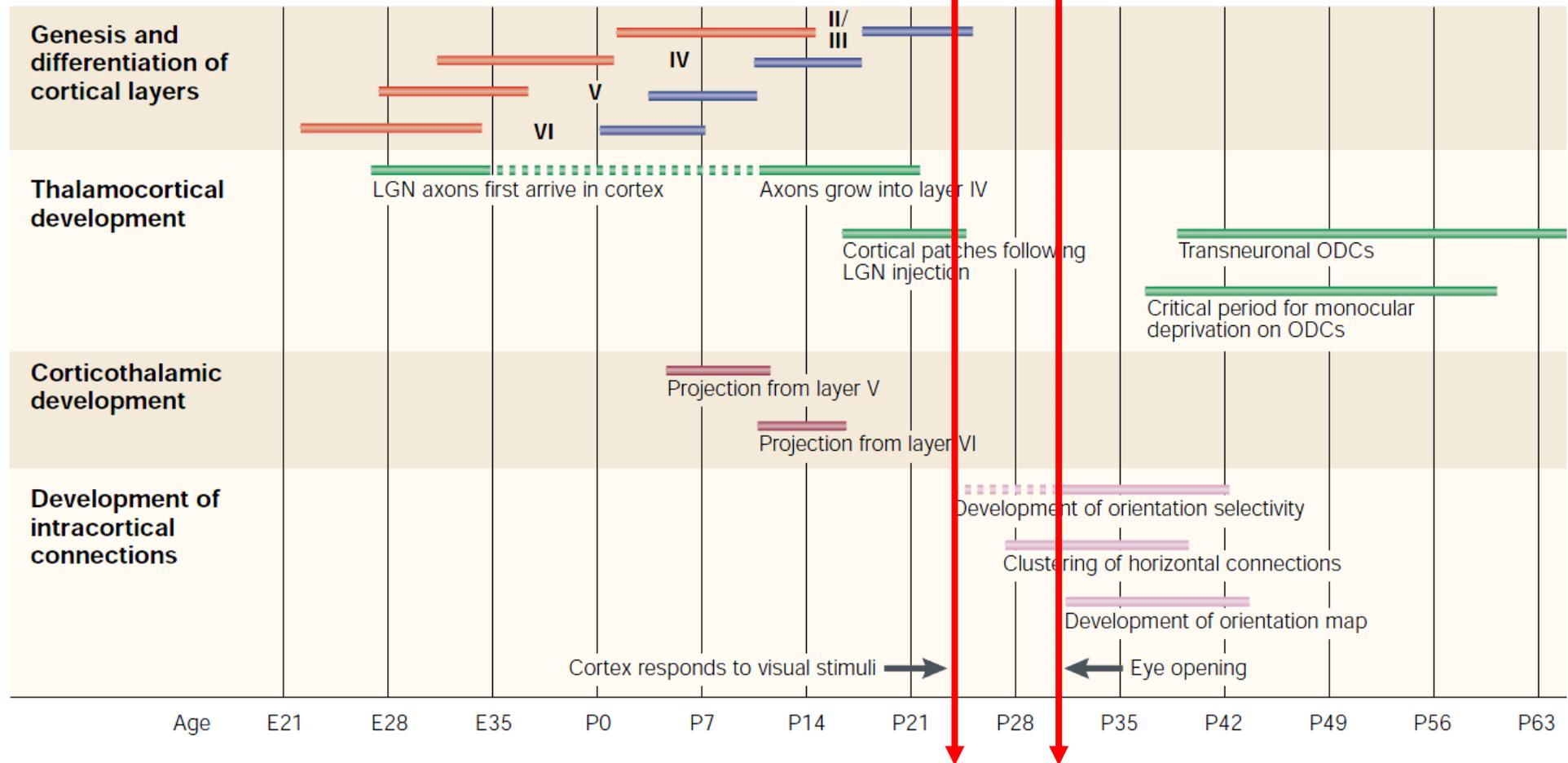
2. Il s'agit de situations *pathologiques* – dans le développement normal, le cortex se spécialise précocement sans forcément nécessiter d'interactions avec le monde extérieur.

# Seule une partie restreinte de la formation du cerveau est dépendante de l'activité neuronale exogène

Sur, M., & Leamey, C. A. (2001). Development and plasticity of cortical areas and networks. *Nat Rev Neurosci*, 2(4), 251–262.

Sur, M., & Rubenstein, J. L. R. (2005). Patterning and plasticity of the cerebral cortex. *Science*, 310(5749), 805–810.

Développement chez le furet :



Cf. développement du système de navigation spatiale.

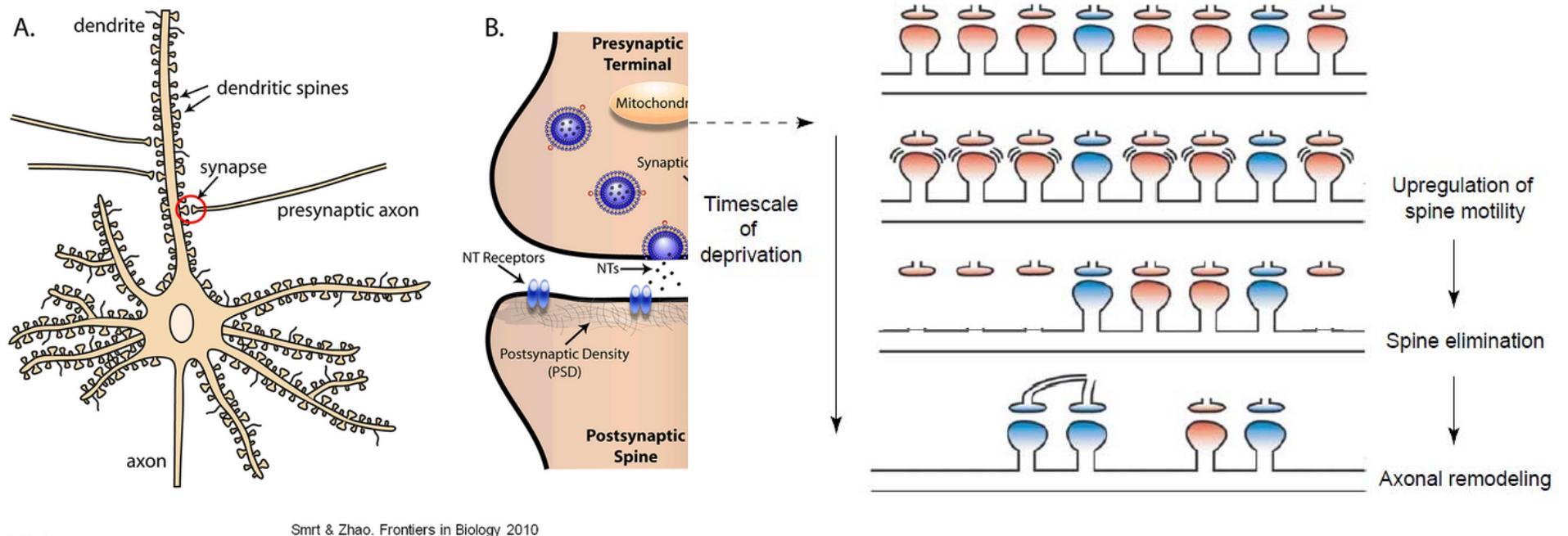
Réponses corticales  
aux stimuli visuels

Ouverture des yeux

# Qu'entend-on par plasticité cérébrale?

Caroni, P., Donato, F., & Muller, D. (2012). Structural plasticity upon learning: regulation and functions. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(7), 478–490.

