

Mieux apprendre : l'apport des neurosciences cognitives

Stanislas Dehaene

Apprendre !

Les talents du cerveau,
le défi des machines



Stanislas Dehaene

Collège de France

Unité INSERM-CEA

de Neuro-imagerie Cognitive

Centre NeuroSpin, Saclay, France

www.unicog.org



AI and the FUTURE OF WORK



Massachusetts
Institute of
Technology



futureofwork.mit.edu | #MIT

*« Si nous ne savons pas
comment nous apprenons,
comment diable savons-nous
comment enseigner ? »*

*Nous devons tous
apprendre à apprendre*

Rafael Reif, Président du M.I.T.

Utiliser les méthodes avancées d'imagerie cérébrale pour poser des questions de psychologie, par exemple :

- Comment apprenons-nous ?
- D'où provient la singularité humaine pour le langage, la lecture, les mathématiques?

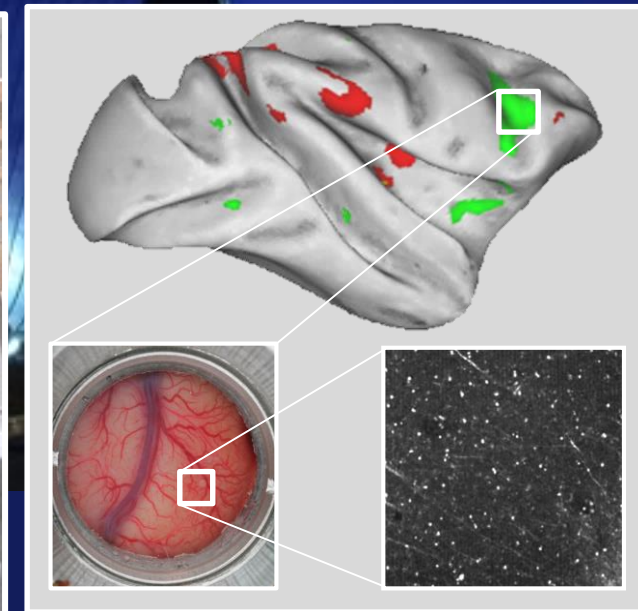
NeuroSpin France

3 IRM pour le cerveau humain:
3T, 7T, et bientôt 11.7 T

Comportement, électro- et magnéto-
encéphalographie

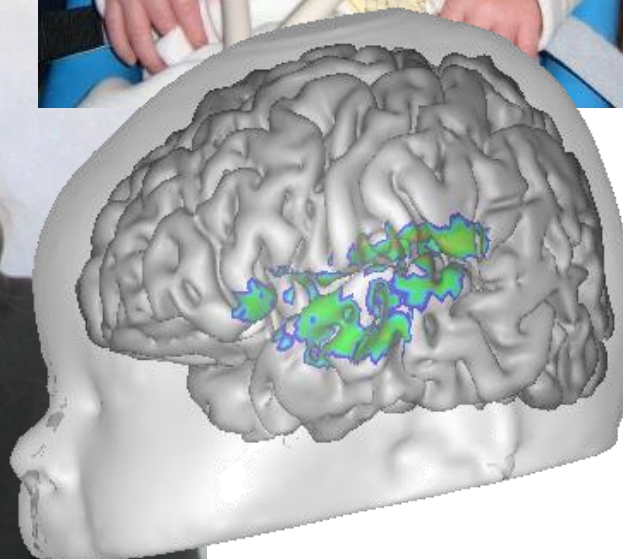
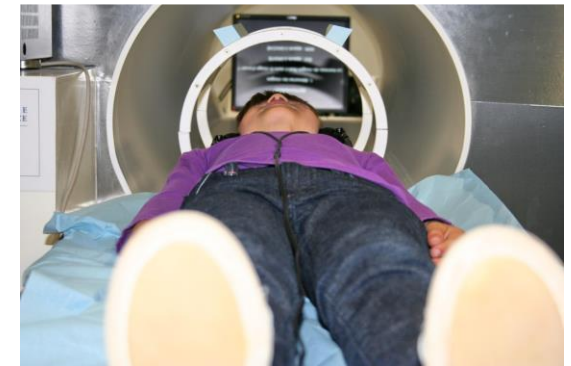
3 IRM pour le petit animal:
7T, 11.7T et 17T

Electrophysiologie et imagerie
3 photons de l'animal éveillé

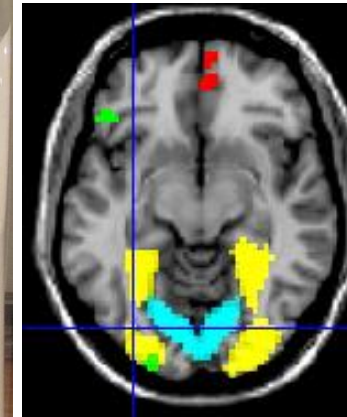


Une spécificité: l'étude du cerveau de l'enfant

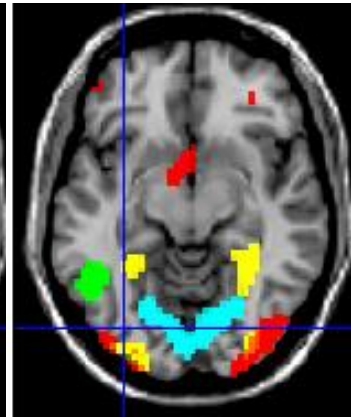
Ghislaine
Dehaene-
Lambertz
(CNRS,
NeuroSpin)



6 ans, non-lecteur



6 ans, lecteur



Le cerveau est plastique, surtout chez le jeune enfant

« L'art de l'escrime »



« Papillons »

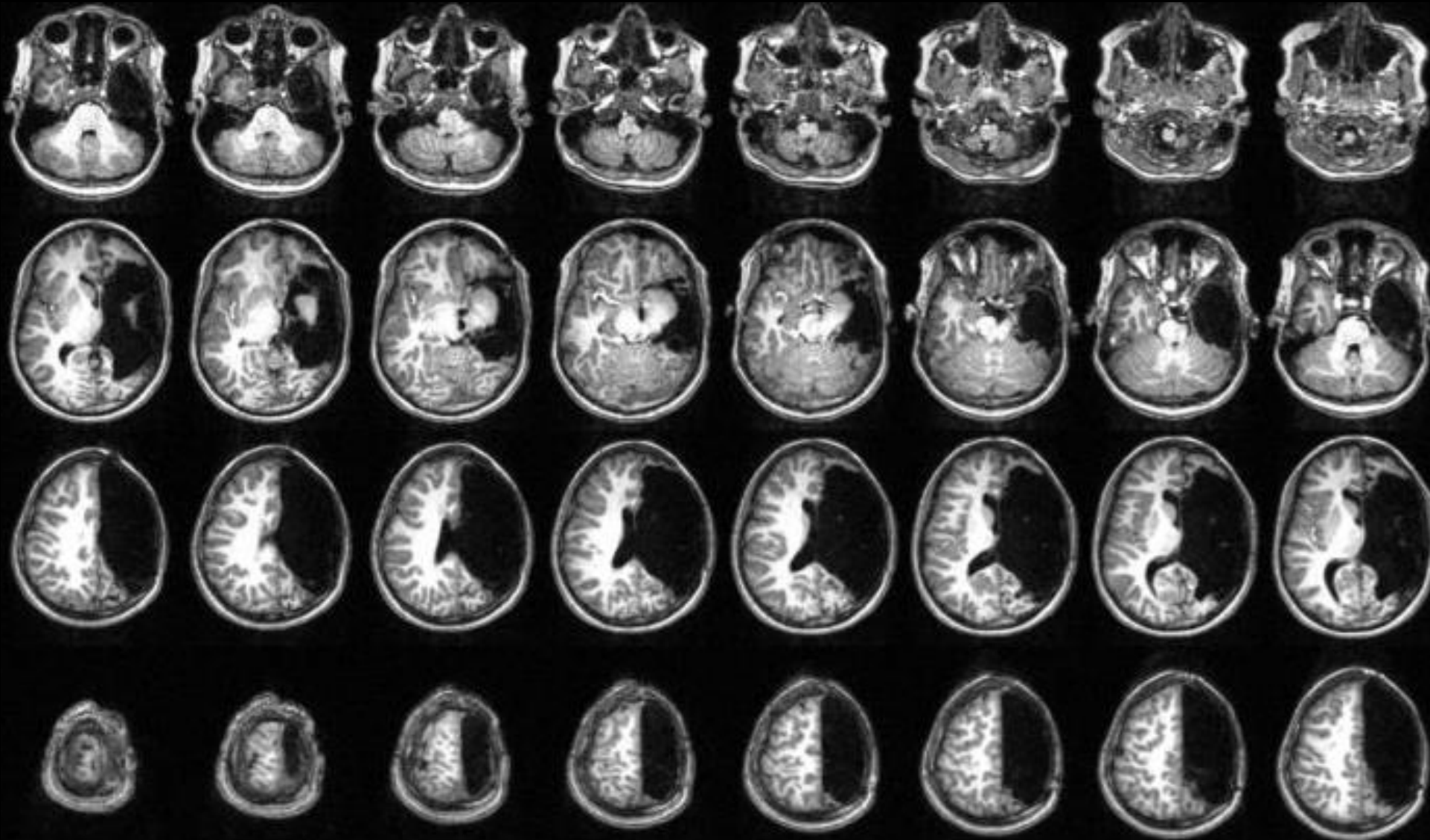




Copie d' "Impression Soleil Levant" de Monet réalisée lors d'un voyage à Paris

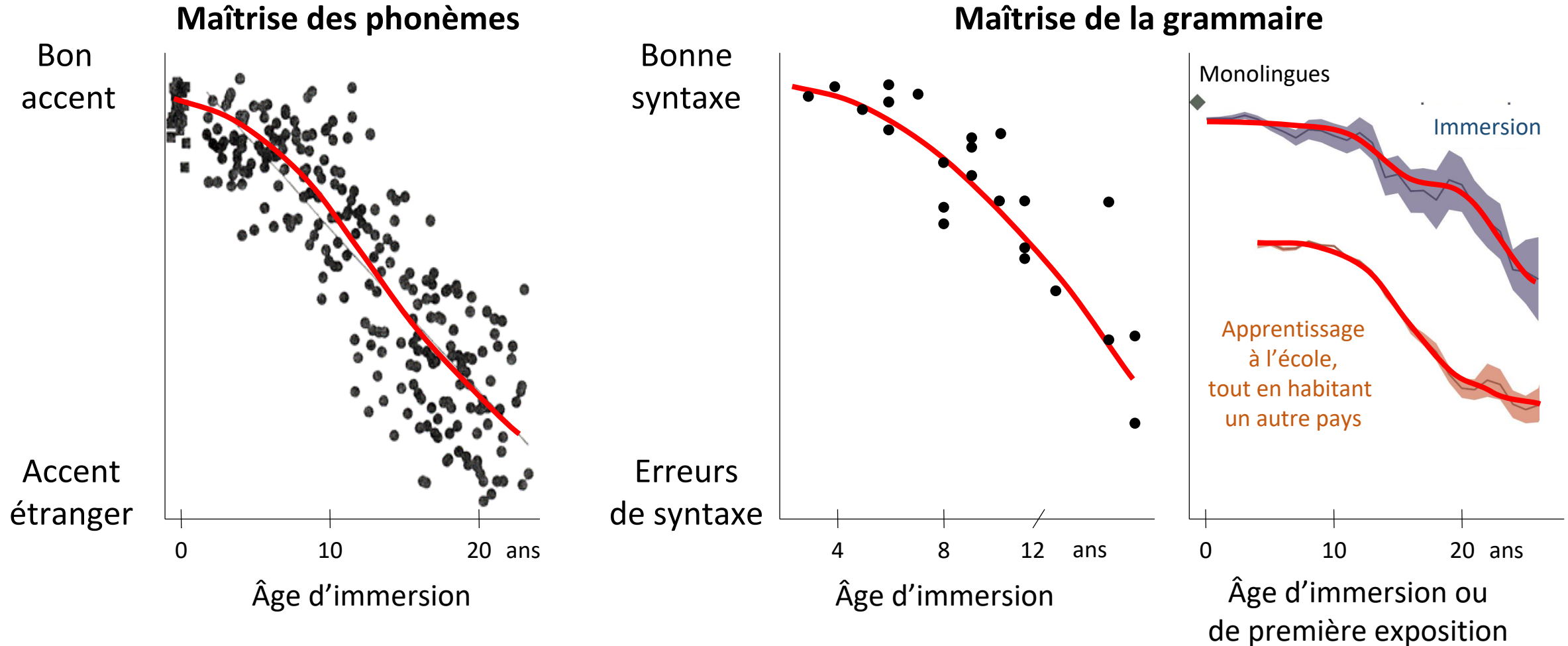
Plasticité cérébrale : Ne jamais se décourager !

