

# Plan

**Avant-midi** : « sur les aspects du fonctionnement et des nouveautés »

~~1<sup>er</sup> bloc~~ : ~~La base : une perspective évolutive par niveaux d'organisation~~

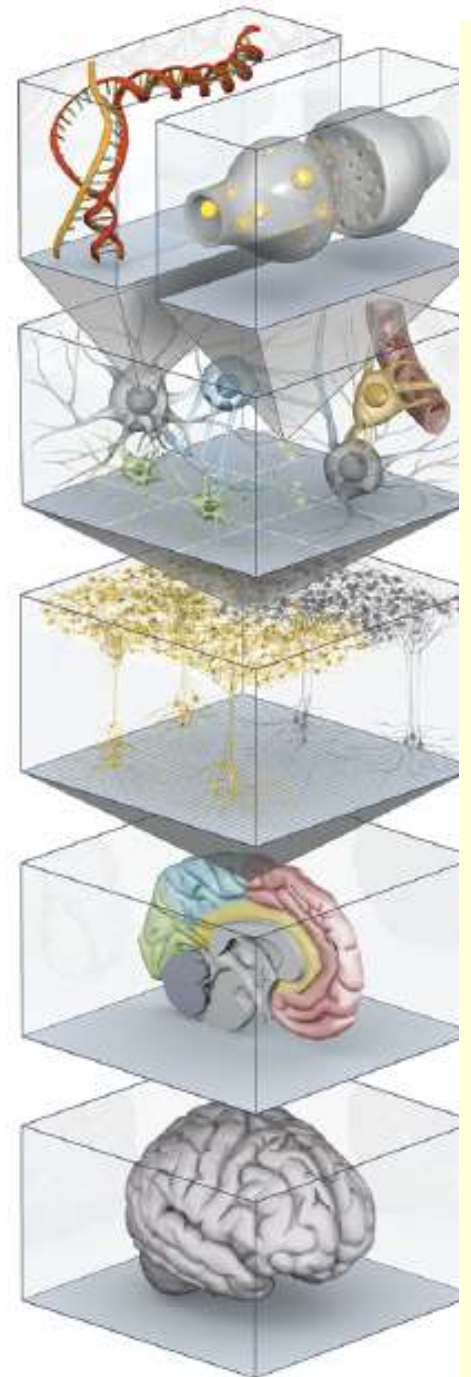
**2<sup>e</sup> bloc** : Des dogmes qui tombent du neuronal au cérébral

**Après-midi** : « sur les liens que l'on peut faire avec l'apprentissage et la pédagogie »

**3<sup>e</sup> bloc** : Plasticité cérébrale, apprentissage  
et facteurs qui influencent nos mémoires

**4<sup>e</sup> bloc** : De nouveaux paradigmes pour mieux comprendre le fonctionnement  
du « cerveau-corps-environnement »