Majewska, A. K., & Sur, M. (2006). Plasticity and specificity of cortical processing networks. *Trends in Neurosciences*, 29(6), 323–329.



De nombreuses expériences des vingt dernières années montrent que l'apprentissage repose sur le renforcement et l'élimination de synapses, qui constituent les traces de mémoire de nos expériences et modifient le comportement de nos neurones.

L'activité neuronale (ou son absence) modulent sélectivement la stabilité des synapses.

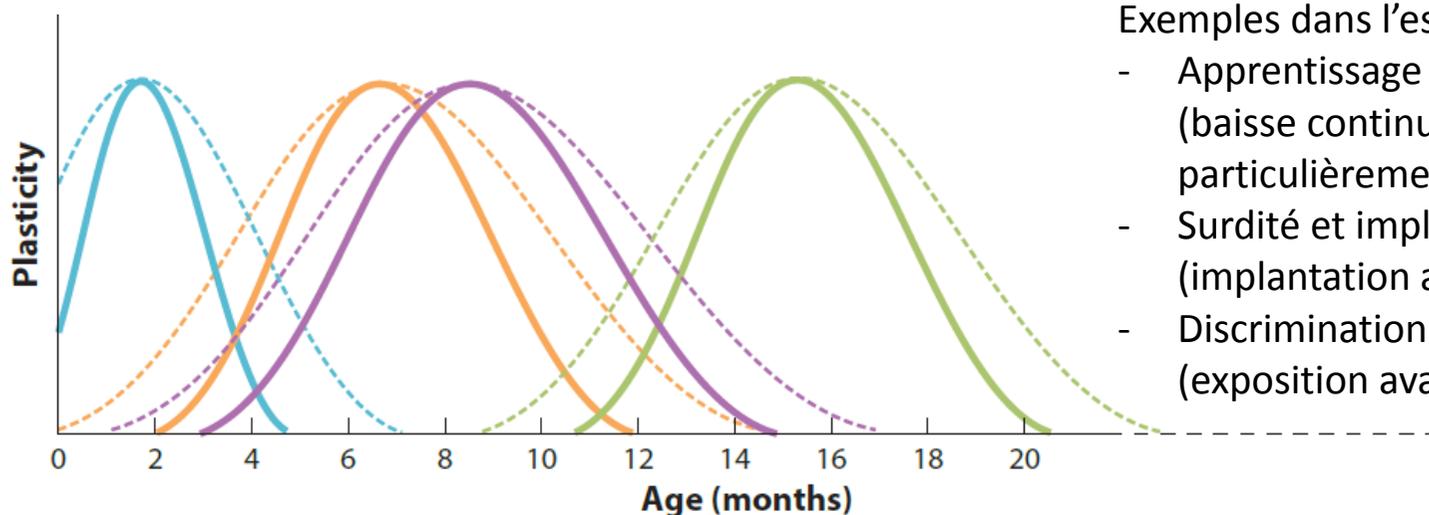
Ces réarrangements synaptiques se produisent à des échelles de temps relativement rapides, par le biais de réarrangements des épines dendritiques. Le branchement des axones se réorganise également. La myélinisation des axones peut également être modifiée par l'usage.

# Limites de la plasticité cérébrale : la notion de période critique

Werker, J. F., & Hensch, T. K. (2014). Critical Periods in Speech Perception: New Directions. *Annual Review of Psychology*. doi:10.1146/annurev-psych-010814-015104

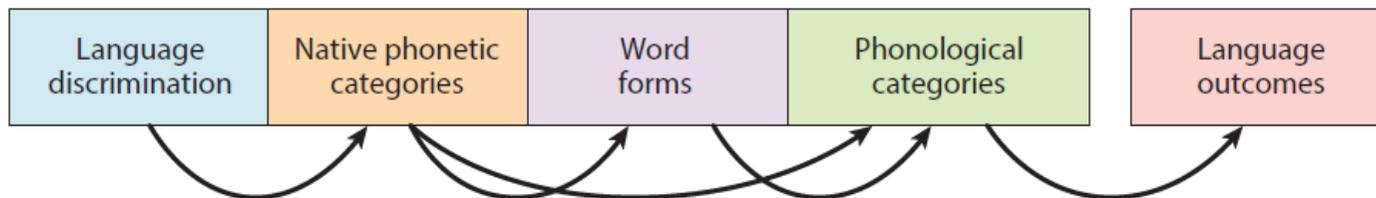
On appelle « période critique » ou « période sensible » une fenêtre temporelle pendant laquelle les circuits neuronaux présentent une capacité particulière de s'adapter aux entrées qu'ils reçoivent de leur environnement.

L'existence de périodes critiques est bien attestée dans le système visuel (vision binoculaire, amblyopie). Selon Werker & Hensch, il existerait une hiérarchie de périodes critiques dans les différentes aires corticales et pour différents apprentissages:



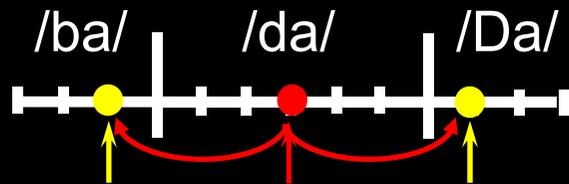
Exemples dans l'espèce humaine:

- Apprentissage d'une seconde langue (baisse continue avec l'âge, particulièrement nette à la puberté)
- Surdité et implants cochléaires (implantation avant 3 ans et demi)
- Discrimination des phonèmes (exposition avant 12 mois)



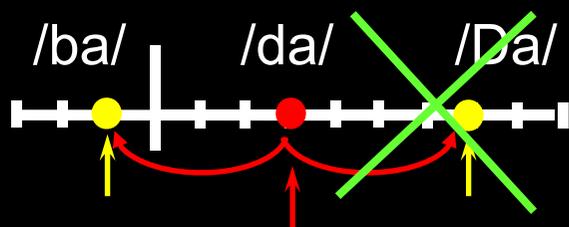
# Ouverture d'une fenêtre critique pour l'apprentissage des consonnes de la langue maternelle entre 9 et 12 mois

Pena, M., Werker, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Earlier speech exposure does not accelerate speech acquisition. *J Neurosci*, 32(33), 11159-11163.

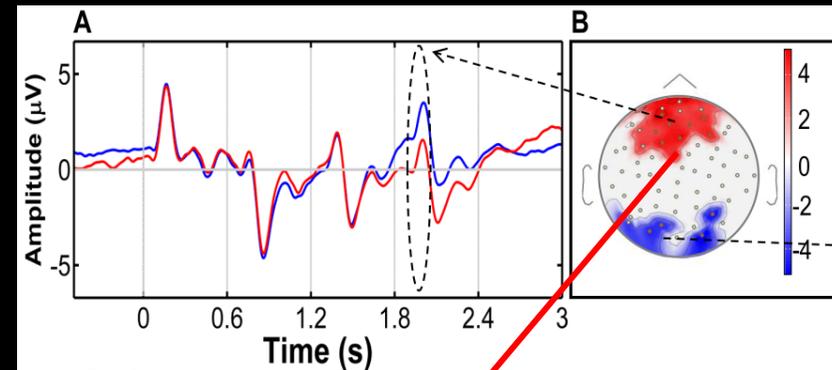


Les bébés de 9 mois discriminent les consonnes de toutes les langues du monde.