Le cerveau de Nico

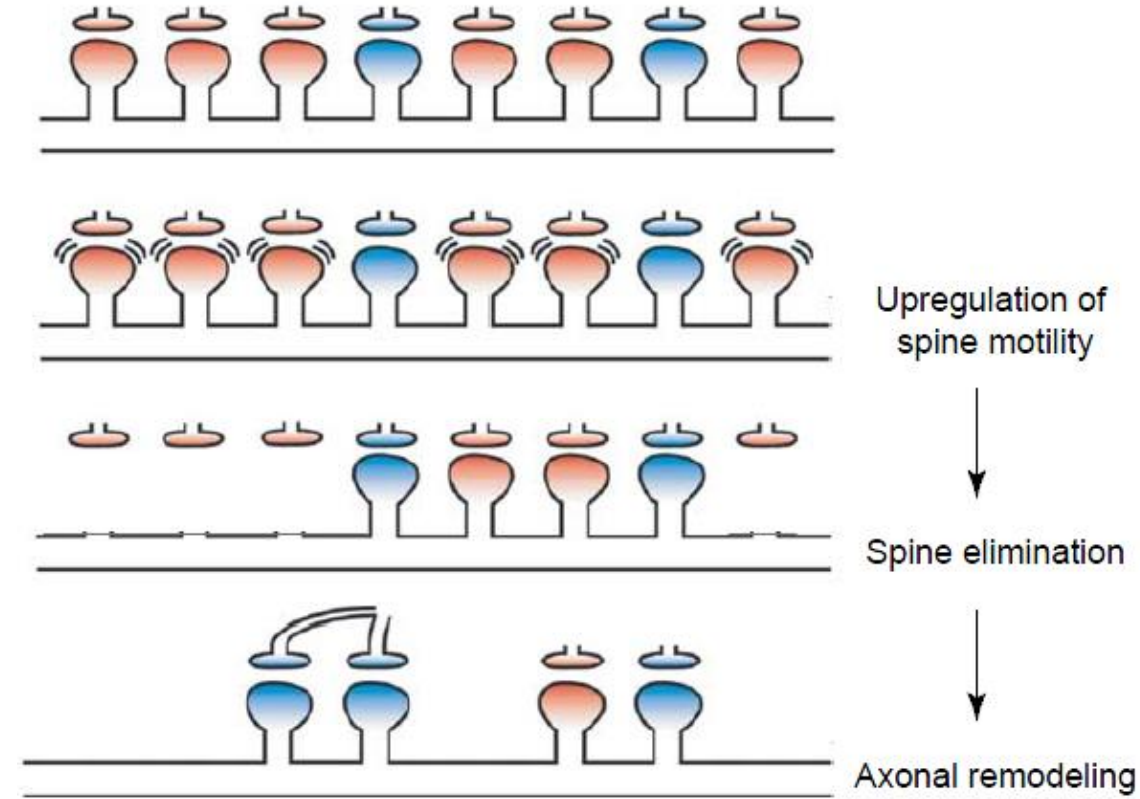
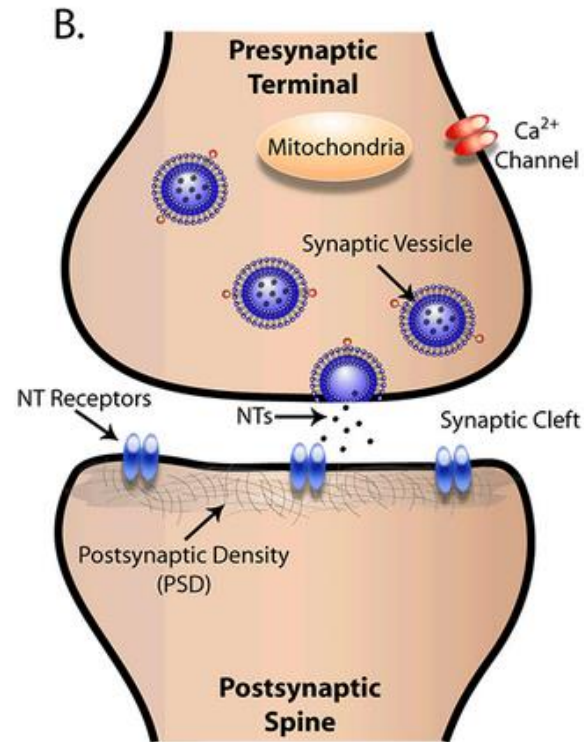
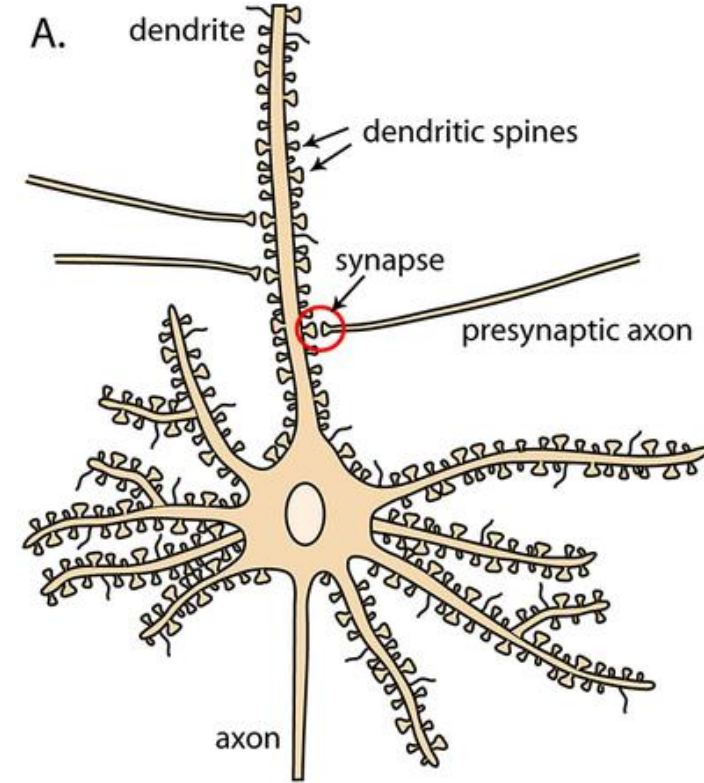


L'apprentissage fonctionne d'autant mieux qu'il est précoce

Exemple: l'apprentissage d'une seconde langue



Qu'entend-on par plasticité cérébrale?



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.

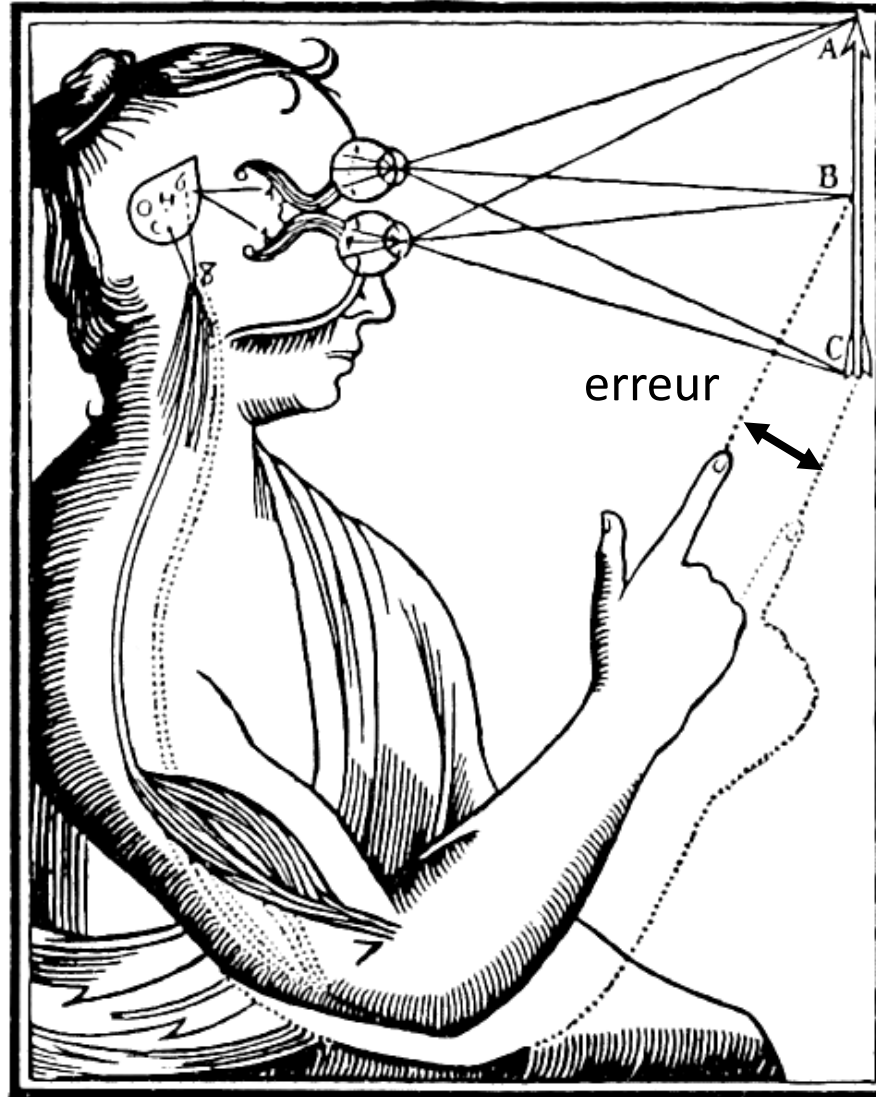
Ces réarrangements synaptiques se produisent à des échelles de temps relativement rapides, par le biais de réarrangements des épines dendritiques.

Le branchement des axones et leur myélinisation peuvent également être modifiés.

Apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle interne

Un exemple simpliste:

Ajuster un paramètre qui relie la vision et la motricité



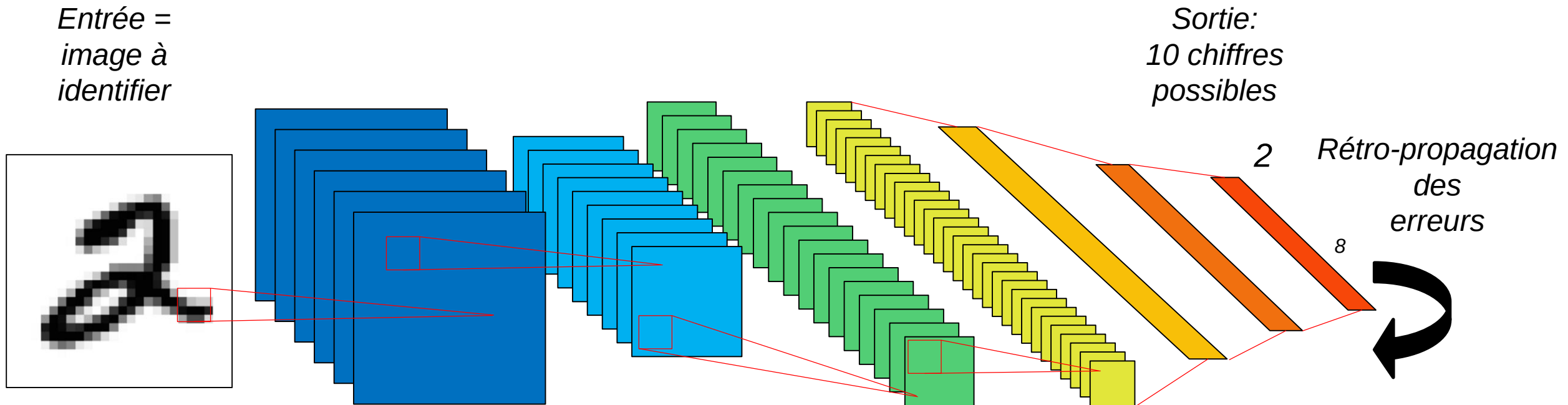
Entrée =
Position sur la
rétine

Sortie =
geste de
pointage

Apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle interne

Un exemple plus complexe:

L'ajustement de millions de paramètres pour reconnaître un chiffre

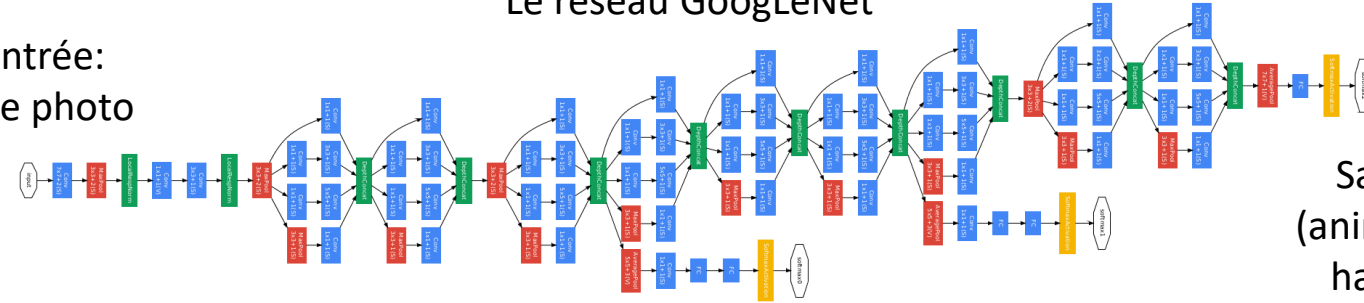


Apprendre à reconnaître des objets,

C'est ajuster les millions de paramètres qui « accordent » les neurones aux formes appropriées

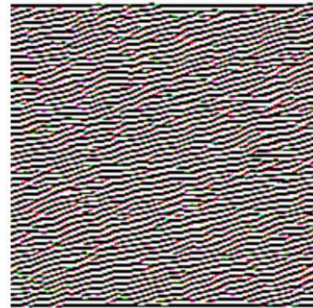
Le réseau GoogLeNet

Entrée:
Une photo



Sortie:
Sa catégorie
(animal, meuble,
habitation...)