# Cellules (neurones)

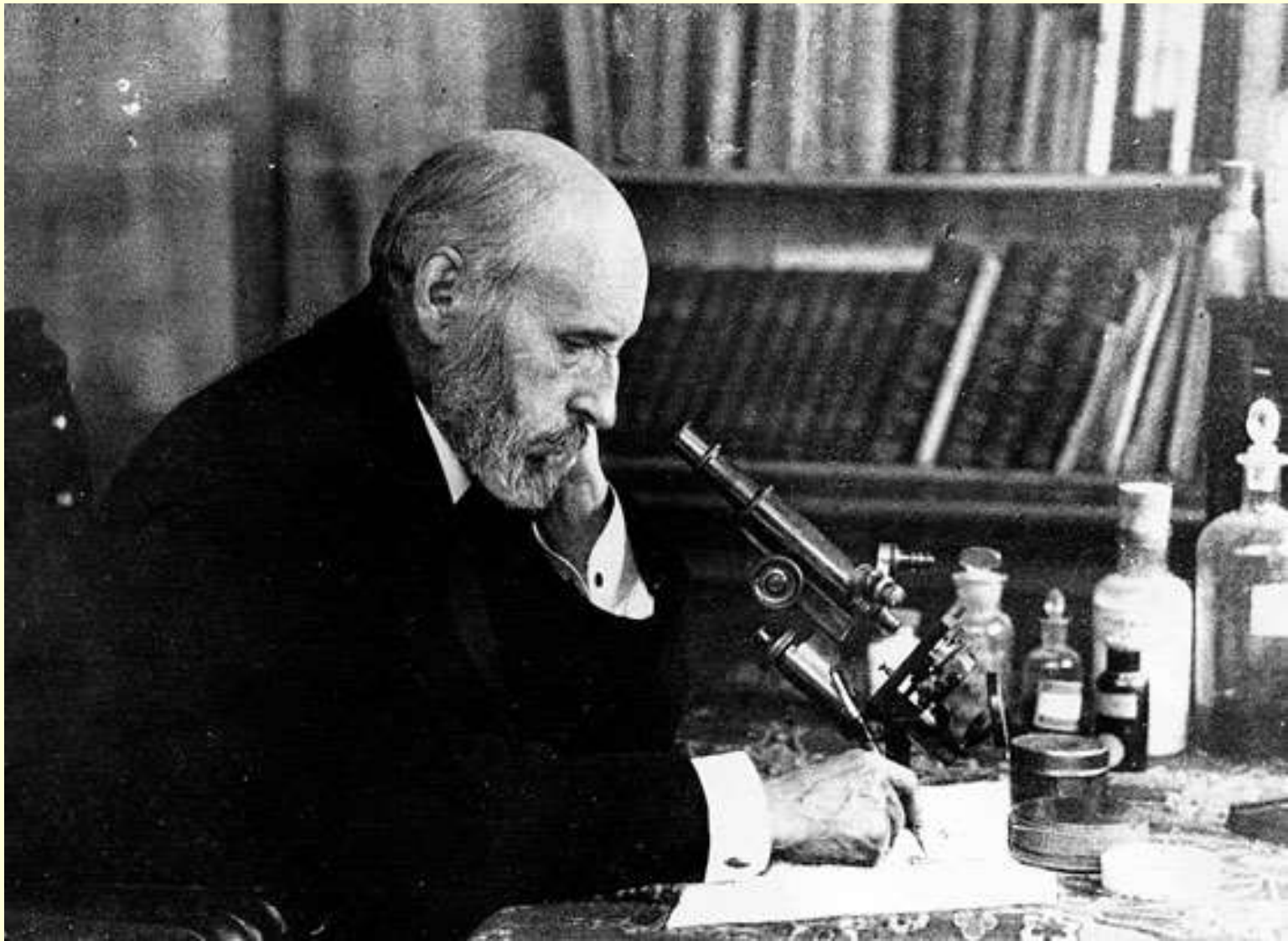


Reprenons notre  
histoire à la fin du

# XIX SIÈCLE

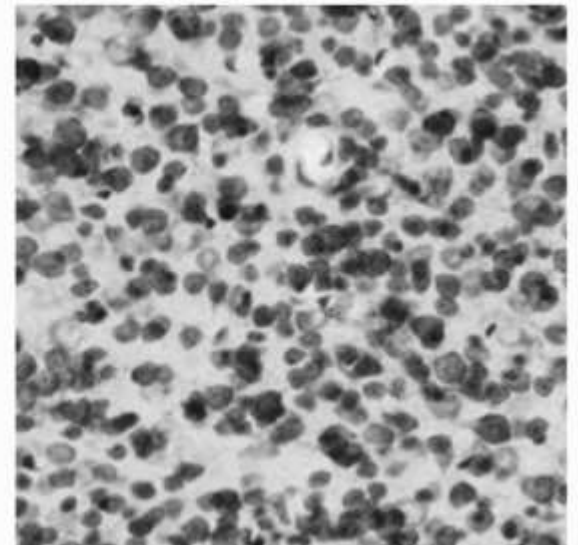
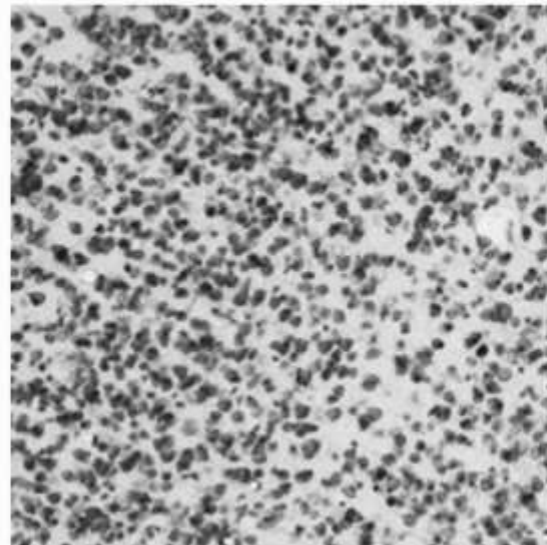
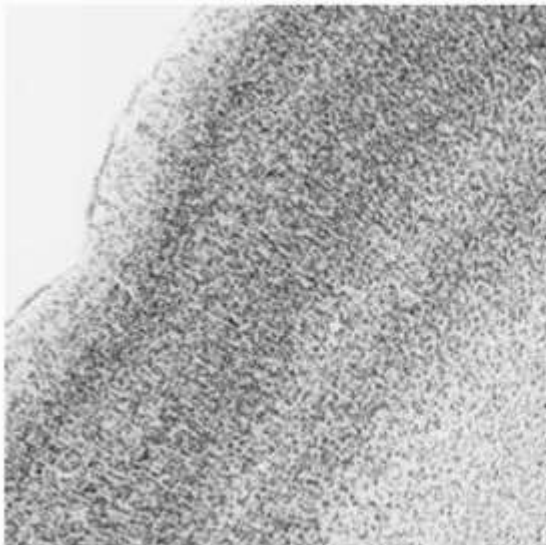
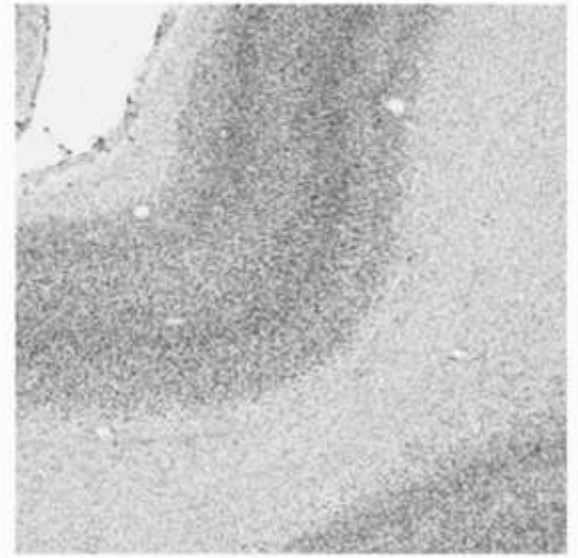
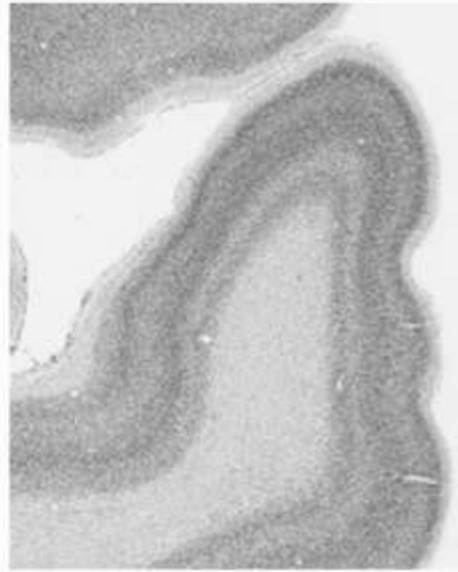
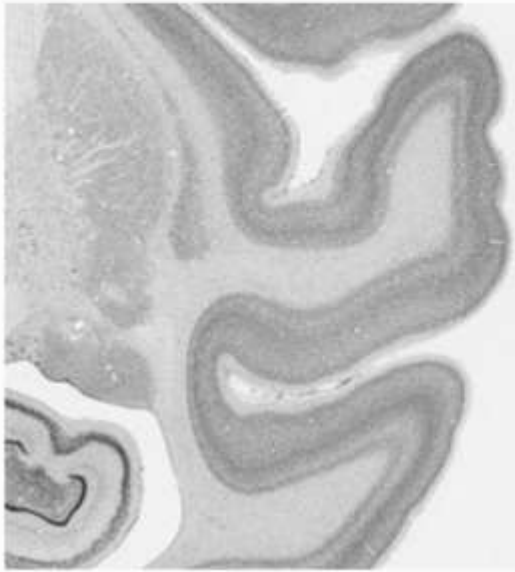