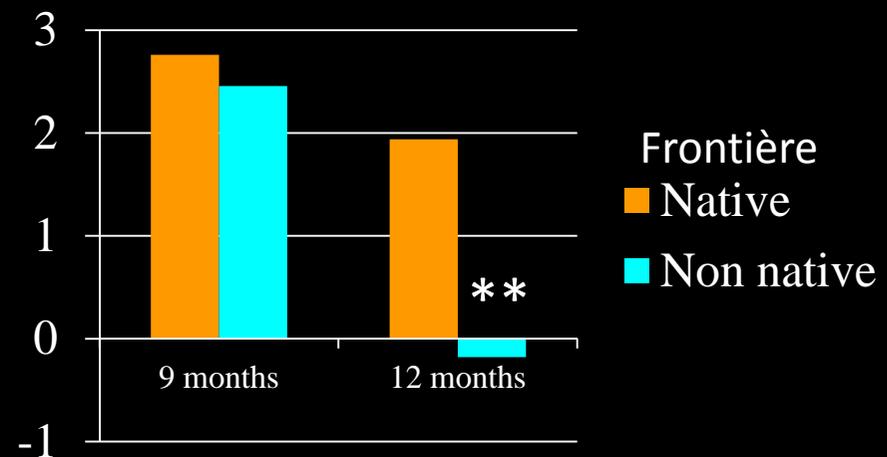
Les bébés de 12 mois ne discriminent plus que les consonnes utilisées dans leur langue.



## Réponse moyenne à la nouveauté



## Amplitude de la réponse



# Cette fenêtre critique semble dépendre de la maturation cérébrale plutôt que de l'exposition à l'environnement

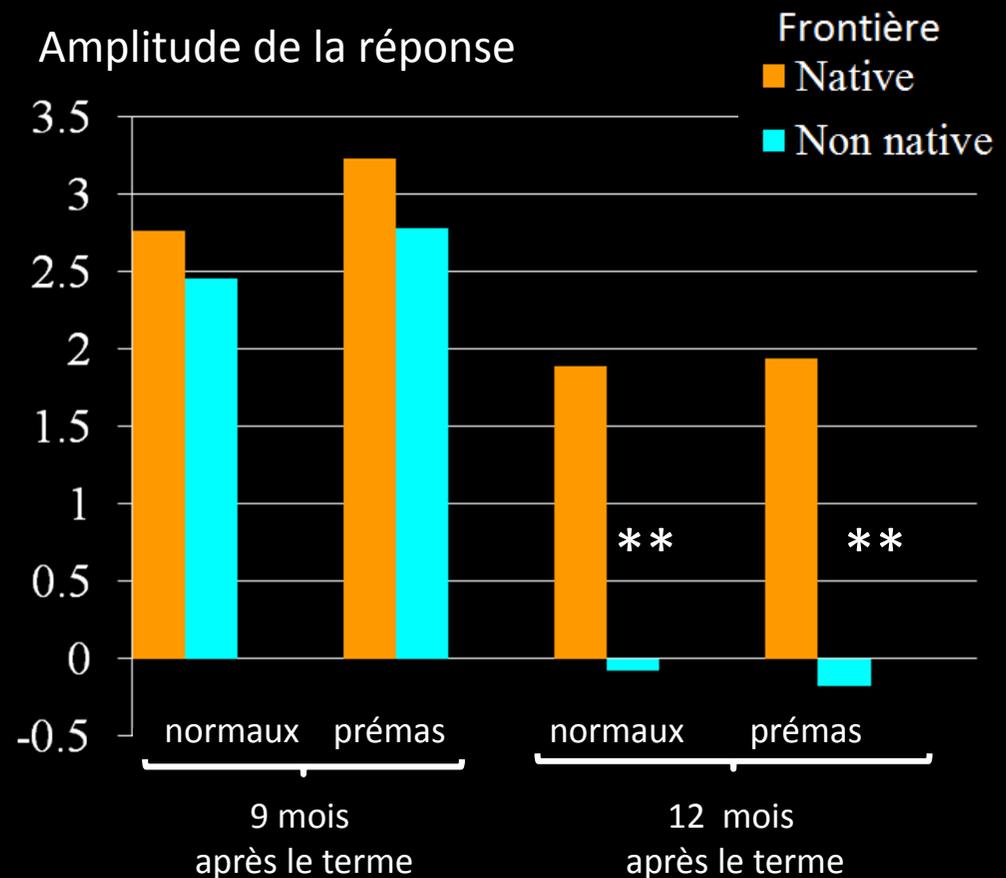
Pena, M., Werker, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Earlier speech exposure does not accelerate speech acquisition. *J Neurosci*, 32(33), 11159-11163.

Deux groupes d'enfants sont testés à 9 et 12 mois après le terme normal de la grossesse:

- des enfants nés à terme (grossesse normale)
- des prématurés nés avant terme, et qui bénéficient donc de près de trois mois supplémentaires d'exposition au langage.

Ces groupes ne diffèrent pas.

9 mois après le terme, les prémas qui ont pourtant bénéficié d'une exposition quasiment équivalente à celle des enfants de 12 mois nés à terme, continuent pourtant de discriminer le contraste étranger.



# Les mécanismes d'ouverture et de fermeture des périodes critiques

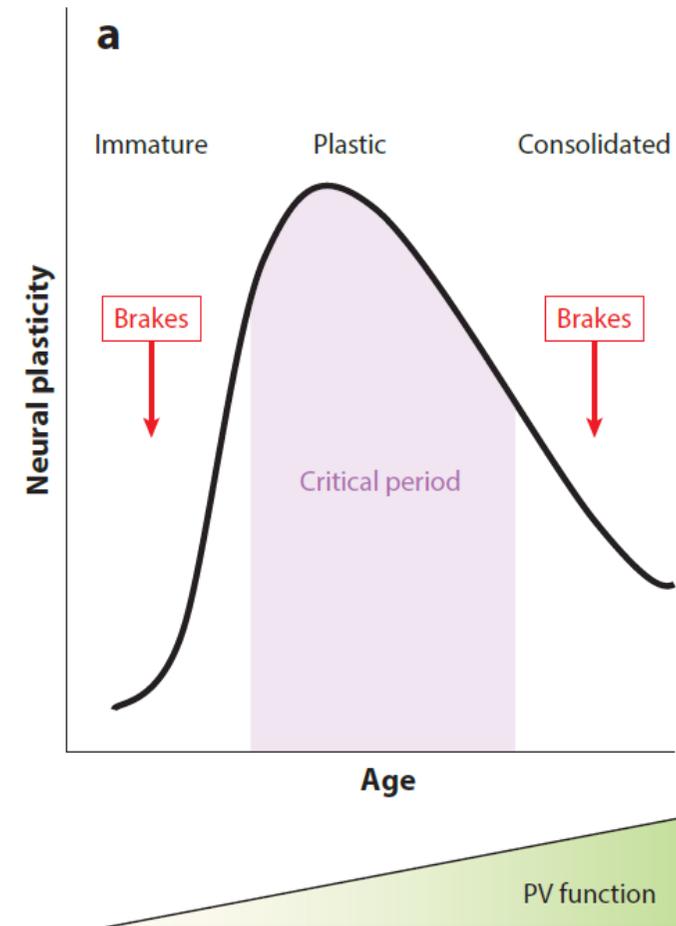
Werker, J. F., & Hensch, T. K. (2014). Critical Periods in Speech Perception: New Directions. *Annual Review of Psychology*. doi:10.1146/annurev-psych-010814-015104

(cf Cours d'Alain Prochiantz)

L'ouverture et la fermeture des périodes critiques sont étroitement liées à la maturation des circuits inhibiteurs qui reposent sur le neurotransmetteur GABA.