Traits



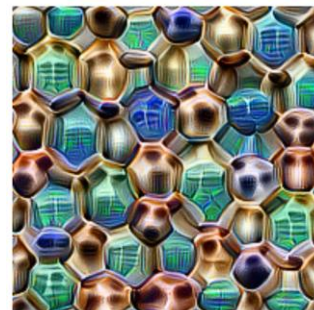
Formes élémentaires



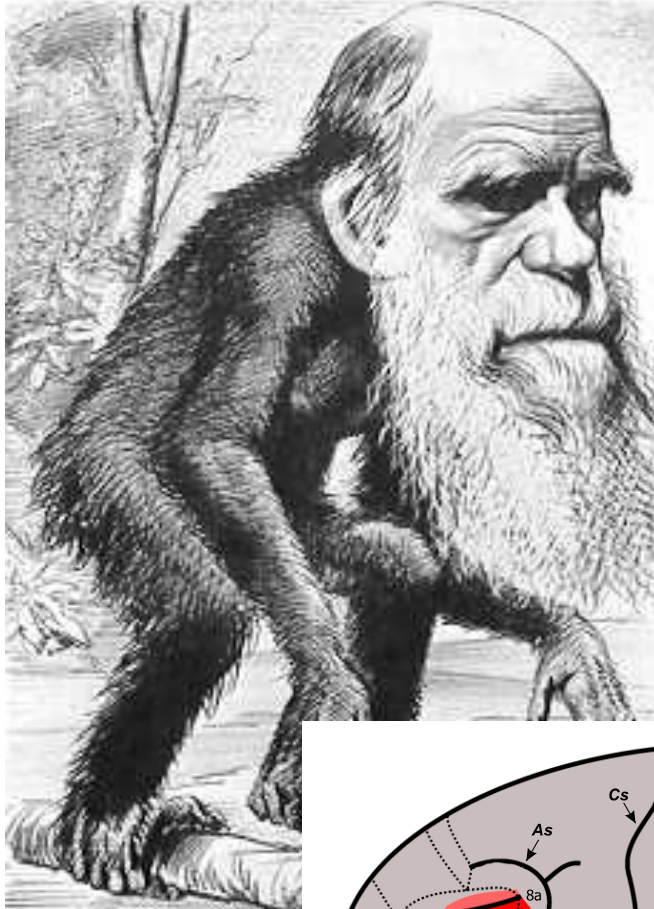
Parties d'objets



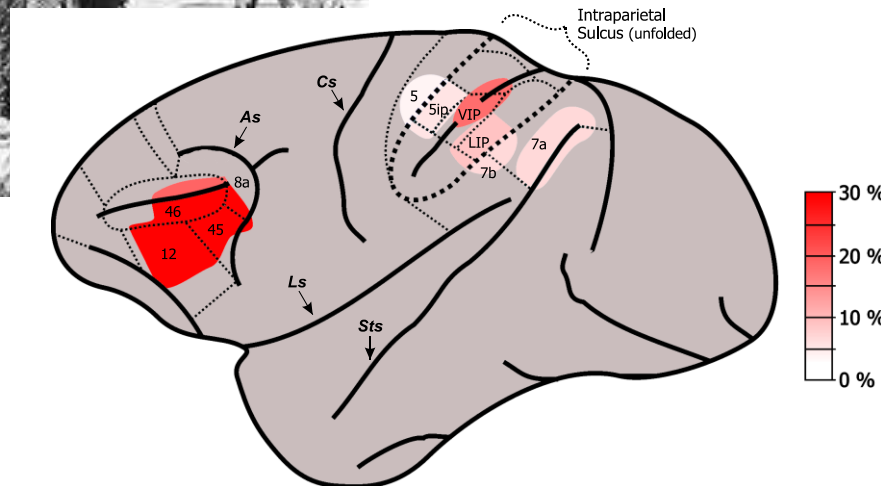
Objets



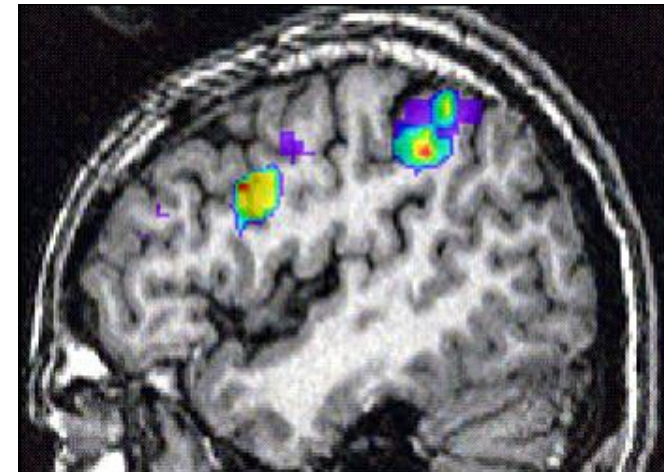
Apprendre, c'est recycler des circuits préexistants



- Nous héritons, de notre évolution, des représentations intuitives de domaines importants pour notre survie:
 - Espace, nombre, langage...
 - Mais pas d'évolution propre à la lecture, à l'écriture, à l'arithmétique formelle!
- L'apprentissage **recycle** ces systèmes cérébraux pour de nouveaux usages culturels.
- L'enfant dispose d'intuitions non-conscientes sur lesquelles l'enseignant peut et doit s'appuyer.



Le sens des nombres chez le singe



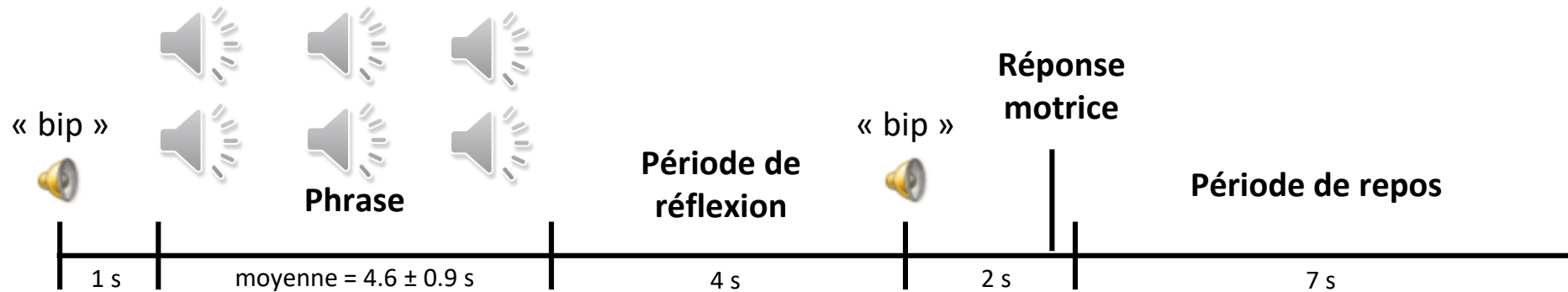
Les réseaux de l'arithmétique humaine

Quelles aires cérébrales sont utilisées chez les mathématiciens professionnels ?

Amalric, M., & Dehaene, S. Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians.
PNAS, 2016

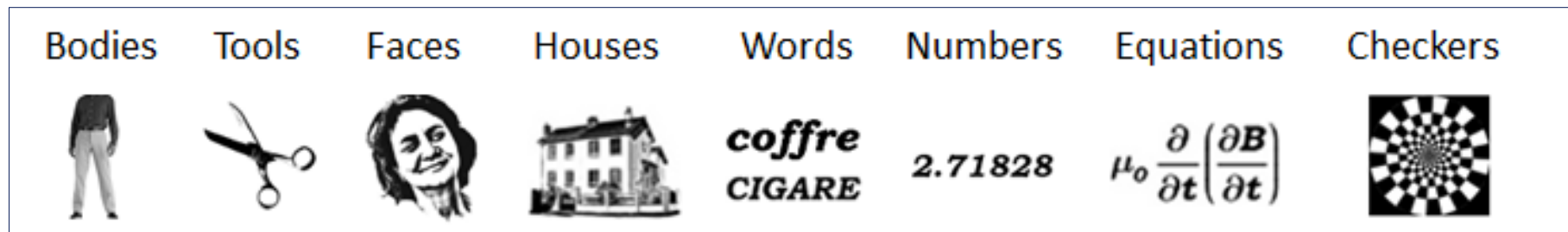
15 mathématiciens professionnels ont été comparés à 15 spécialistes des humanités et des sciences sociales

Tâche principale = jugement rapide, intuitif de la véracité de phrases parlées



Calcul : « Calculez sept moins trois » (comparé à l'écoute de phrases non-mathématiques).

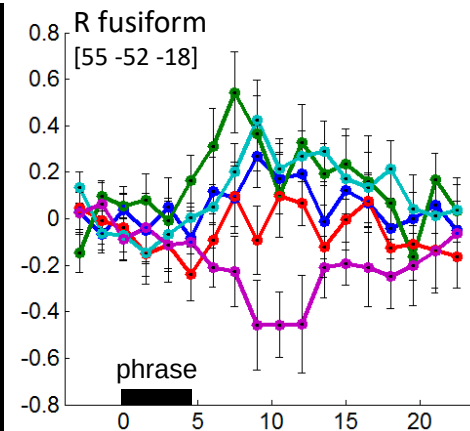
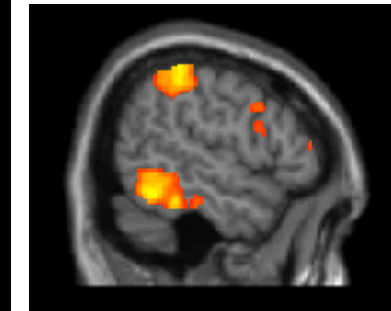
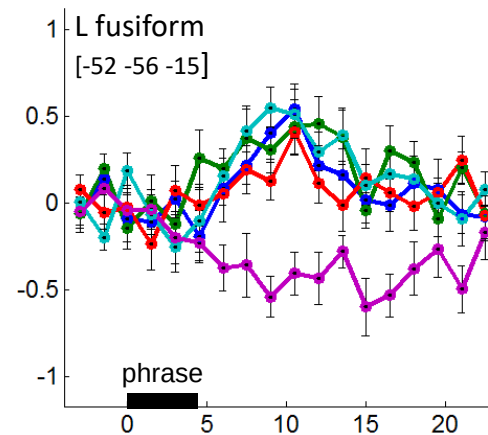
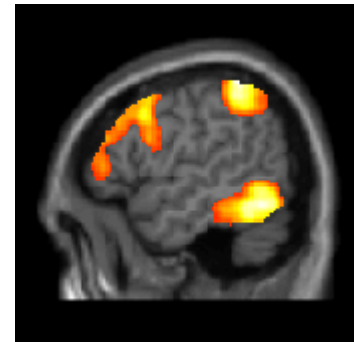
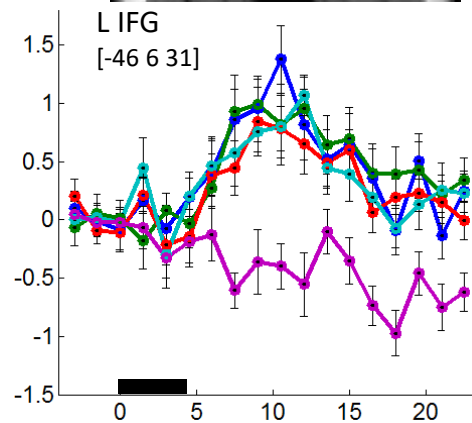
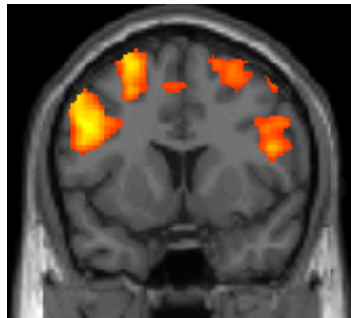
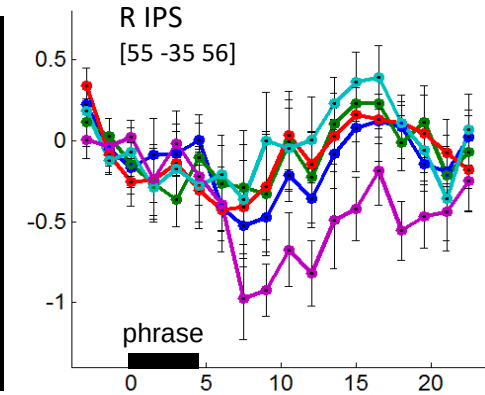
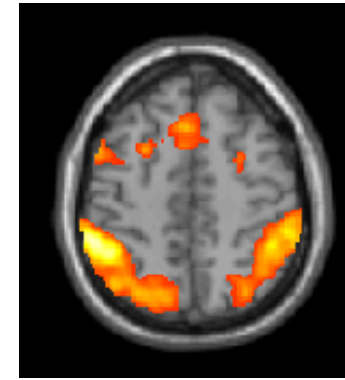
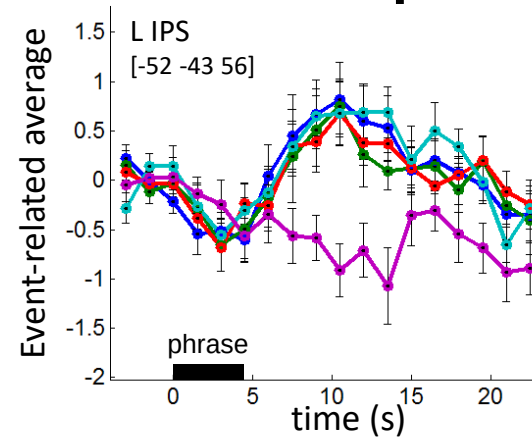
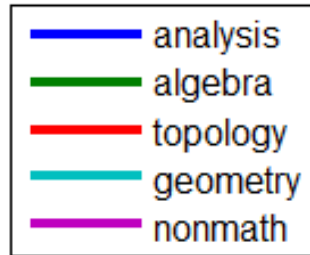
Localisation des aires visuelles :