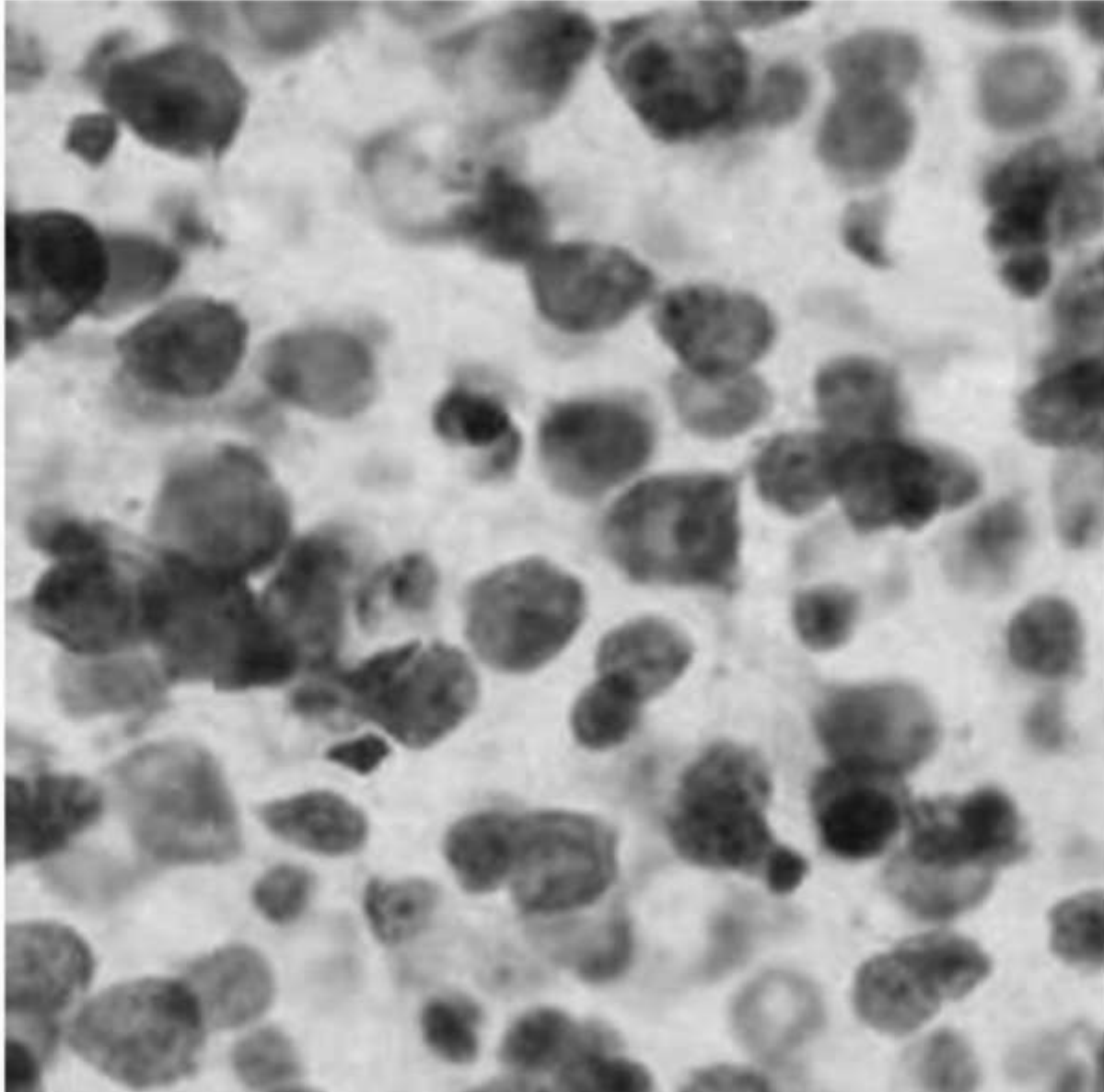


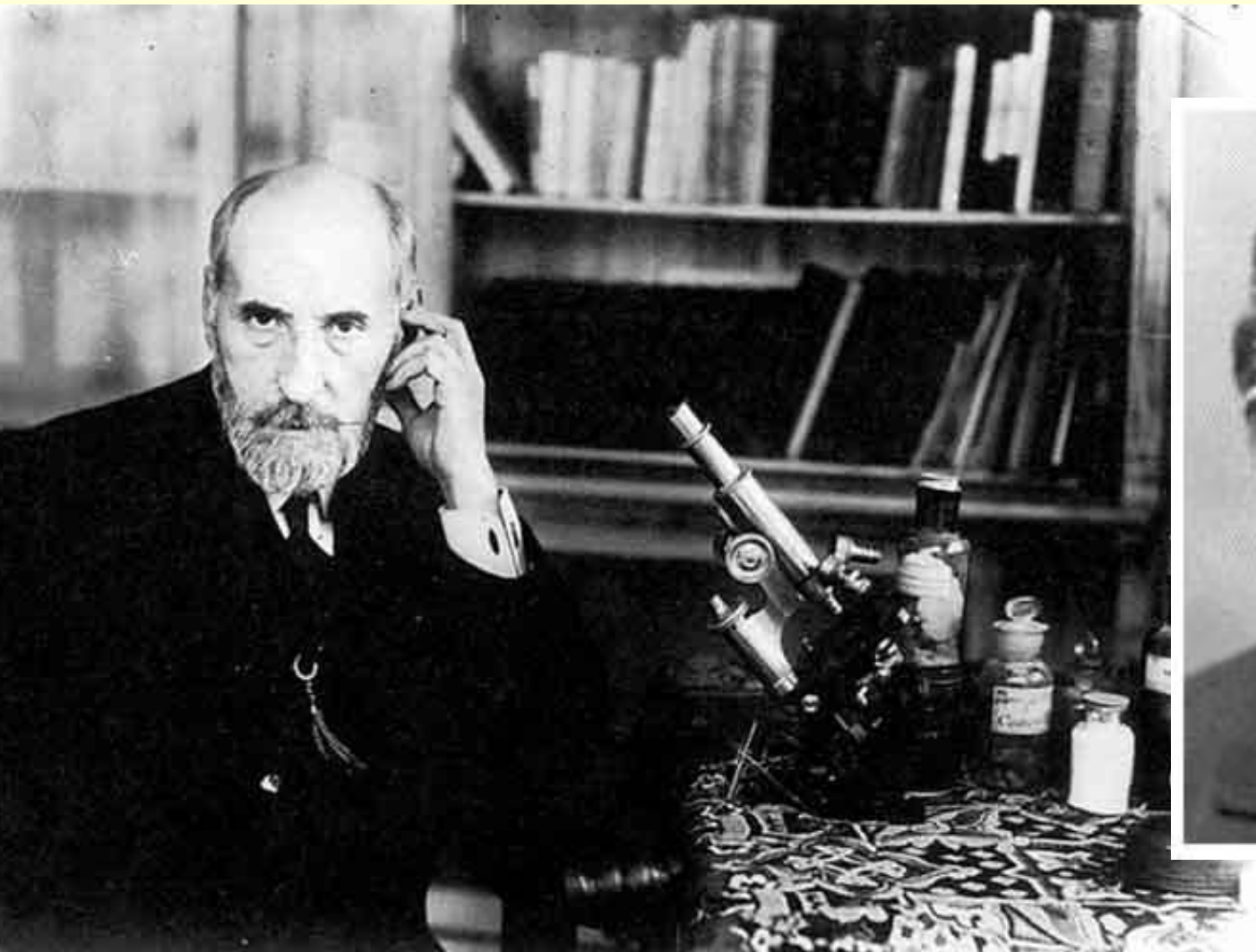
Vers la fin du XIXe siècle, certains Homo sapiens commencent à se demander comment s'organise la **matière cérébrale** qui les fait **penser...**