Les cellules PV (exprimant la parvalbumine) sont de grands neurones inhibiteurs appelés « cellules en panier » (*basket cells*), présents dans le cortex et l'hippocampe, et dont la maturation joue un rôle essentiel en modulant le rapport excitation/inhibition.

Avec la maturation, ces neurones s'entourent de réseaux péri-neuronaux figés (protéines + sucres), et leurs axones de gaines de myéline, qui en réduisent fortement la plasticité.

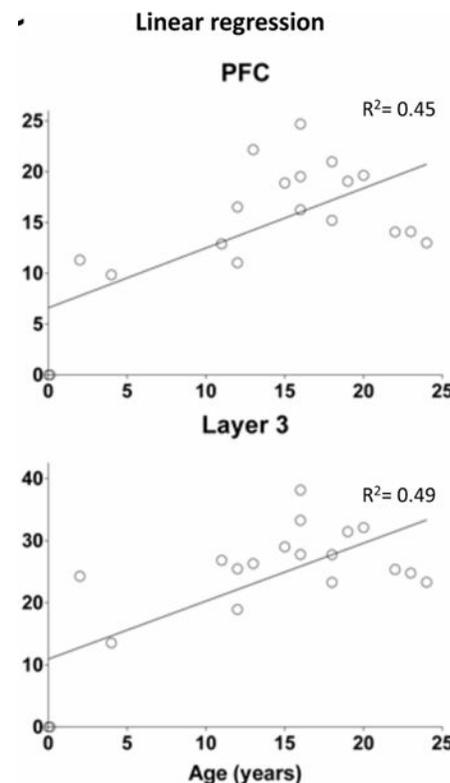
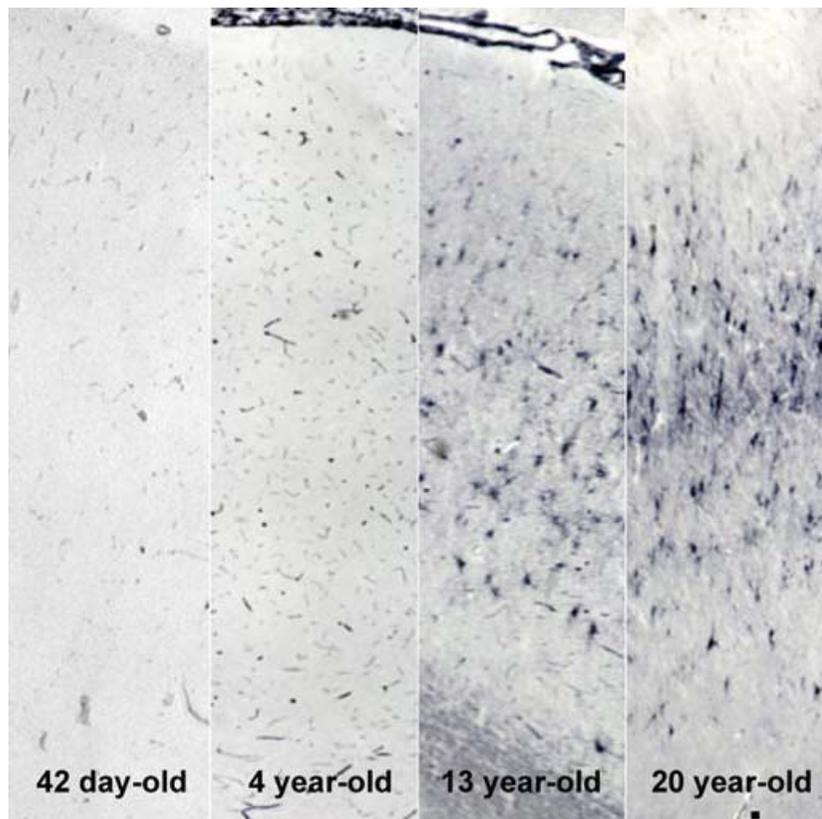


# La maturation des cellules PV est d'autant plus tardive que l'on s'élève dans la hiérarchie corticale

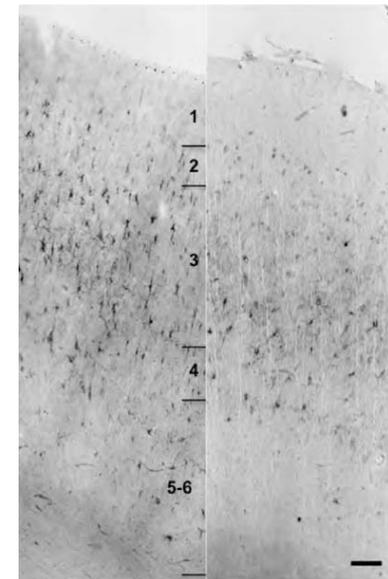
Condé, F., Lund, J. S., & Lewis, D. A. (1996). The hierarchical development of monkey visual cortical regions as revealed by the maturation of parvalbumin-immunoreactive neurons. *Developmental Brain Research*, 96(1–2), 261–276.

Mauney, S. A., Athanas, K. M., Pantazopoulos, H., Shaskan, N., Passeri, E., Berretta, S., & Woo, T.-U. W. (2013).

Developmental pattern of perineuronal nets in the human prefrontal cortex and their deficit in schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 74(6), 427–435.



Un excès de plasticité n'est pas nécessairement bénéfique. La schizophrénie s'accompagne d'une immaturité des cellules PV du cortex préfrontal.



Le développement est particulièrement lent (au-delà de 15 ans!) dans le cortex préfrontal humain.

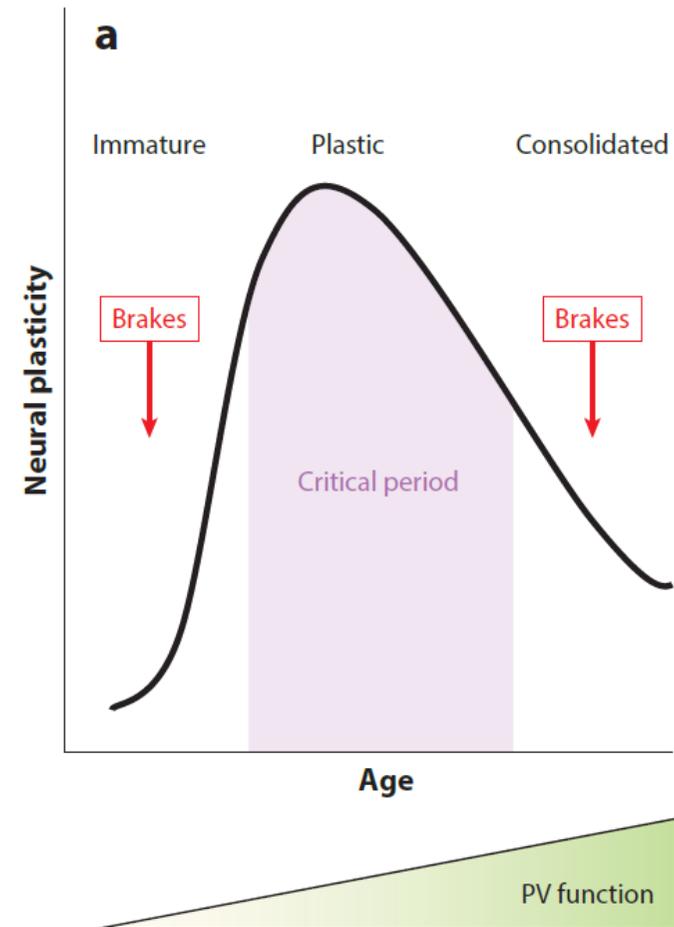
# Les périodes critiques peuvent être modulées: la plasticité peut se refermer ou se rouvrir