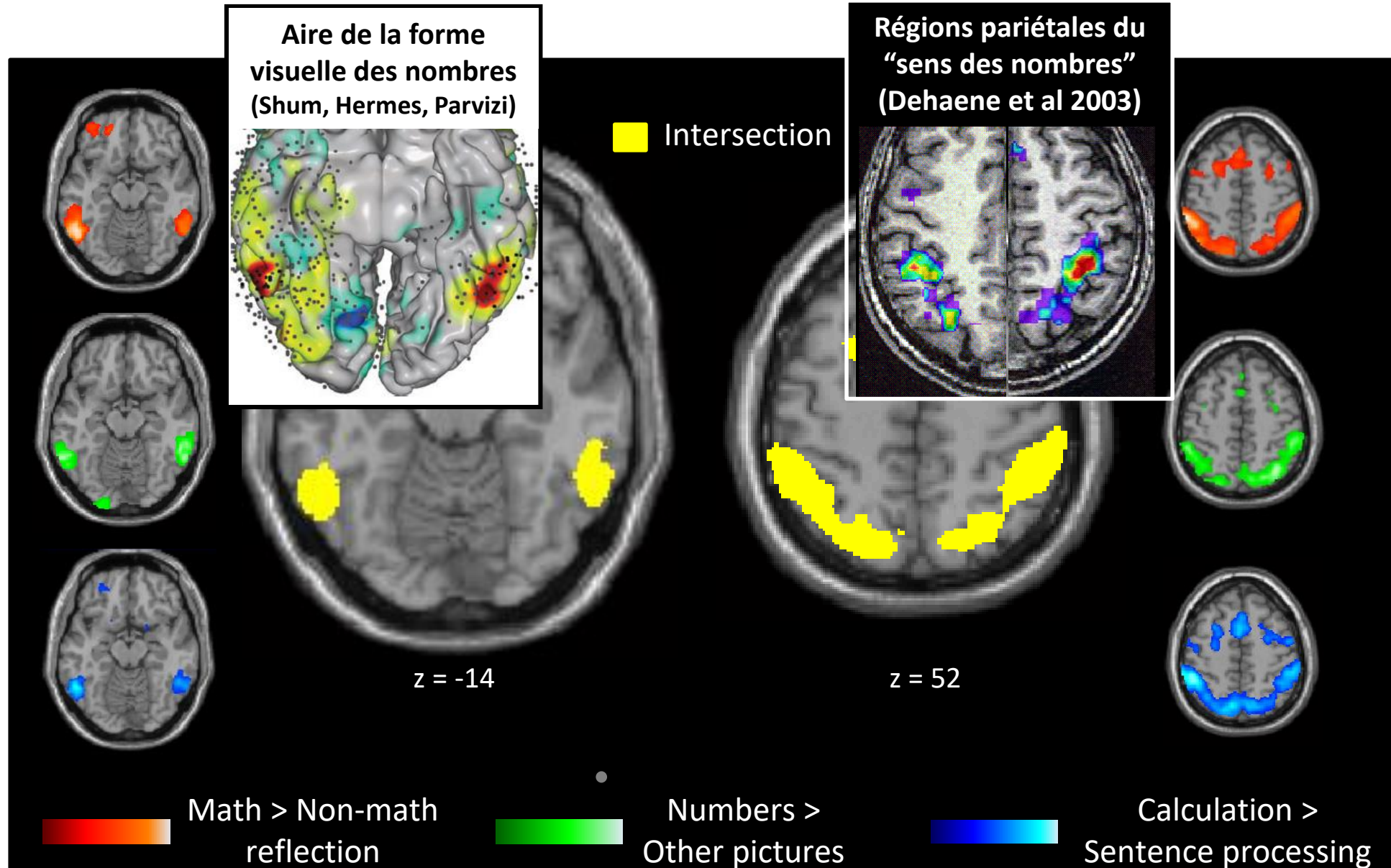
La réflexion mathématique active

les aires pariétales et temporales ventrales

Tous les grands domaines des mathématiques (analyse, algèbre, topologie, géométrie) activent ces régions plus que la réflexion sur des connaissances générales de difficulté égale.



Les mathématiques de haut niveau “recyclent” les réseaux corticaux impliqués dans le calcul et le traitement des nombres.



L'architecture cérébrale de lecture

Apprendre à lire consiste à accéder, par la vision, aux aires du langage parlé.

Régions impliquées dans le traitement du langage parlé

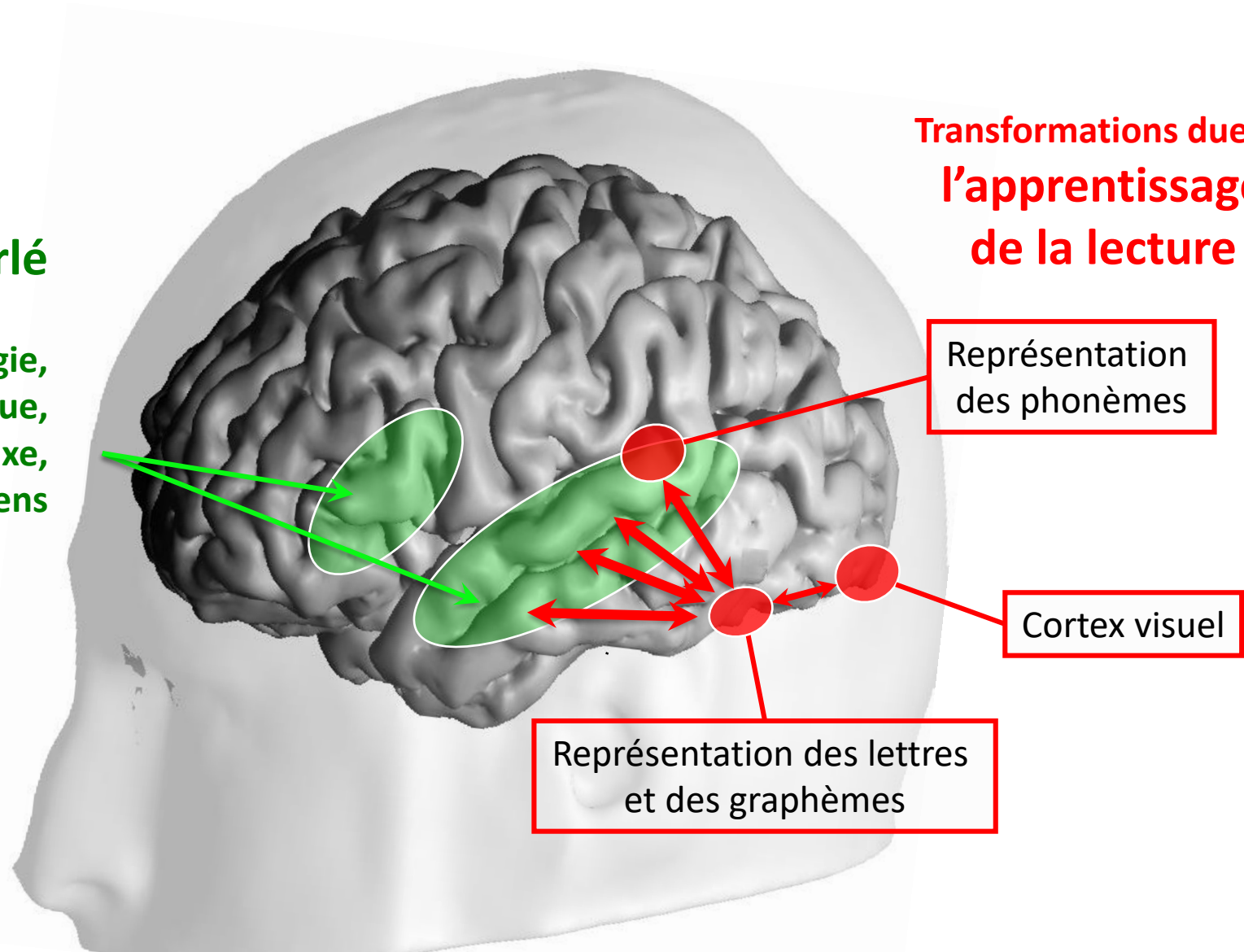
Phonologie,
Lexique,
Syntaxe,
Sens

Transformations dues à
l'apprentissage
de la lecture

Représentation
des phonèmes

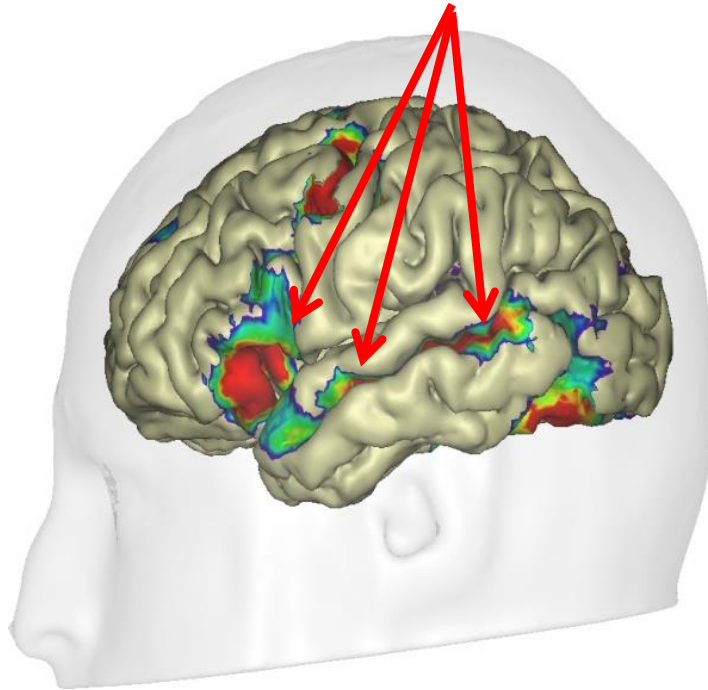
Cortex visuel

Représentation des lettres
et des graphèmes

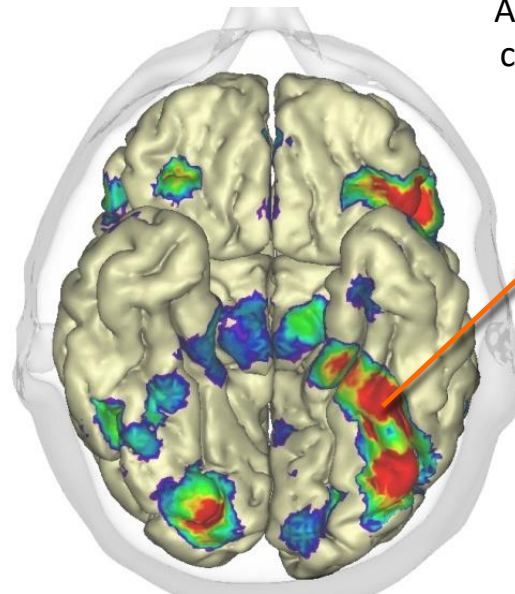


L'apprentissage de la lecture accroît l'activité cérébrale en réponse aux phrases écrites