zoom in sur sa région foncée, aussi appelée matière grise...



matière grise : corps cellulaires des cellules du cerveau, les neurones



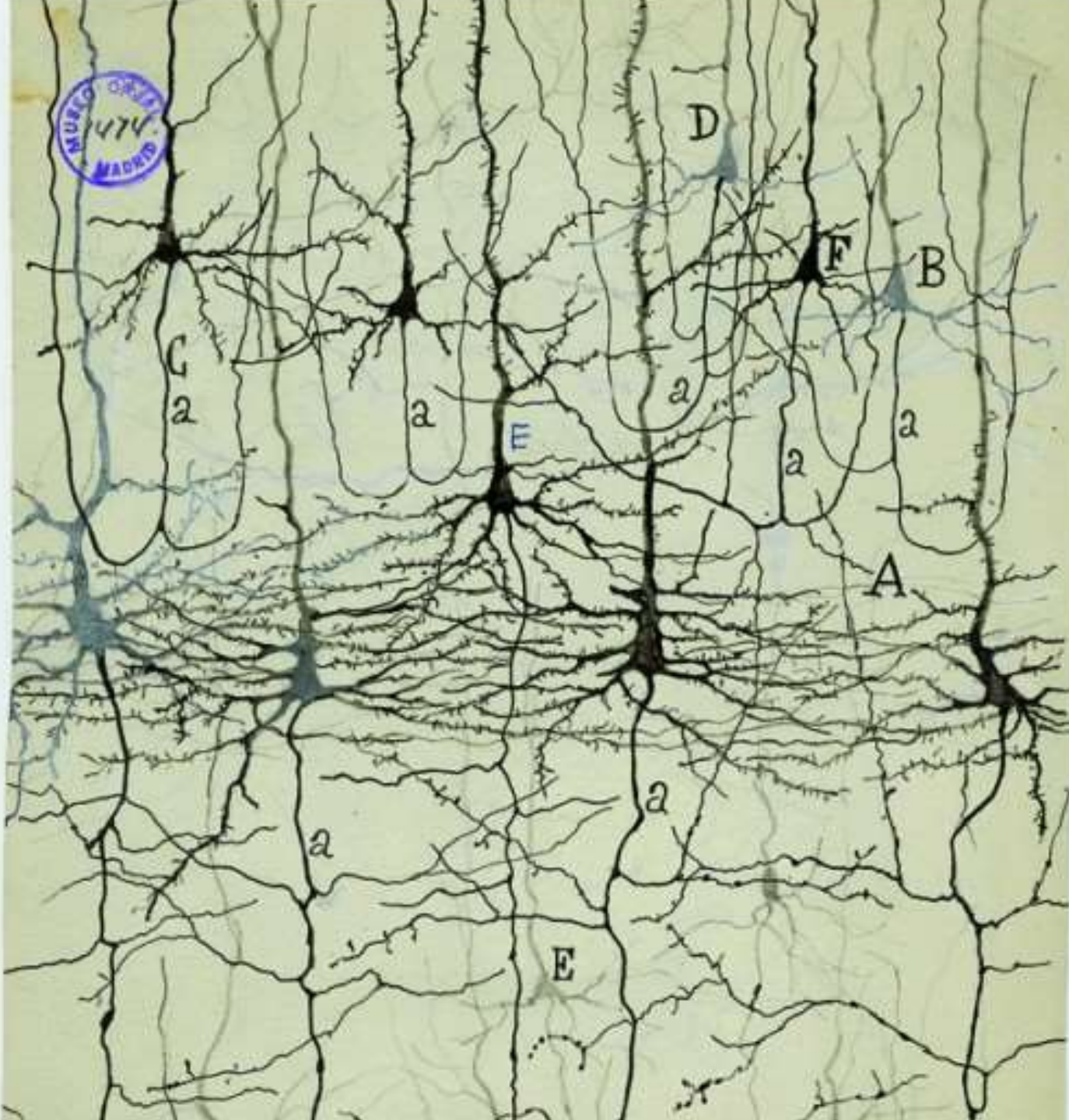


Santiago Ramon y Cajal



Camillo Golgi

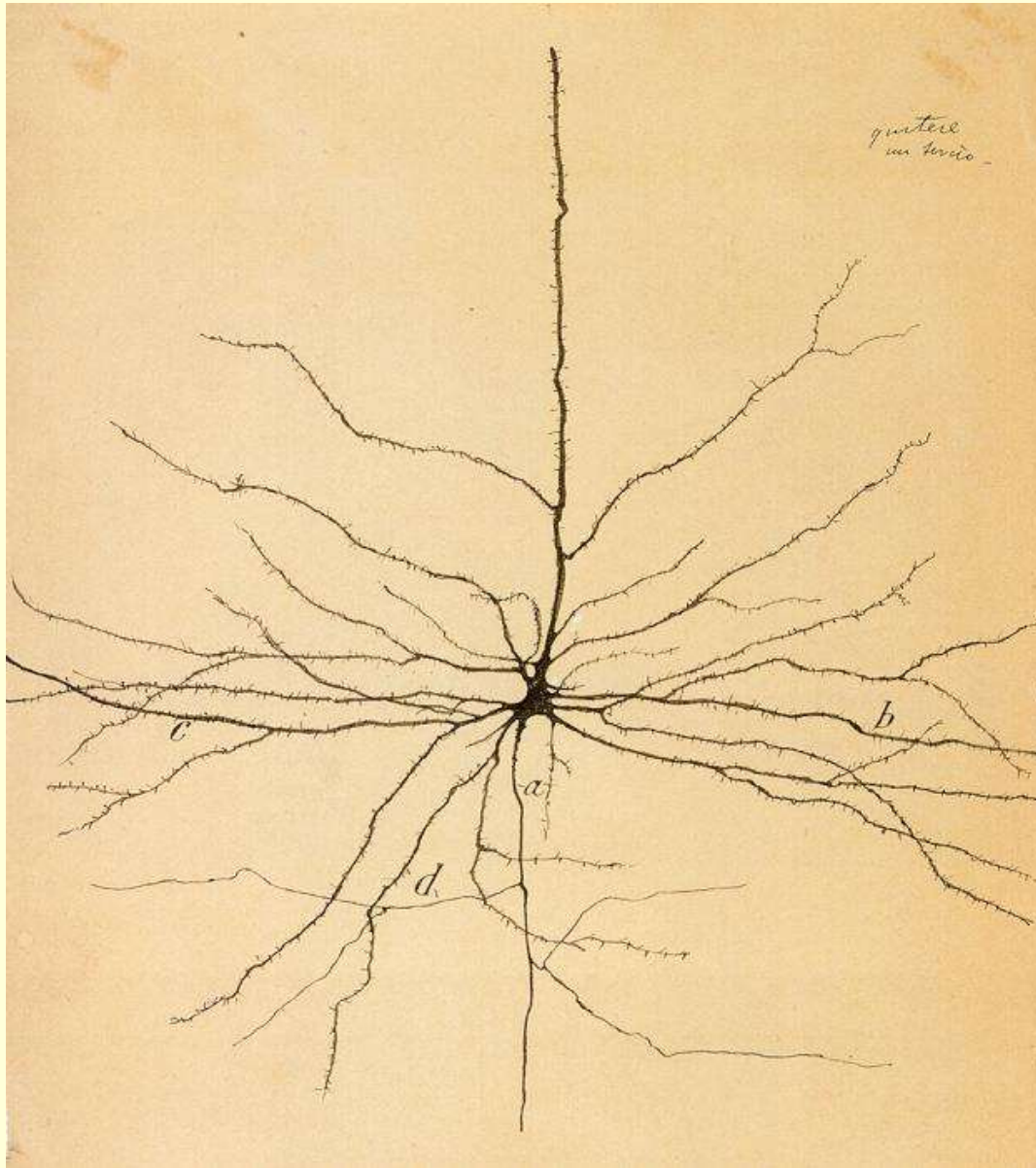




Golgi défendait le **paradigme dominant** de l'époque :

l'idée que le système nerveux était constitué d'un **maillage fusionné**

ne comportant **pas de cellules isolées.**



Mais Cajal va montrer, à l'aide de la coloration de Golgi, que les neurones semblent plutôt former des **cellules distinctes** les unes des autres.