Werker, J. F., & Hensch, T. K. (2014). Critical Periods in Speech Perception: New Directions. *Annual Review of Psychology*. doi:10.1146/annurev-psych-010814-015104

L'ouverture et la fermeture des périodes critiques ne dépendent pas uniquement de la maturation cérébrale, mais aussi de facteurs environnementaux et pharmacologiques.

Exemples:

- L'exposition aux benzodiazépines peut accélérer l'ensemble de la fenêtre critique.
- Inversement, la fermeture de la période critique pour la vision binoculaire dans V1 peut être retardée chez un animal élevé dans le noir.



# L'enrichissement de l'environnement augmente les capacités d'apprentissage; la peur les réduit.

Donato, F., Rompani, S. B., & Caroni, P. (2013). Parvalbumin-expressing basket-cell network plasticity induced by experience regulates adult learning. *Nature*, 504(7479), 272–276. Voir Allen, K., & Monyer, H. (2013). Neuroscience: The highs and lows of memory. *Nature*, 504(7479), 228–229.

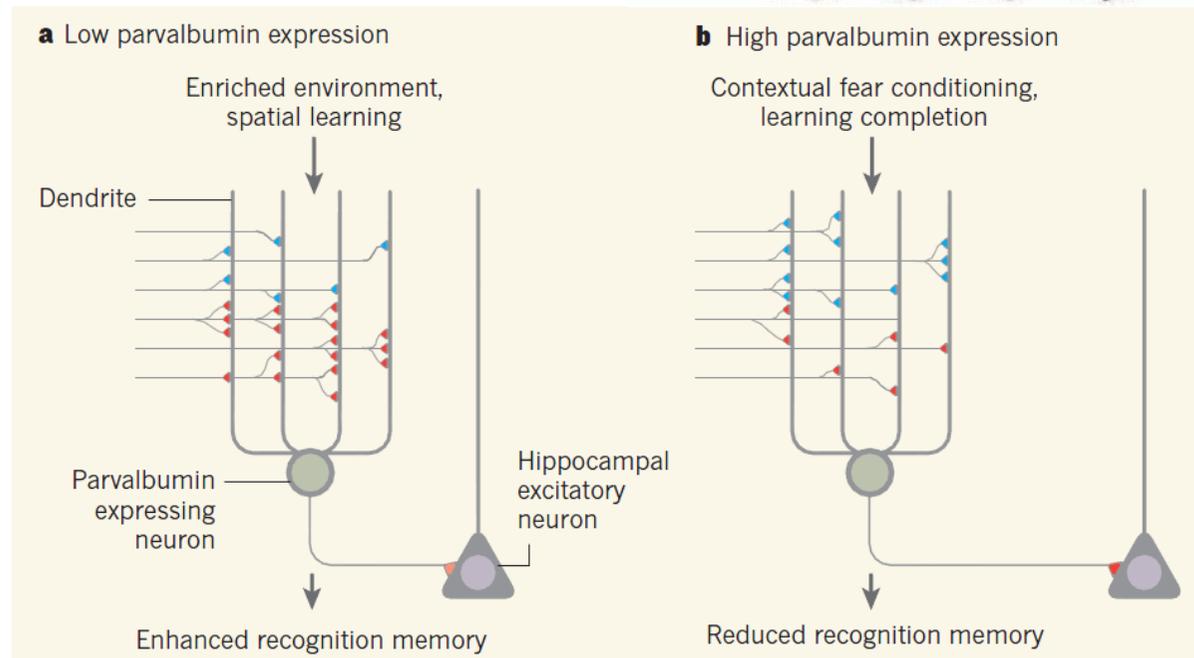
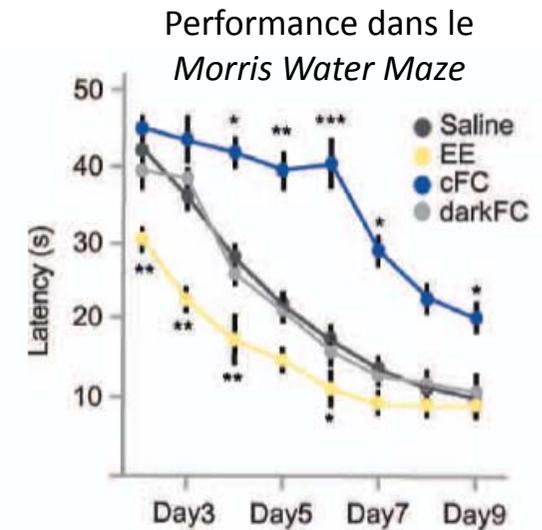
Etude de l'hippocampe de la souris *adulte*.

L'enrichissement de l'environnement facilite l'apprentissage.

Inversement, le fait d'être soumis à un protocole de conditionnement à la peur réduit l'apprentissage.

Cette modulation est liée à un changement de la fraction de synapses inhibitrices sur les cellules en panier exprimant la parvalbumine.

“The learning phase of the Morris Water Maze [MWM] was accompanied by a shift to a low-PV-network configuration **closely comparable to environmental enrichment**, whereas the establishment of a robust reference memory at the end of the learning protocol was accompanied by a shift to a high-PV-network **closely comparable to contextual fear conditioning**.”