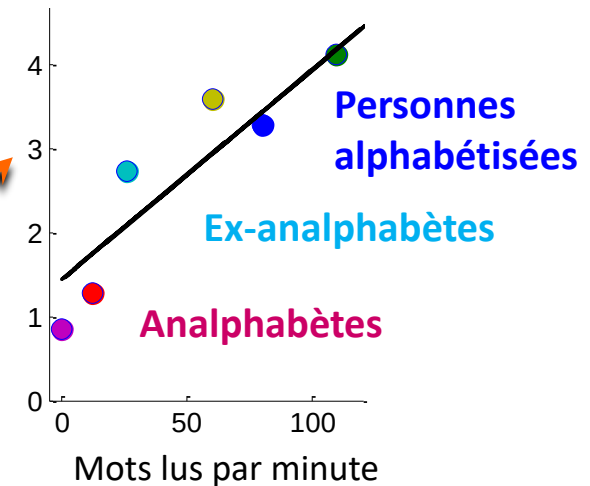
La lecture donne accès aux aires du langage de l'hémisphère gauche



La lecture développe les aires visuelles, et notamment la région occipito-temporale ventrale: l'aire de la forme visuelle des mots



Activation cérébrale

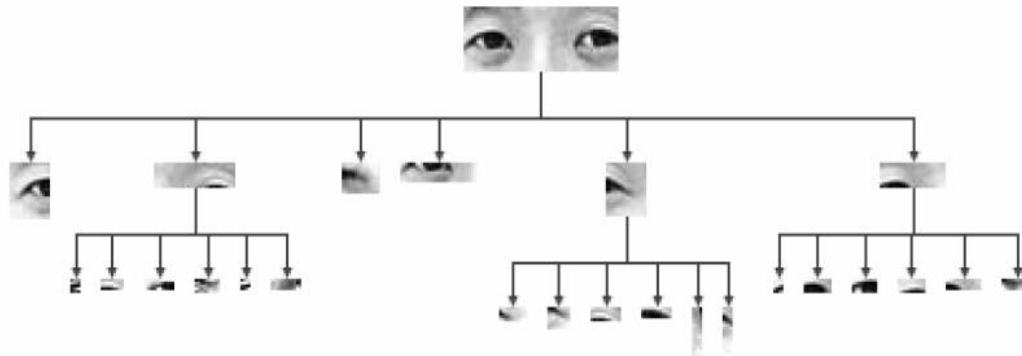
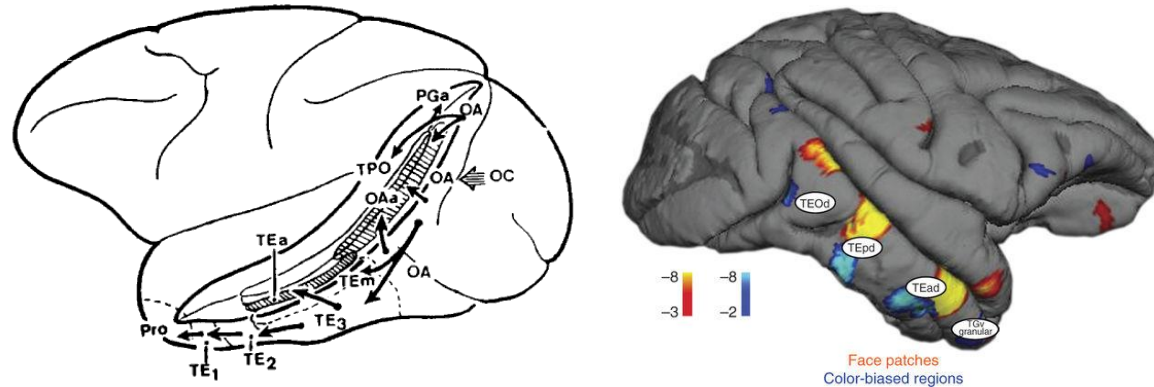


La « boîte aux lettres du cerveau » accroît sa réponse, même chez les personnes qui ont appris à lire à l'âge adulte.

Une hiérarchie neuronale permet la reconnaissance visuelle

Reconnaissance des visages

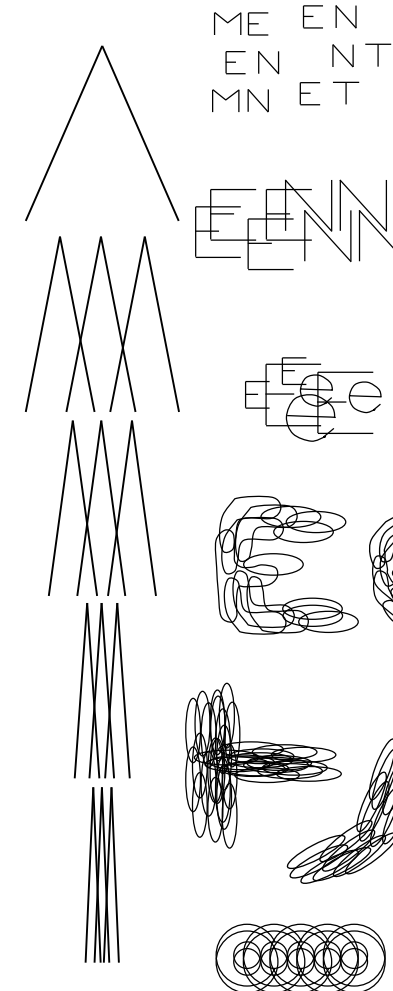
Shimon Ullman; cf Charles Gross, Doris Tsao, David Leopold, Margaret Livingstone



Modèle de la reconnaissance des mots

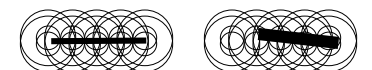
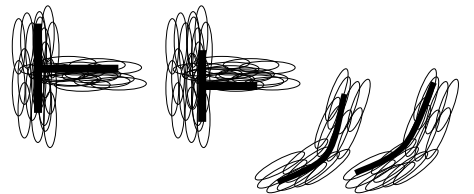
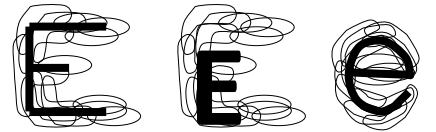
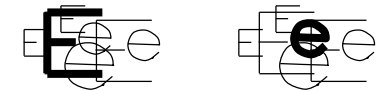
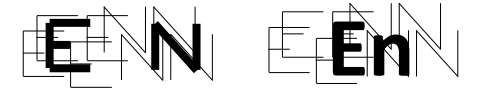
Dehaene, Cohen, Sigman & Vinckier (TICS, 2005)

Taille et structure des champs récepteurs



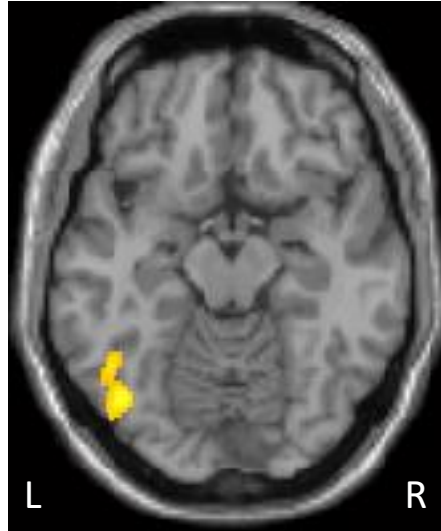
Exemples de stimuli préférés

MENT vraiment
COMMENT



Que fait cette région avant d'apprendre à lire?

Réponse aux mots,
proportionnelle au score de lecture

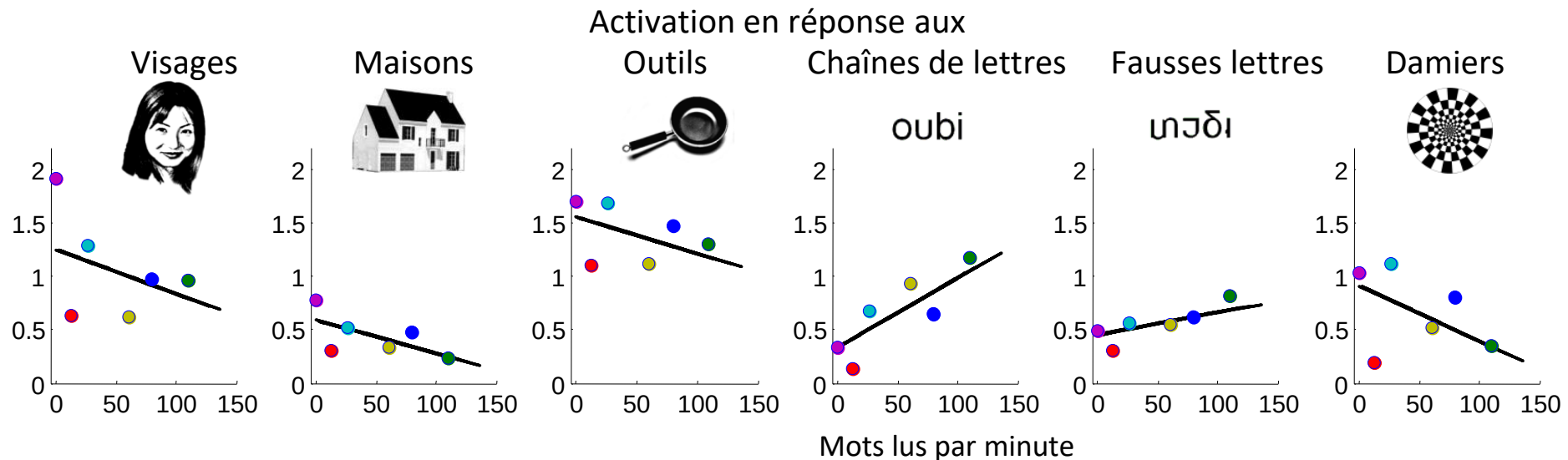
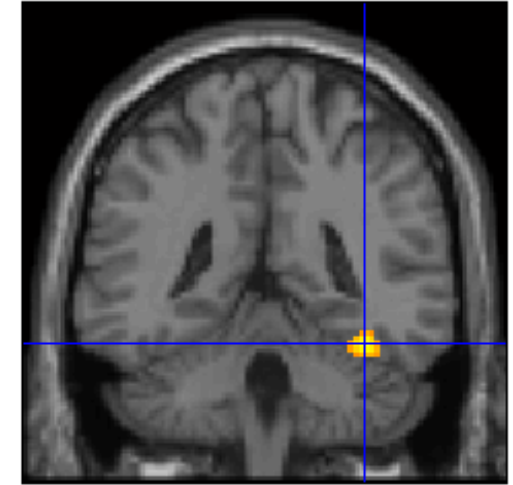


Au niveau du groupe, on observe que cette région, chez les illettrés, répond aux **visages** (et aussi aux outils et aux damiers)

Sa réponse aux visages décroît avec la compétence en lecture.

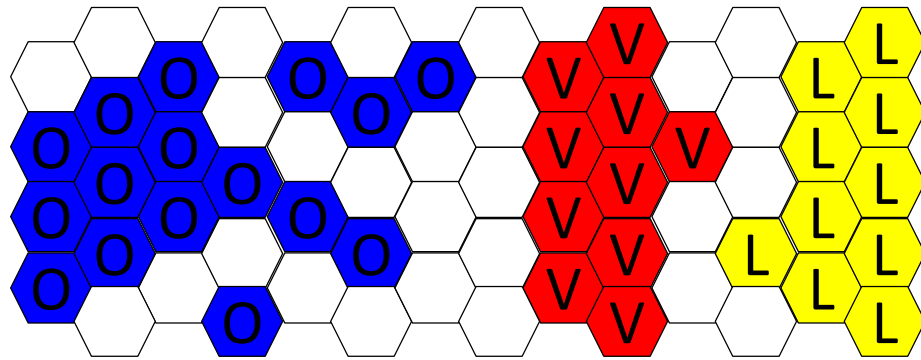
Les visages se déplacent en direction de l'hémisphère droit.