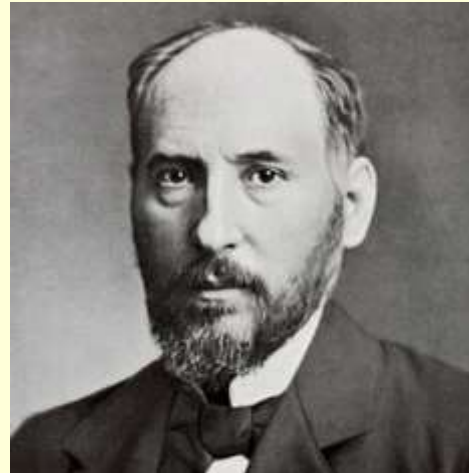


Neurone pyramidal du cortex moteur

Golgi et Cajal obtiennent le Prix Nobel de physiologie ou médecine en 1906.

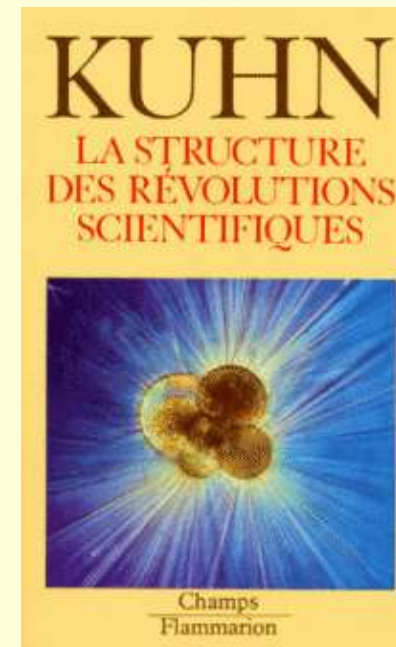


Dans son discours de réception du prix, Golgi défendit la **théorie réticulaire**.

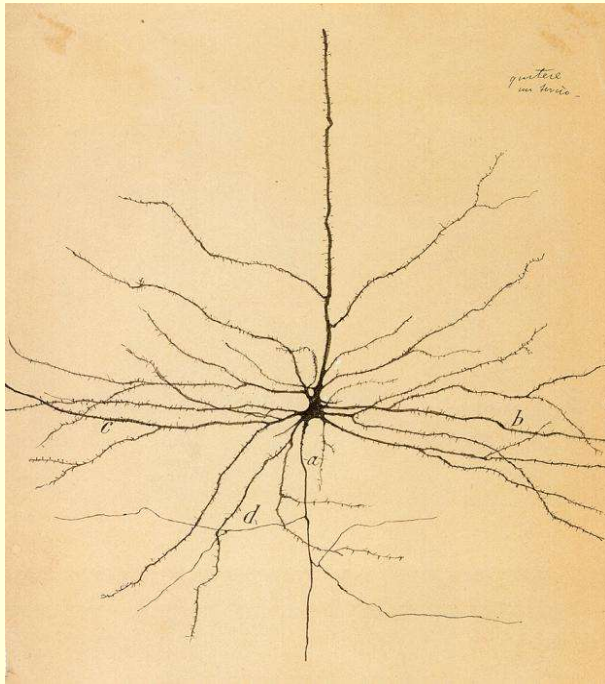


Cajal, qui parlait après lui, contredit la position de Golgi et exposa sa **théorie du neurone...**

qui fut bientôt admise.