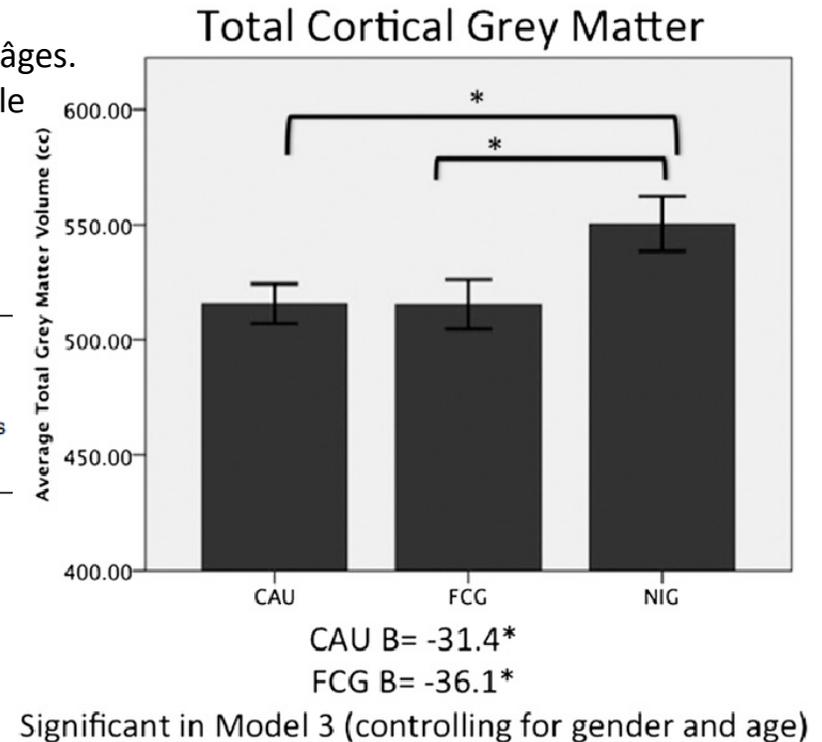
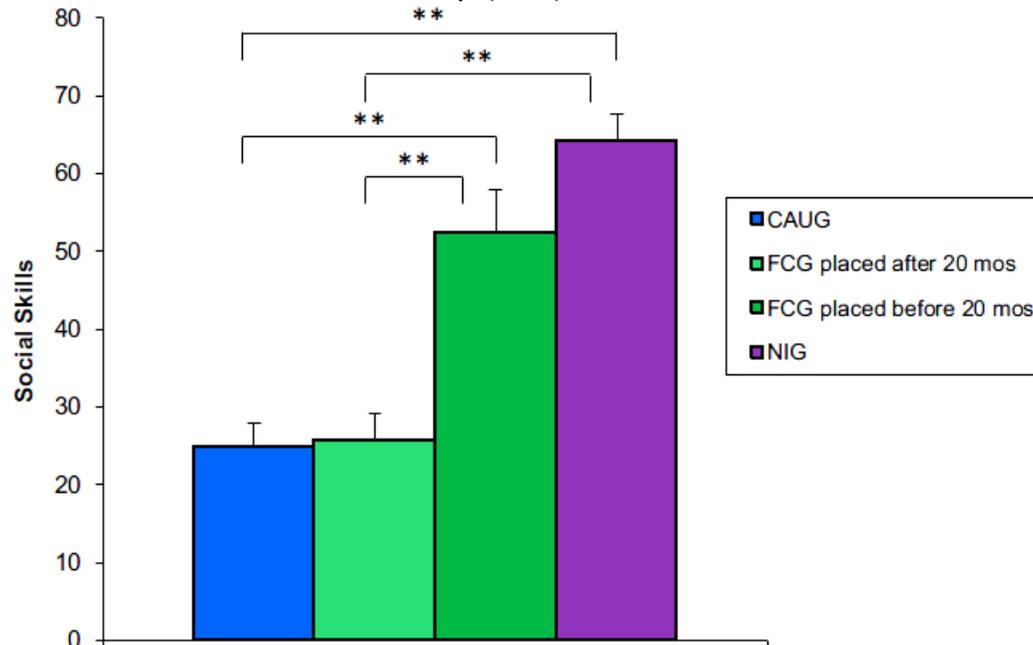
## L'exemple des orphelinats en Roumanie

Nelson, C. A., Zeanah, C. H., Fox, N. A., Marshall, P. J., Smyke, A. T., & Guthrie, D. (2007). Cognitive Recovery in Socially Deprived Young Children: The Bucharest Early Intervention Project. *Science*, 318(5858), 1937–1940.

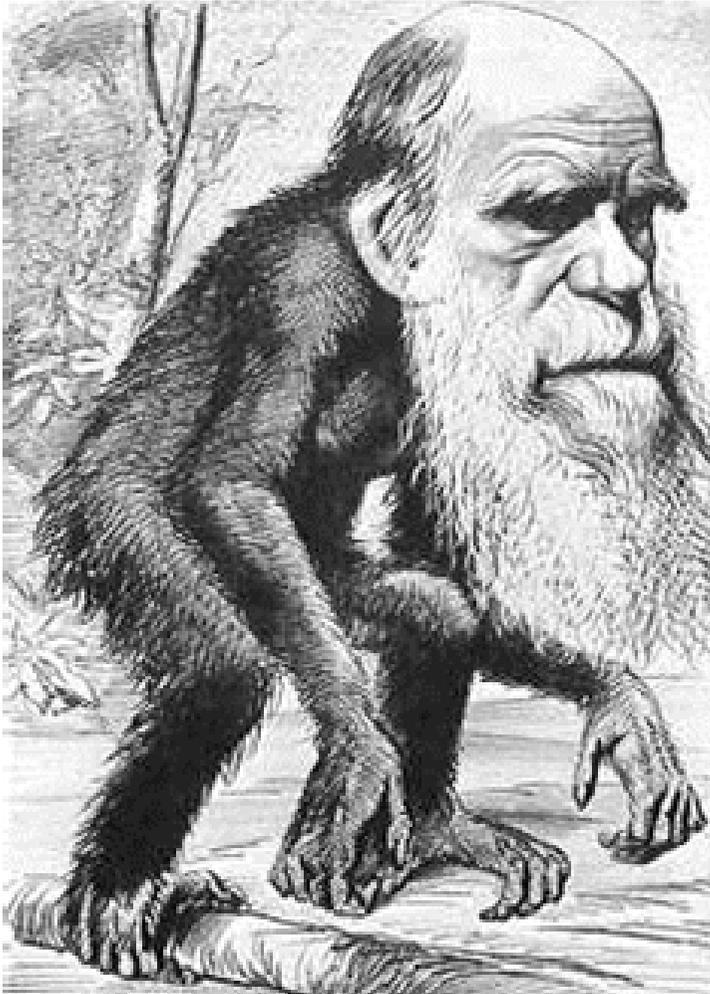
Voir également Almas et al. (PNAS, 2012); Sheridan et al. (PNAS, 2012); Windsor et al. (Journal of Child Language, 2013).

Le “Bucharest Early Intervention Project” dirigé par Chuck Nelson montre l’importance d’un placement familial précoce: Les enfants placés dans des familles montrent des avantages nets de développement physique et mental  
 → Par exemple, avantages dans l’identification de mots et de pseudo-mots, et dans les compétences sociales.  
 → Et ce, en dépit d’anomalies de volume de matière grise.  
 → Plus le placement est précoce, plus l’effet est net. Pas d’anomalie détectée chez les enfants placés avant 20 mois.

- Care As Usual Group (CAUG): enfants restés en institution
- Foster Care Group (FCG): enfants placés dans des familles à divers âges.
- Never-Institutionalized Group (NIG): enfants restés dans leur famille



# Entre contraintes et plasticité: L'éducation vue comme un recyclage neuronal



Le cerveau humain est soumis à des **contraintes anatomiques fortes**, héritées de son évolution. Des cartes neurales structurées sont présentes dès l'enfance et biaisent les apprentissages.

La **plasticité** existe, mais elle est **restreinte et contrainte**.  
**L'éducation tire profit de la très longue fenêtre de plasticité** de l'espèce humaine.

**Les acquisitions culturelles nouvelles** ne sont possibles que dans la mesure où elles sont compatibles avec ces architectures neurales préexistantes, qu'elles **recyclent**.

Chaque objet culturel doit trouver sa « **niche neuronale** » dans le cerveau : un circuit dont le rôle initial est assez proche, et dont la flexibilité est suffisante pour être reconverti à ce nouvel usage.

Chaque circuit possède des propriétés intrinsèques qui le rendent plus ou moins approprié à son nouvel usage. Ces propriétés **contraignent les formes culturelles** et leur confèrent des traits universels.