Réponse aux visages,
proportionnelle au score de lecture



Comment l'école transforme le système visuel

Avant l'école



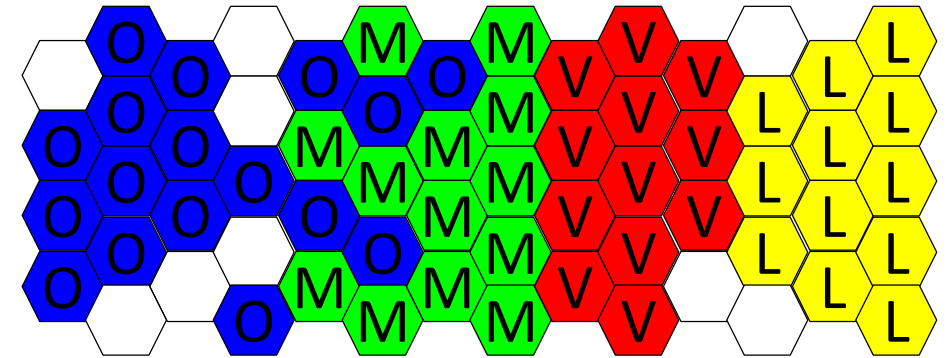
Réponses aux

Objets

Visages

Lieux

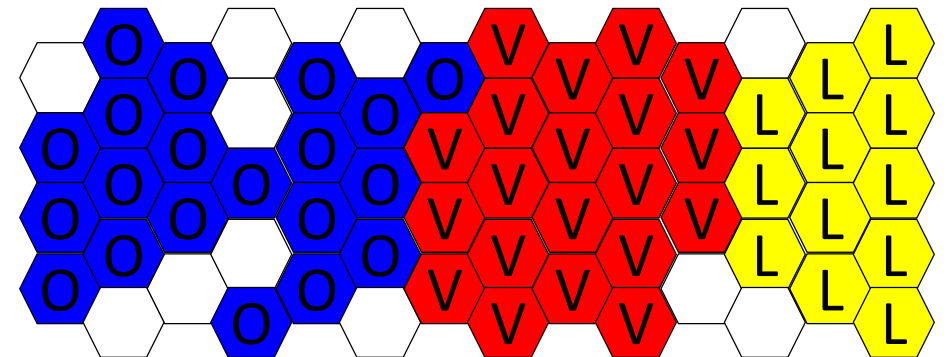
Après l'école (cerveau alphabétisé)



Réponses aux

Mots

Sans école (cerveau non-alphabétisé)



Expansion des

Visages

Quatre piliers de l'apprentissage

Les neurosciences cognitives ont identifié au moins quatre facteurs qui déterminent la vitesse et la facilité d'apprentissage:

- **L'attention**
 - Filtre sélectif qui détermine ce que nous percevons, effectuons et apprenons
- **L'engagement actif**
 - Étudiant engagé dans la génération active d'hypothèses
 - Curiosité et motivation d'apprendre
- **Le retour sur erreur**
 - Signaux d'erreurs détaillés et explicites
 - Importance de se tester pour se corriger
- **La consolidation**
 - L'automatisation: transfert du conscient au non-conscient et libération de ressources.
 - Le sommeil

Premier pilier de l'apprentissage : L'attention

Exemple de la cécité inattentionnelle (*inattentional blindness*)



Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). *Perception*, 28(9), 1059-1074.

Premier pilier de l'apprentissage: l'attention

On appelle « attention » l'ensemble des mécanismes qui nous permettent de **sélectionner** une information et ses étapes de traitement.

Au moins trois systèmes attentionnels (selon Michael Posner):

- **alerte** ou vigilance : **quand** faisons-nous attention ?
 - **orientation** (spatiale ou focale): **à quoi** faisons-nous attention ?
 - **contrôle** exécutif: **comment** traitons-nous les informations :
concentration sur une chaîne de traitements appropriée, résolution des conflits entre tâches, détection et correction des erreurs...
-
- L'attention module massivement l'activité cérébrale. Elle peut faciliter l'apprentissage, mais aussi l'orienter dans la mauvaise direction.
 - Peut-être le plus grand talent d'un enseignant consiste à **canaliser et captiver**, à chaque instant, **l'attention de l'enfant**, afin de l'orienter vers le niveau approprié
 - Mais aussi **lui apprendre à faire attention**.

L'attention agit comme un filtre, qui commence à être implémenté en intelligence artificielle



A woman is throwing a frisbee in a park.



A giraffe standing in a forest with trees in the background.



A little girl sitting on a bed with a teddy bear.

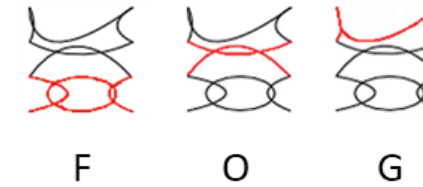
L'orientation de l'attention module massivement l'apprentissage

- 30 adultes sont entraînés pendant 20 minutes, avec 16 mots, soit à une lecture « globale », soit à une lecture « phonique ».

Résultats:

- L'attention change radicalement le circuit utilisé.
- Seul l'entraînement « phonique » active la région de la forme visuelle des mots. **L'entraînement global active les circuits inappropriés de l'hémisphère droit.**
- Le groupe « global » apprend uniquement sa liste de 16 mots, mais **aucune généralisation** (58% de réussite = le niveau du hasard), contre 79% de réussite pour le groupe « phonique ».

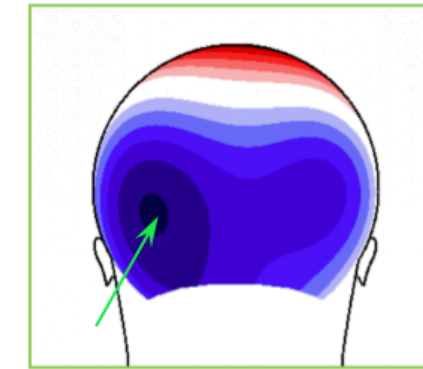
Apprentissage local, phonique :



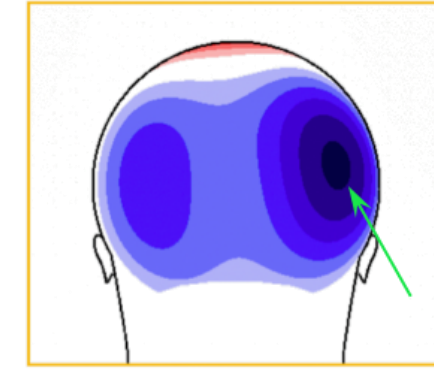
Apprentissage global :



Mots appris :

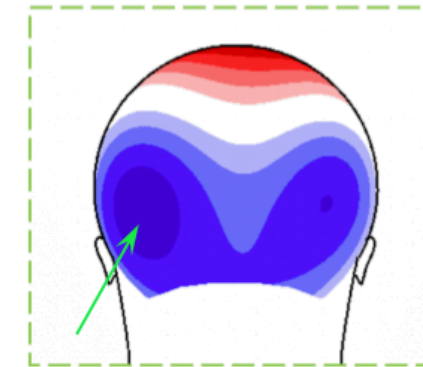


89 % de réussite

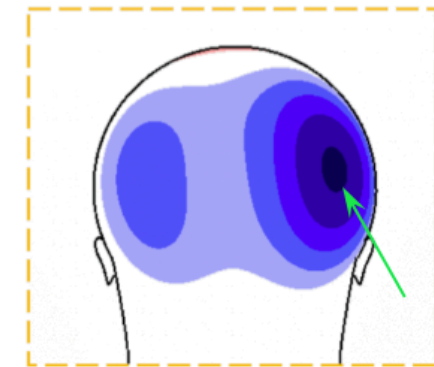


95 % de réussite

Mots nouveaux :



79 % de réussite



58 % de réussite
(réponse au hasard)

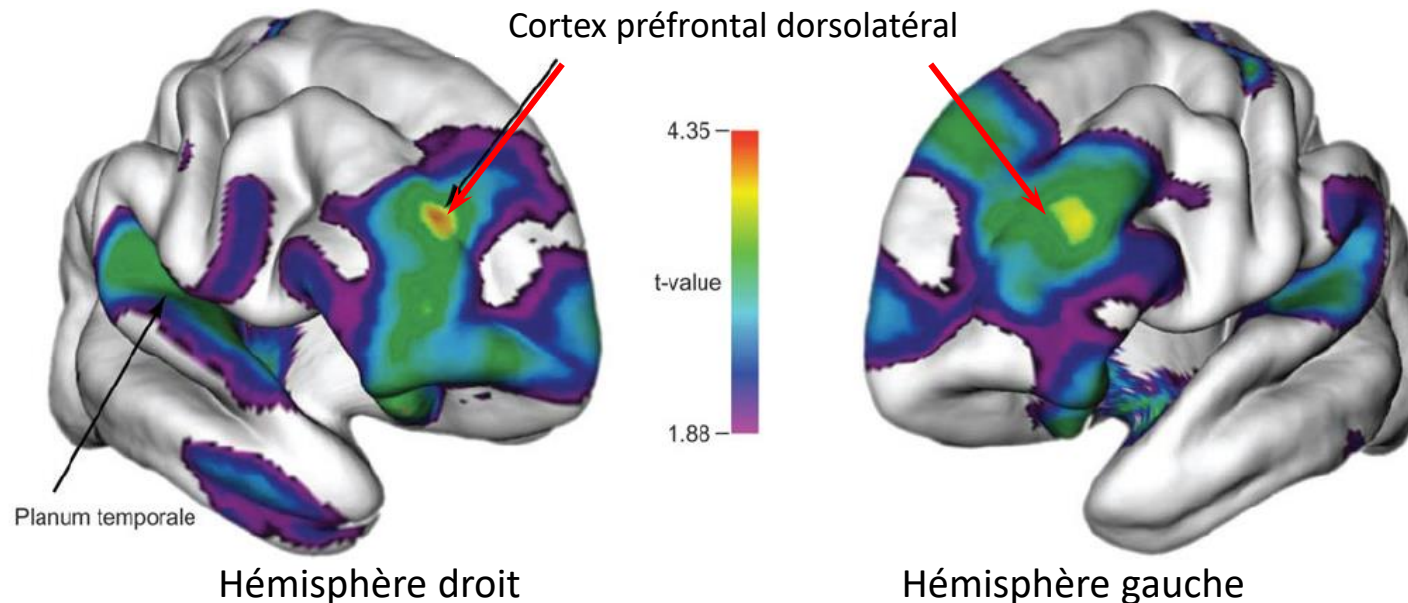


Apprendre à faire attention

De nombreux exercices développent
l'attention et la concentration:

Les jeux vidéos, la méditation, les exercices de type
« Montessori », la pratique d'un instrument de musique...

L'éducation musicale s'accompagne de changements d'épaisseur
dans les aires du cortex associées au contrôle de soi.



Dans l'espèce humaine, l'orientation de l'attention dépend de signaux sociaux qui déterminent l'apprentissage

Le suivi du regard (**attention partagée**) détermine ce que l'enfant examine et apprend.



Peu ou pas d'apprentissage linguistique en l'absence d'attention partagée.

→ L'enseignant joue un rôle clé : par son attitude, il détermine l'attention de l'étudiant.

Piliers 2 et 3. L'engagement actif et le retour sur erreur

Un organisme passif n'apprend pas.

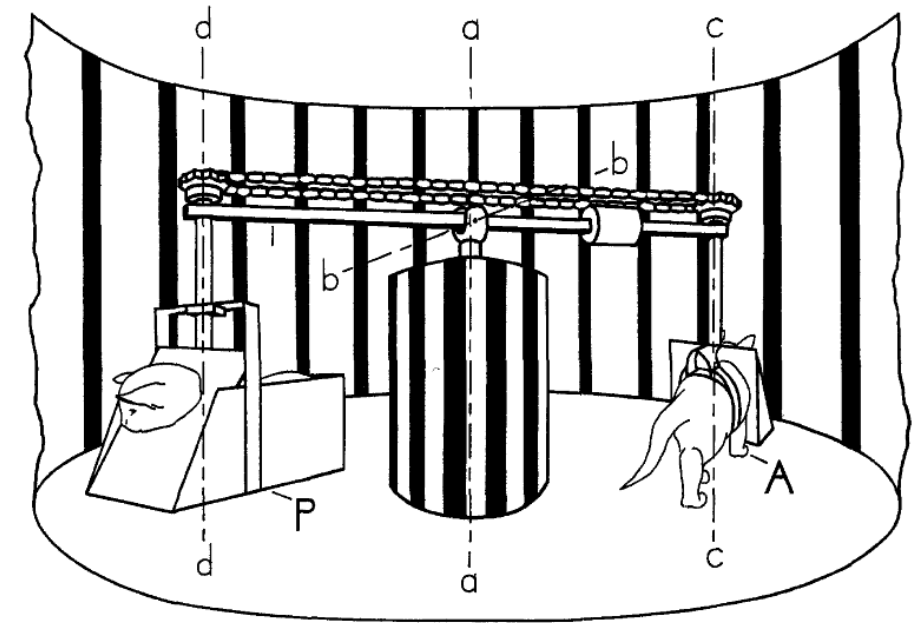
L'apprentissage est optimal lorsque l'étudiant alterne **étude** et **test répété de ses connaissances**.