Le terme n'existait pas encore, mais on allait assister à un **changement de paradigme...**

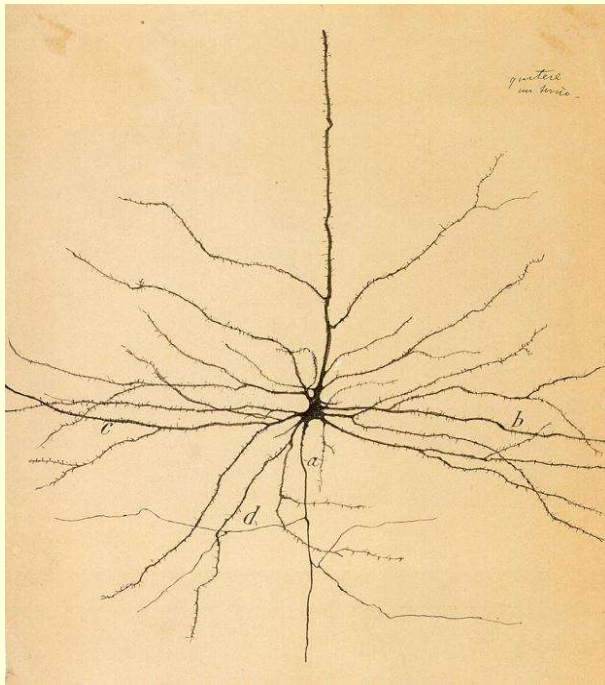


Neurone pyramidal du cortex moteur

## La théorie (ou doctrine) du neurone :

→ Pour expliquer l'abc des neurones,

mais on va voir à la fin de la séance  
que chacun des points de cette théorie  
**peut aujourd'hui être remis en question !**



Neurone pyramidal du cortex moteur

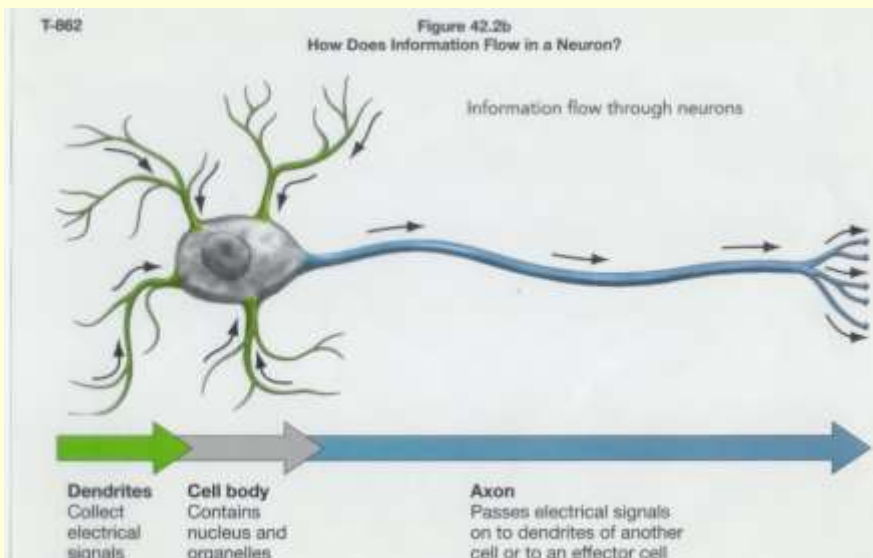
## La théorie (ou doctrine) du neurone :

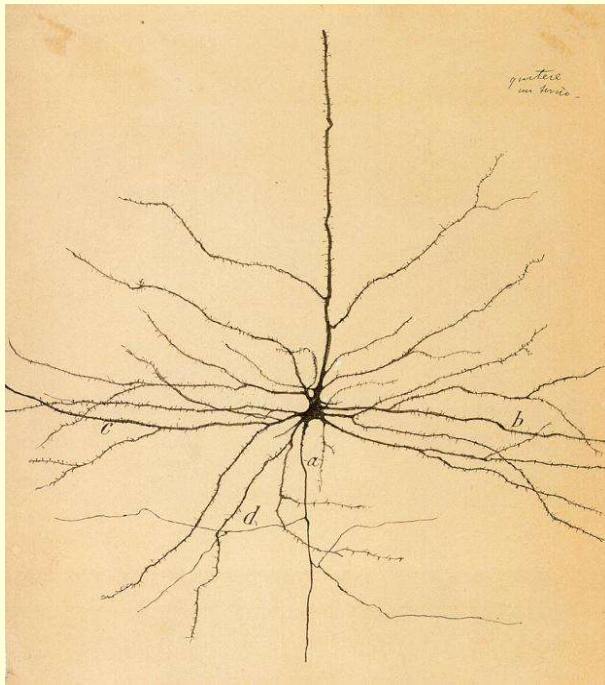
1) **Le neurone** est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles**;

3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone**;

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).