# Pourquoi le terme de « recyclage neuronal »?



Le concept de **recyclage neuronal** ressemble à celui d'**exaptation** (S.J. Gould) ou de **bricolage évolutif** (F. Jacob): « faire du neuf avec du vieux ». Pourquoi introduire un terme nouveau?

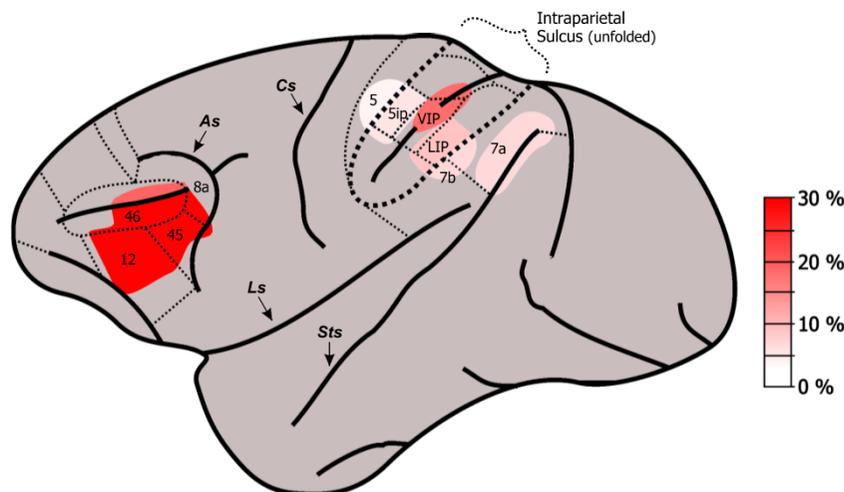
Je propose de réserver le terme de **recyclage neuronal** au cas où une compétence nouvelle se met en place dans le cerveau en quelques semaines ou mois, souvent au cours du développement, **sans changement de notre patrimoine génétique**, uniquement en s'appuyant sur la plasticité cérébrale.

Quelques prédictions s'ensuivent:

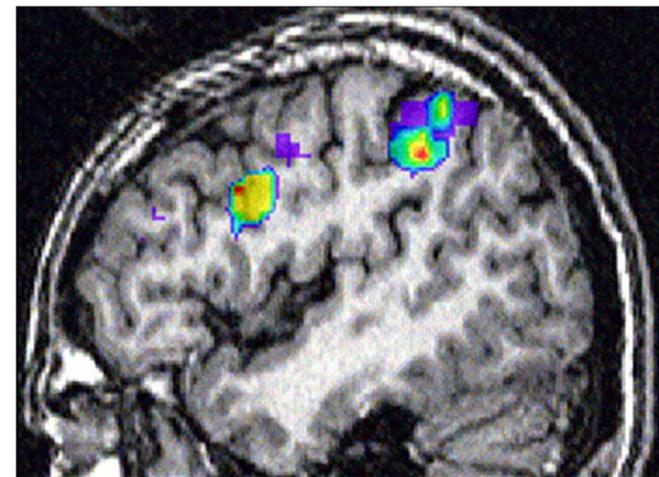
- Existence de **précurseurs cérébraux** pour chaque activité culturelle
- **Double invariance**: (1) les circuits neuronaux associés à chaque activité culturelle sont reproductibles; (2) les cultures partagent de nombreux traits qui trouvent souvent leur origine au niveau neuronal.
- **Contraintes sur l'apprentissage**: La vitesse et la facilité d'apprentissage doivent varier avec la complexité du recyclage neuronal requis.
- **Gains, mais aussi pertes**: L'éducation conduit principalement à des gains de fonction (efficacité, généralisation), mais peut aussi entraîner des pertes (compétition corticale).

# Recyclage neuronal dans le domaine des mathématiques: Le sens du nombre

Nous héritons de notre évolution une représentation approximative du nombre qui sert de fondation à l'apprentissage ultérieur de l'arithmétique exacte.

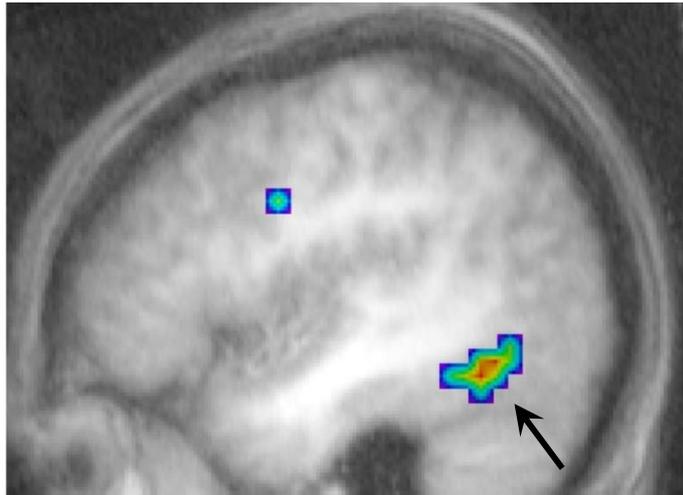


Le sens des nombres chez le singe



Les réseaux de l'arithmétique humaine

L'enfant dispose d'intuitions précoces du nombre et de la géométrie sur lesquelles l'enseignant peut et doit s'appuyer.



## Autre exemple:

### L'aire de la forme visuelle des mots

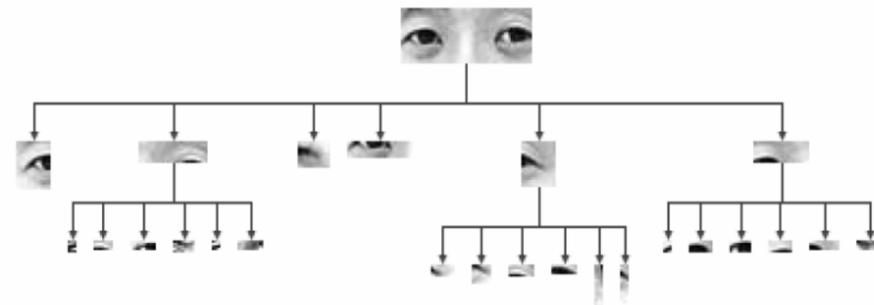
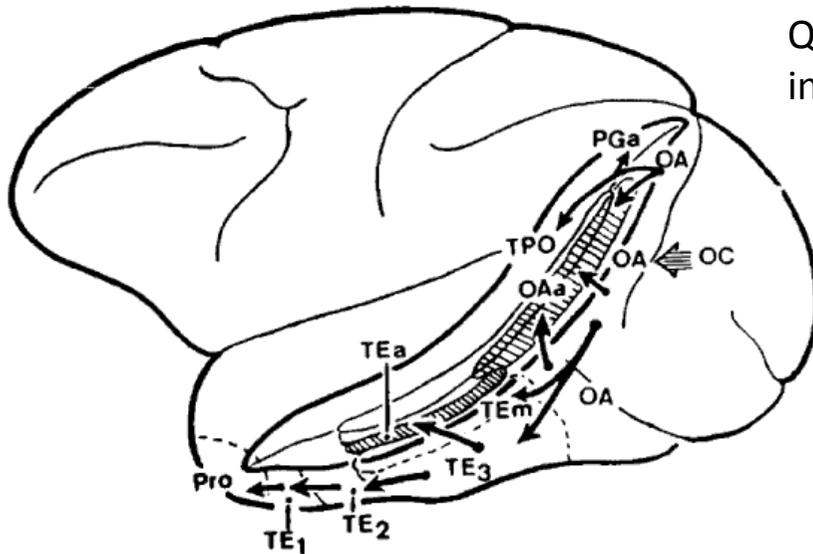
*(Visual Word Form Area, VWFA)*

Une région détectable en quelques minutes d'IRM chez **tous les lecteurs**

Qui répond aux **chaines de lettres** plus qu'aux visages, aux objets, aux lieux, etc.