- **Emission d'hypothèses** et **retour sur erreur**
- savoir ce qu'on ne sait pas (métacognition).

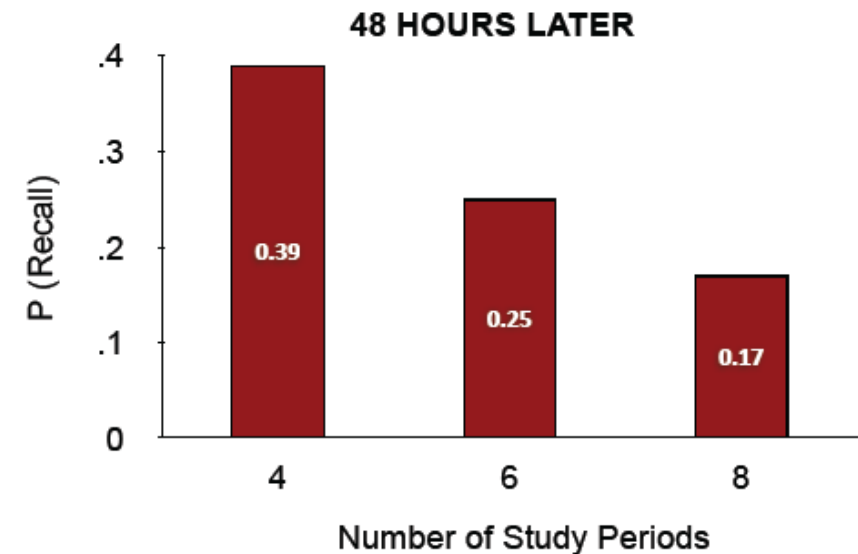
Vaut-il mieux étudier ou se tester?

ST ST ST ST	4 study, 4 test
ST SS ST SS	6 study, 2 test
SS SS SS SS	8 study, 0 test

Expériences de Henry Roediger et al. (notamment *Science*, 2008)



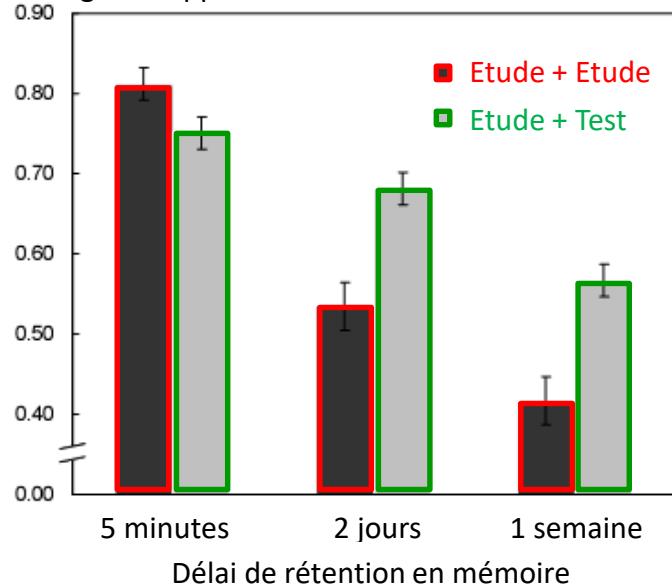
48 h plus tard, c'est le nombre de tests qui compte, pas le temps d'étude.



L'effet des tests de mémoire (*retrieval practise*) :

Se tester régulièrement maximise la performance à long terme

Pourcentage de rappel correct



Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). Test-enhanced learning: taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*, 17(3), 249–255.

“Rendre les conditions d’apprentissage plus difficiles, ce qui oblige les étudiants à un surcroît d’engagement et d’effort cognitif, conduit souvent à une meilleure rétention.” (Zaromb, Karpicke et Roediger, 2010)

Point important: ni les étudiants, ni les enseignants, ne prédisent correctement cet effet
→ d’où l’importance de l’expérimentation.

Tester sa mémoire la rend plus forte:

Etude pure et simple:



10 secondes

Rappel de 5.7 mots sur 40

Prédiction et retour d’erreur:



5 secondes + 5 secondes

Rappel de 6.4 mots sur 40

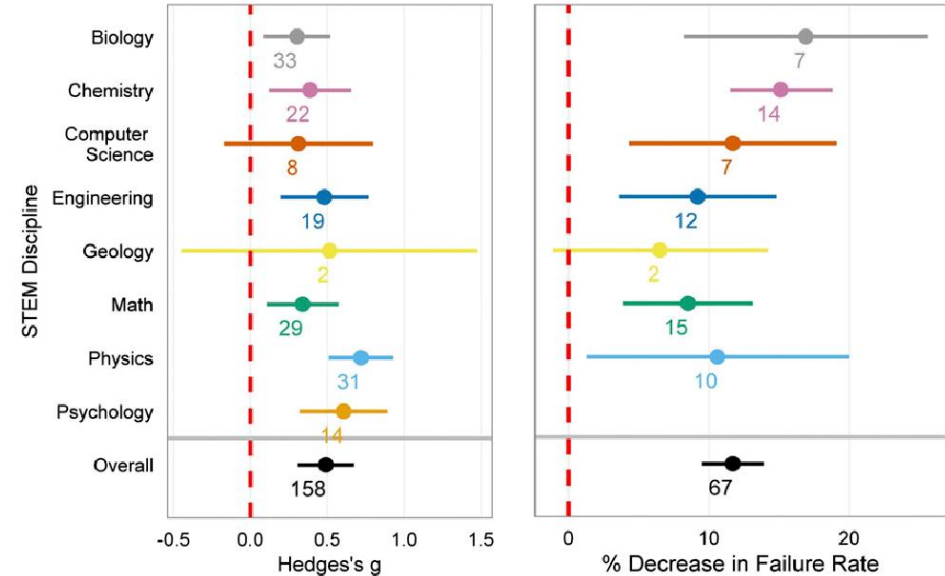
Carrier, M., & Pashler, H. (1992). The influence of retrieval on retention. *Memory & Cognition*, 20(6), 633–642.

Un étudiant actif apprend mieux

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, 111(23), 8410–8415.

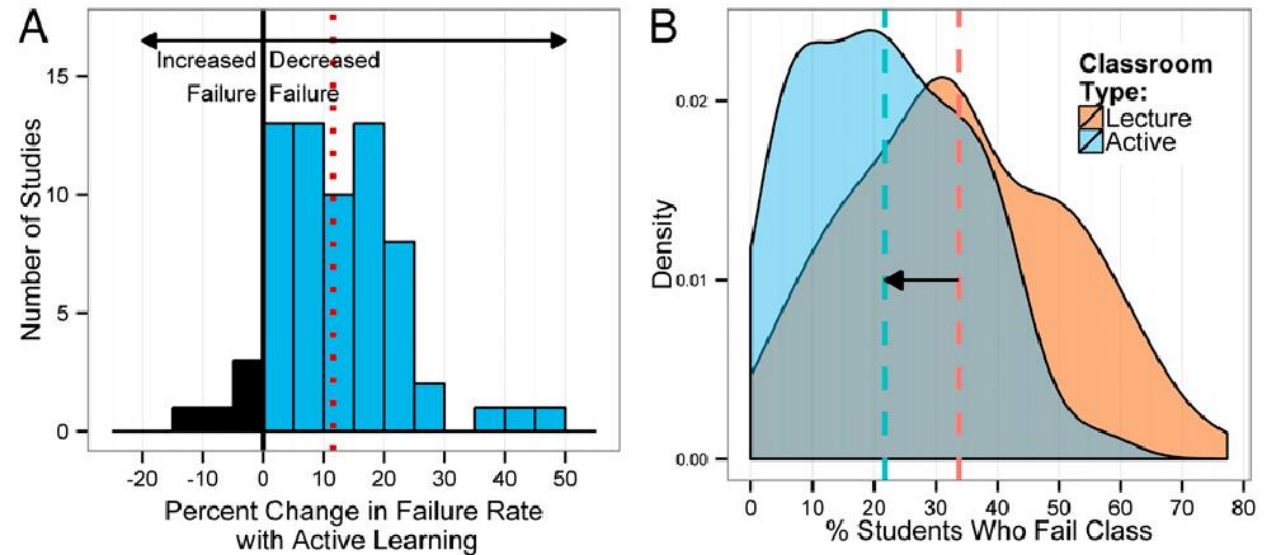
Meta-analyse de 225 études comparant le cours magistral traditionnel (*traditional lecturing*) aux pédagogies actives (*active learning*).

Amélioration d'un demi-écart type, aussi bien dans les scores aux examens ou aux tests que dans le taux d'échec.



Qu'est-ce qui marche le mieux?
Toutes les formes d'engagement actif:

- Activités pratiques
- Discussions auxquelles chacun prend part
- Travaux en petits groupes
- Questionnement permanent, exigence d'une réflexion



Pilier 4: la consolidation

Au début de l'apprentissage, le cortex préfrontal est fortement mobilisé: traitement **explicite, conscient, avec effort**.

Progressivement, l'**automatisation** transfère les connaissances vers des réseaux non-conscients, libérant les ressources.

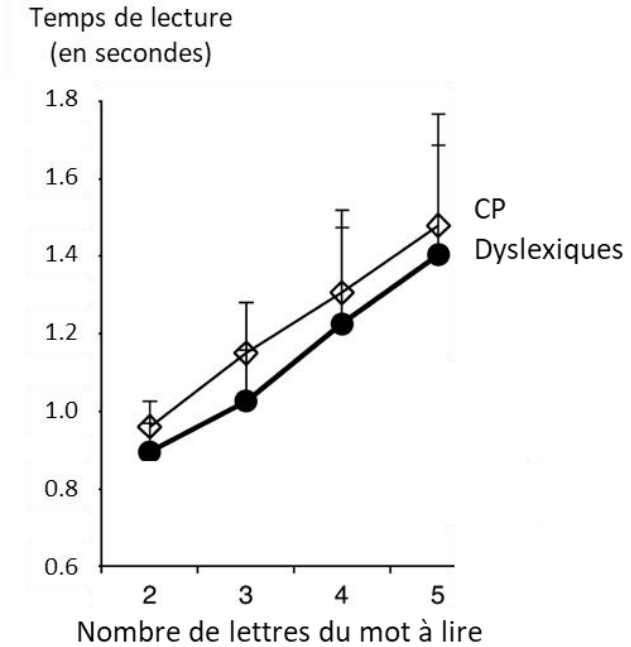
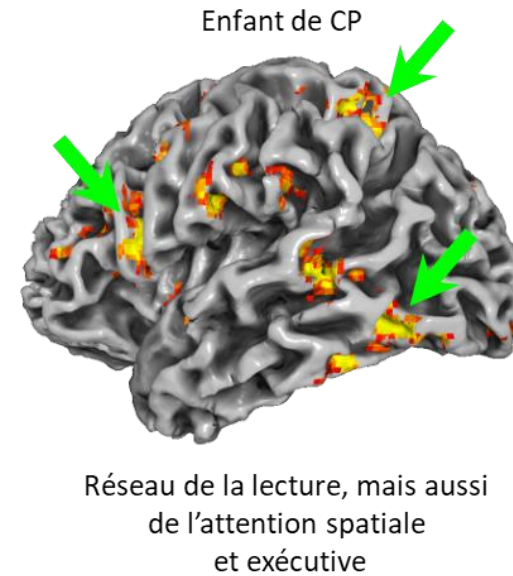
Exemple de la lecture:

Au début, l'enfant retient les correspondances graphème-phonème sous forme de règles explicites, qu'il applique une par une lorsqu'il lit un mot.