Neurone pyramidal du cortex moteur

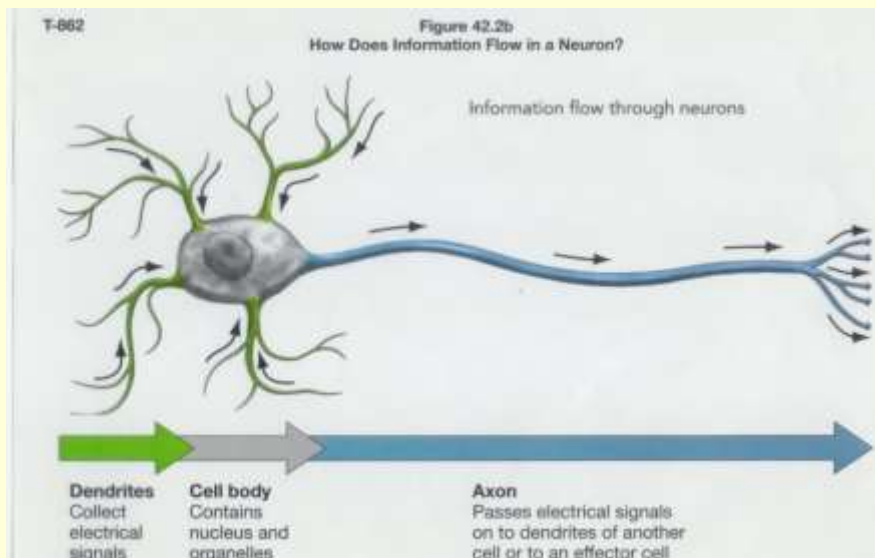
## La théorie (ou doctrine) du neurone :

1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles;**

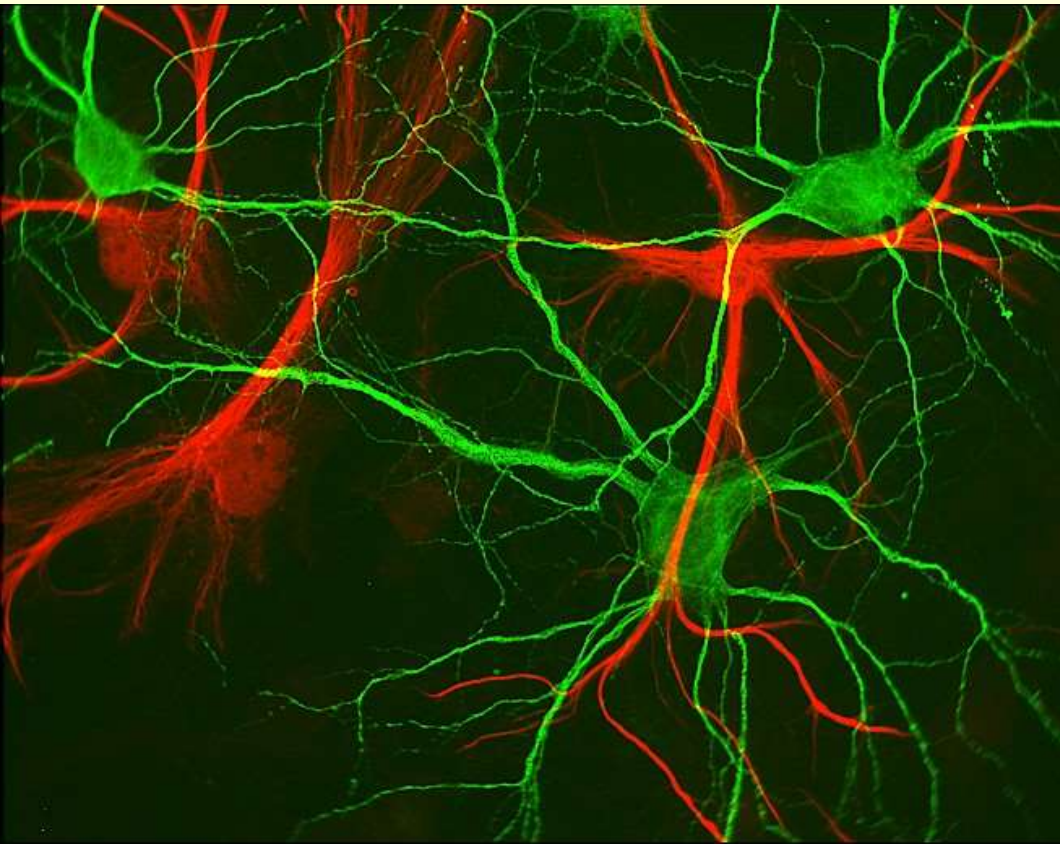
3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone;**

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).



## La théorie (ou doctrine) du neurone :

1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

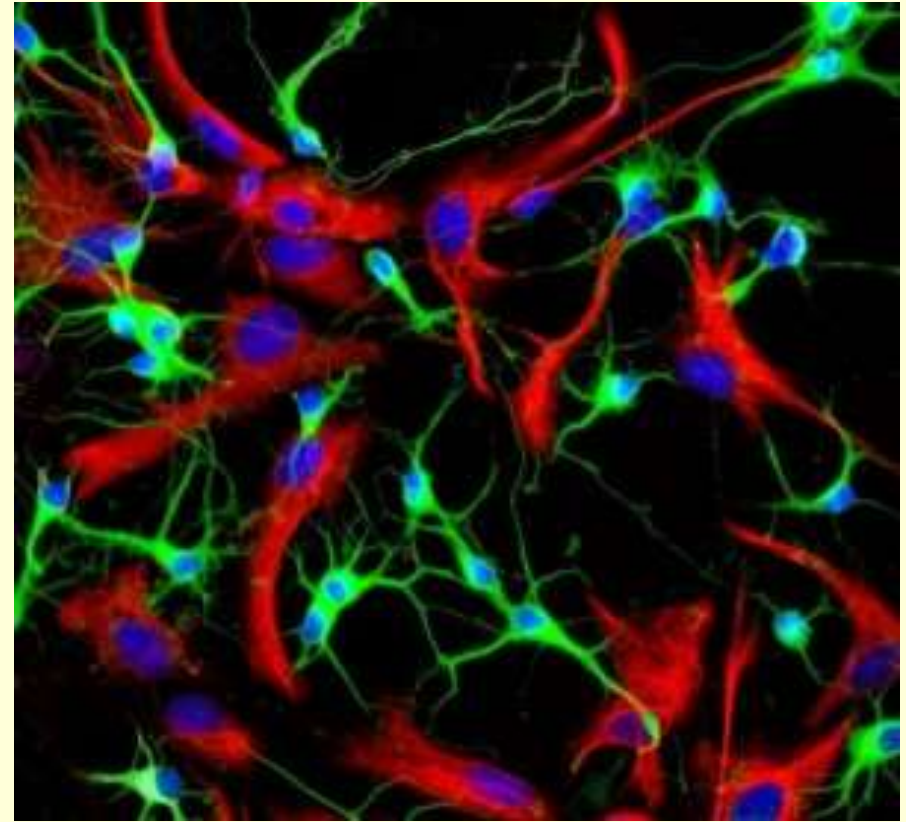


Je vous signale tout de suite  
« l'autre moitié du cerveau » :

**les cellules gliales !**

(en rouge ici,  
et les neurones en vert)

Les cellules gliales, encore en rouge ici



**85 000 000 000**  
**cellules gliales**

Cellules qui  
n'émettent pas  
d'influx nerveux...