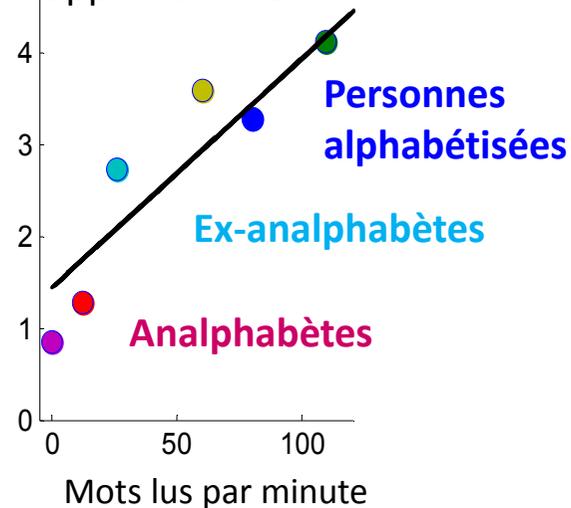
Située au même endroit, dans **toutes les cultures**

Qui recycle les circuits cérébraux de reconnaissance invariante des objets et des visages.

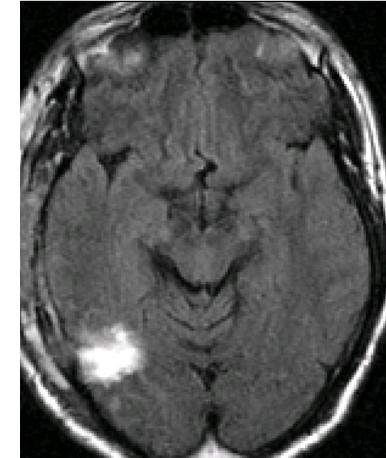


# Etendue et limites de la plasticité dans le domaine de la lecture

Un adulte analphabète développe son aire de la forme visuelle des mots lorsqu'il apprend à lire



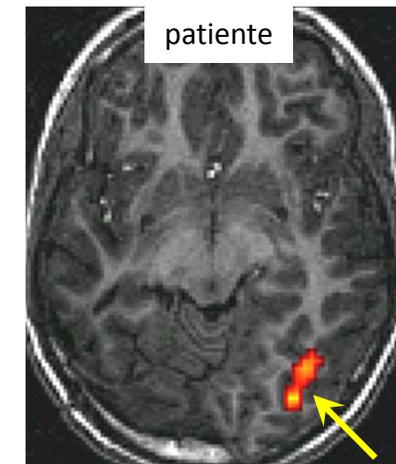
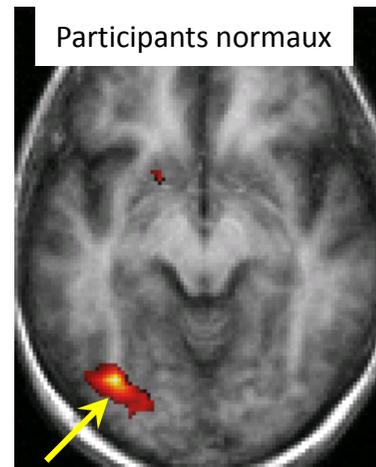
Une lésion de cette région chez l'adulte peut faire disparaître la lecture (*alexie*).



La plasticité est plus élevée chez l'enfant que chez l'adulte.

Une jeune fille dont la région de reconnaissance visuelle des mots a été enlevée chirurgicalement à 4 ans a appris à lire quasi-normalement – avec l'aire correspondante de l'hémisphère droit.

Inversion de l'aire de la forme visuelle des mots



Cohen, L., Lehericy, S., Henry, C., Bourgeois, M., Larroque, C., Sainte-Rose, C., ... Hertz-Pannier, L. (2004). Learning to read without a left occipital lobe: right-hemispheric shift of visual word form area. *Ann Neurol*, 56(6), 890–4.

## Conclusions: conséquences dans le domaine de l'éducation

Chez l'enfant, le cerveau est particulièrement **plastique**, doté de puissants algorithmes d'inférence statistique.

→ La famille et l'école doivent fournir à ce « super-ordinateur » un environnement enrichi, structuré et stimulant, et ce dès le plus jeune âge.

**La plasticité cérébrale est modulée**, positivement par l'enrichissement de l'environnement, négativement par la peur et les émotions négatives.

→ L'environnement d'apprentissage (familial et scolaire) doit être d'une grande richesse, empli de renforcements positifs et libéré de toute peur.

Même des lésions cérébrales massives peuvent être en partie **surmontées**.

→ L'éducation peut moduler, de façon dramatique, le potentiel initial de l'enfant. Les parents et les enseignants sont responsables et ne doivent pas céder au découragement.

Toutefois, il ne faut pas surestimer la plasticité. Le cerveau de l'enfant est **structuré dès la naissance**, ce qui lui confère des intuitions profondes (notamment dans le domaine des objets, de l'espace, des nombres, du langage parlé...), mais aussi impose des limites à l'apprentissage.

→ L'enseignant doit connaître ces intuitions, s'appuyer sur elles. Tous les enfants sont « construits » de la même manière, et les mêmes domaines leur posent des difficultés. Certaines stimulations doivent **absolument** être fournies précocement (par exemple l'exposition à une seconde langue).

# Bibliographie succincte sur le cerveau, l'éducation, et l'apprentissage

## Quelques livres accessibles:

Blakemore, S. J., & Frith, U. (2005). *The Learning Brain: Lessons for Education*. Wiley-Blackwell.

Dumont, H., Istance, D., & Benavides, F. (2010). *Comment apprend-on ? : La recherche au service de la pratique*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

Frith, U. (2011). *Brain Waves Module 2: Neuroscience: implications for education and lifelong learning*. The Royal Society, <https://royalsociety.org/policy/projects/brain-waves/education-lifelong-learning/>

Klingberg, T., & Betteridge, N. (2012). *The Learning Brain: Memory and Brain Development in Children* (Édition : 1.). Oxford ; New York: Oxford University Press, USA.

Pasquinelli, E. (2014). *Du labo à l'école : science et apprentissage*. Paris: Le Pommier.

Sousa, D. (2010). *Mind, Brain, and Education: Neuroscience Implications for the Classroom*. Solution Tree.

Tokuhama-Espinosa, T. (2010). *Mind, Brain, and Education Science: A Comprehensive Guide to the New Brain-Based Teaching*. W.W. Norton & Co.

## Quelques articles de revue:

Meltzoff, A. N., Kuhl, P. K., Movellan, J., & Sejnowski, T. J. (2009). Foundations for a new science of learning. *Science (New York, N.Y.)*, 325(5938), 284–288.

Sigman, M., Peña, M., Goldin, A. P. & Ribeiro, S. (2014) Neuroscience and education: prime time to build the bridge. *Nature neuroscience* 17, 497-502.