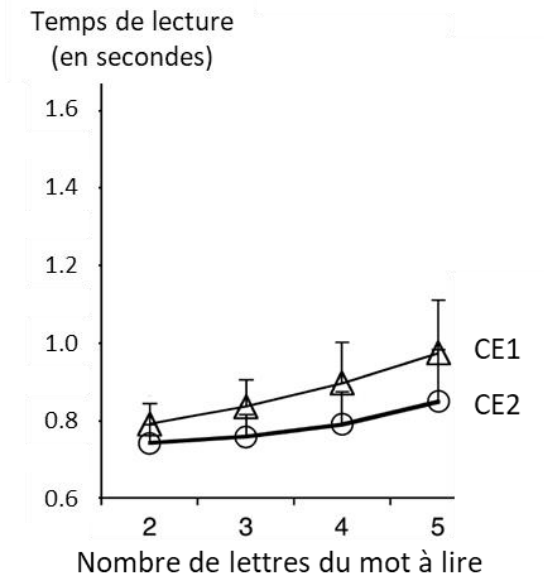
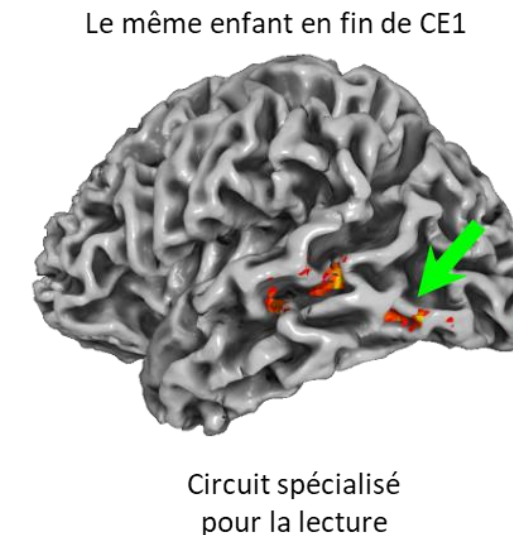
Par la suite, le décodage devient de plus en plus routinier et fondé sur des connaissances implicites, rapides et non-conscientes.

Cette automatisation est essentielle pour libérer les ressources mentales.

Lecture avec effort



Lecture automatisée



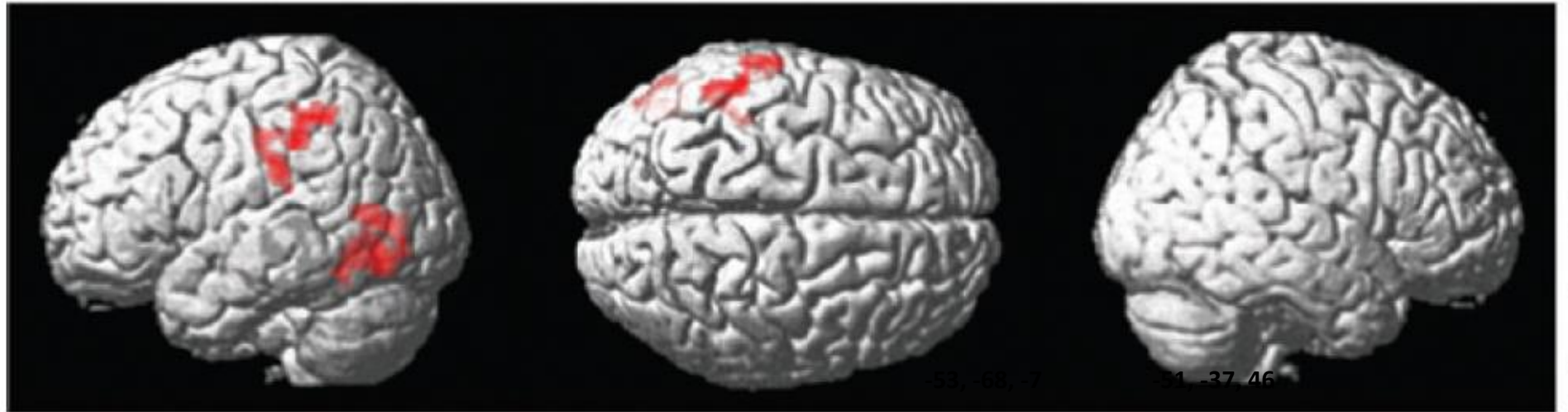
Revenons en enfance...

Il ni a peu tè tre pa de jour de no
tre an fan ce ke nou ai ion si plè
ne man vé ku ke ce ke nou a von
cru lè cé san lé vi vre, ceux que
nous avons passés avec un livre
préférè.

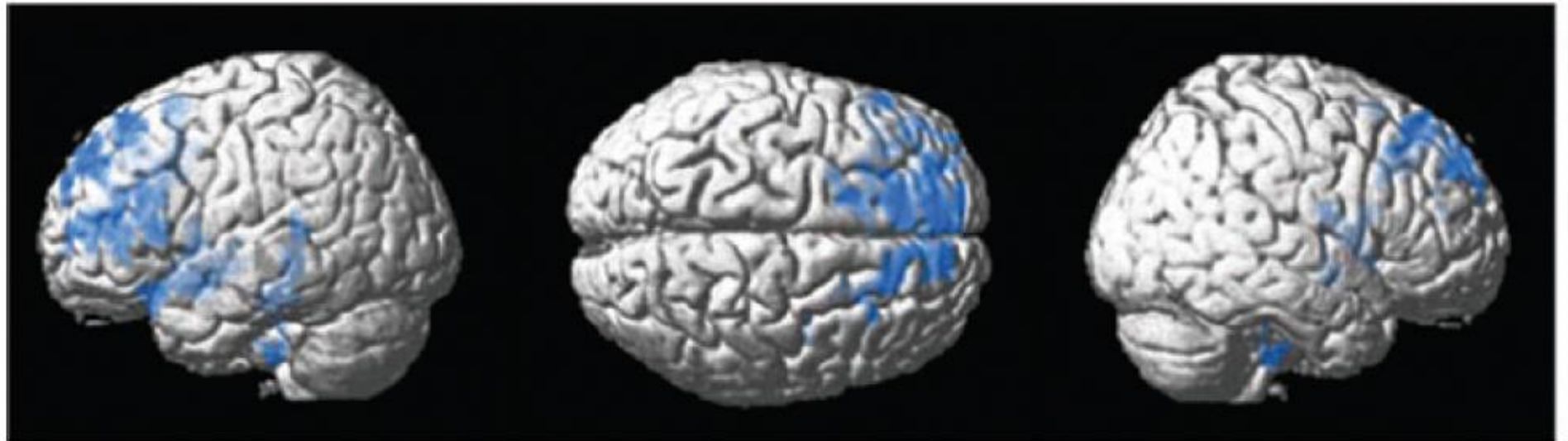
Marcel Proust, *Sur la lecture*

L'automatisation dans l'apprentissage des mathématiques

Accroissements
d'activité dans
les régions
spécialisées



Baisses d'activité
dans les régions
génériques
(cortex
préfrontal)



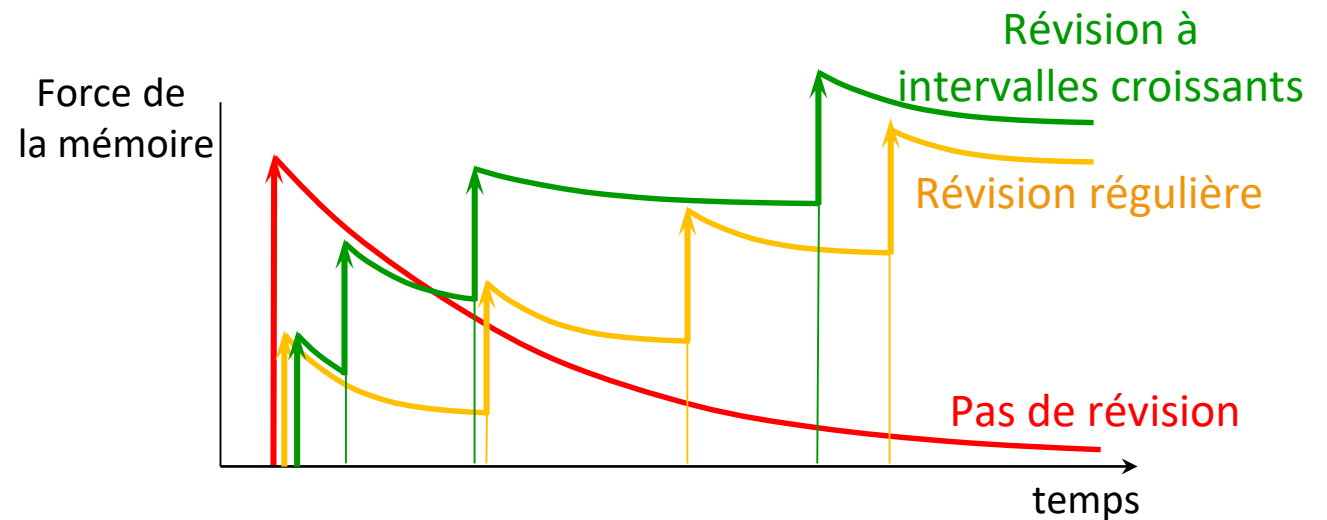
Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental Changes in Mental Arithmetic: Evidence for Increased Functional Specialization in the Left Inferior Parietal Cortex. *Cereb Cortex*, 15(11), 1779-1790.

Ansari, D., & Dhital, B. (2006). Age-related changes in the activation of the intraparietal sulcus during nonsymbolic magnitude processing: an event-related functional magnetic resonance imaging study. *J Cogn Neurosci*, 18(11), 1820-1828.

L'importance du sommeil dans les apprentissages

- Le sommeil fait partie intégrante de notre algorithme d'apprentissage
- Il intervient dans la **consolidation** des apprentissages: après une période d'apprentissage, une période de sommeil, même courte, améliore
 - la mémoire
 - la généralisation
 - la découverte de régularités (*insight*)
- Ces effets sont trois fois plus importants chez l'enfant que chez l'adulte
- Conséquences:

- (1) **L'amélioration du sommeil** peut être une intervention très efficace, notamment pour les enfants avec troubles de l'attention
- (2) il faut **distribuer l'apprentissage** : tous les jours!



Conclusion: un enseignement structuré et cohérent

Le cerveau humain est doté de puissants algorithmes d'apprentissage, capables d'inférences statistiques d'une grande logique.

Sa plasticité s'étend tout au long de la vie, mais elle est maximale dans les premières années.

Ses circuits sont pré-organisés mais il peut (partiellement) les recycler pour apprendre la lecture, les mathématiques...

Il dispose de plusieurs dispositifs spécialisés pour faciliter l'apprentissage:

1. L'attention
2. L'engagement actif
3. Le retour d'erreurs
4. La consolidation, notamment durant le sommeil

Conséquences:

- L'école doit fournir à ce « super-ordinateur » un environnement enrichi – un enseignement structuré et exigeant, tout en étant généreux, et tolérant à l'erreur.
- Les sciences cognitives peuvent aider à évaluer plus précisément les difficultés des enfants, à déterminer les réponses pédagogiques les plus appropriées, et à mieux former les enseignants.

Le site de l'*Education Endowment Fund*

Une recension
détaillée et
accessible des
résultats de la
recherche, et des
recommandations
qui en découlent

Teaching and Learning Toolkit

An accessible summary of the international evidence on teaching 5-16 year-olds

Filter Toolkit

Filter results by keywords



Reset ↺

Download Toolkit

Toolkit Strand ^

Cost v

Evidence Strength ^

Impact (months) v

Feedback

High impact for very low cost, based on moderate evidence.



+8

Metacognition and self-regulation

High impact for very low cost, based on extensive evidence.



+7

Reading comprehension strategies

High impact for very low cost, based on extensive evidence.



+6

Homework (Secondary)

Moderate impact for very low cost, based on moderate evidence.



+5

School uniform

Very low or no impact for very low cost, based on very limited evidence.



0

Repeating a year

Negative impact for very high cost, based on moderate evidence.



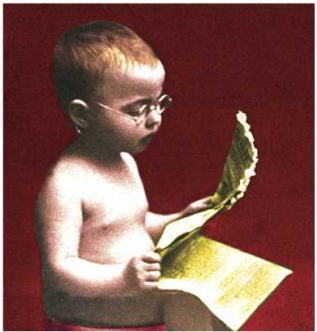
-4

<https://educationendowmentfoundation.org.uk/>

Merci de votre attention!

STANISLAS DEHAENE

LES NEURONES DE LA LECTURE



préface de
Jean-Pierre Changeux



STANISLAS DEHAENE

LA BOSSE DES MATHS



NOUVELLE
EDITION
revue et
augmentée

« LA BOSSE DES MATHS »
15 ANS APRÈS



Stanislas
Dehaene

Le Code de la conscience



Stanislas Dehaene

Apprendre !

Les talents du cerveau,
le défi des machines