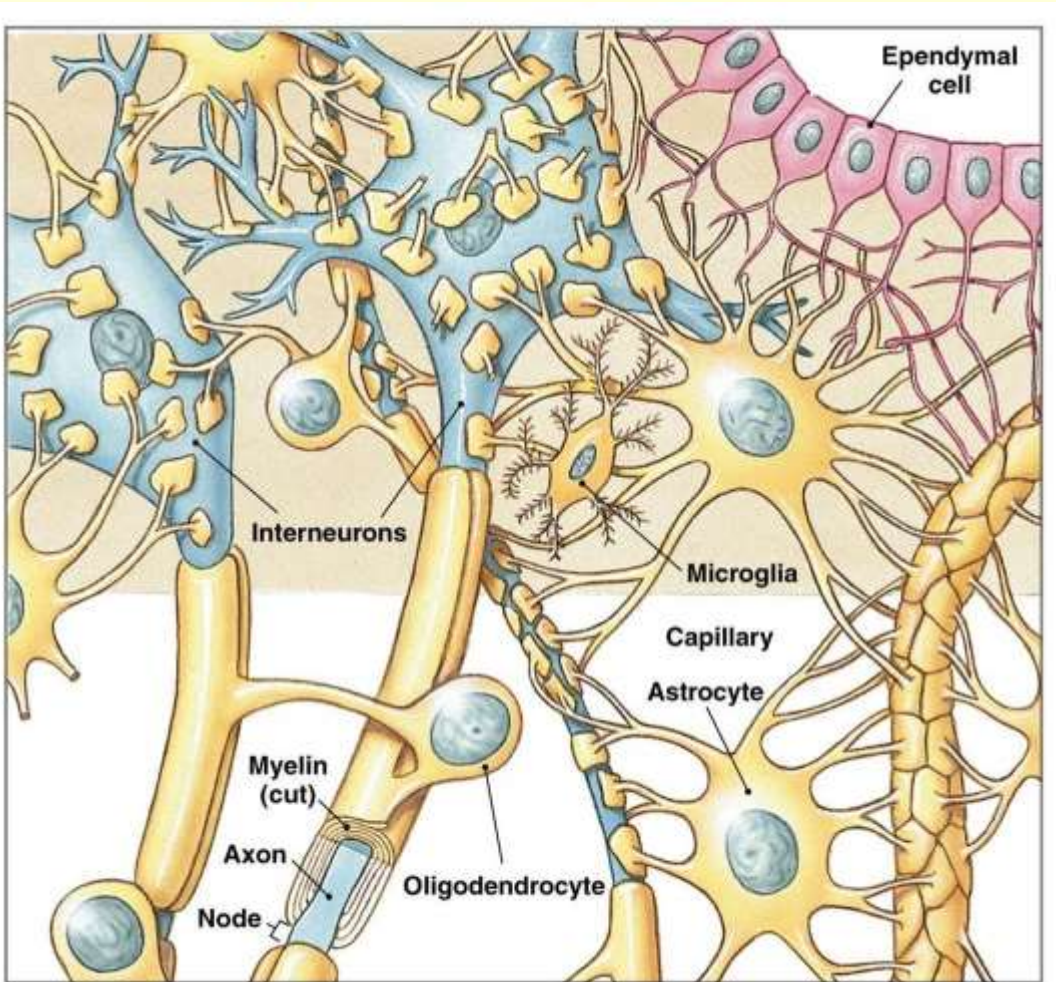
**+**

**85 000 000 000**  
**neurones !**





# Différents types de cellules gliales



Les **astrocytes** approvisionnent les neurones en nutriments et assurent l'équilibre du milieu extracellulaire.

La **microglie** : les macrophages du cerveau.

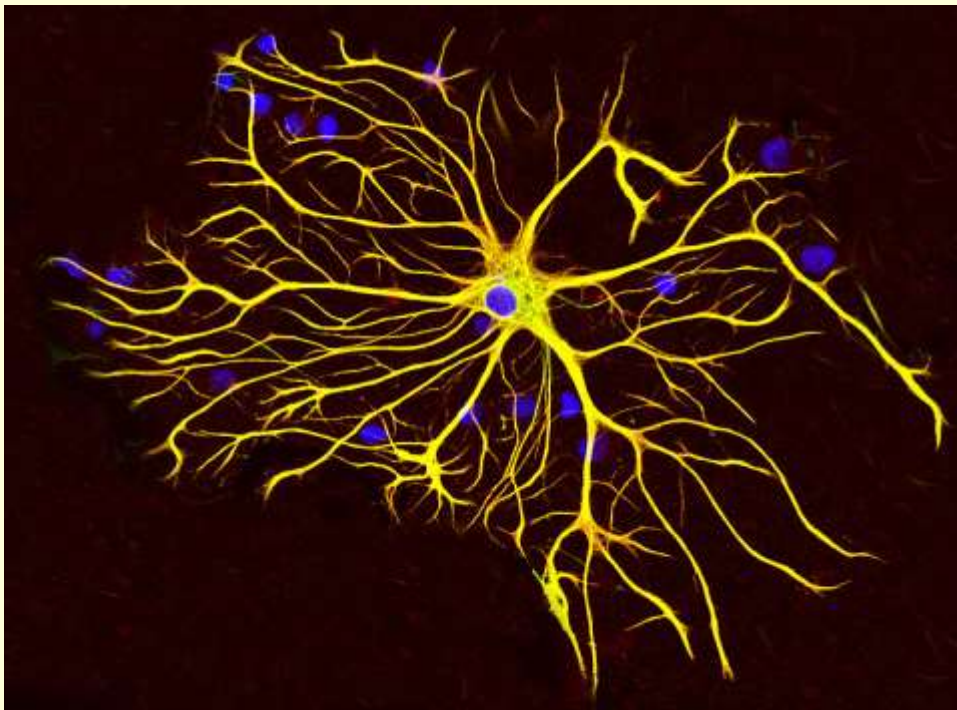
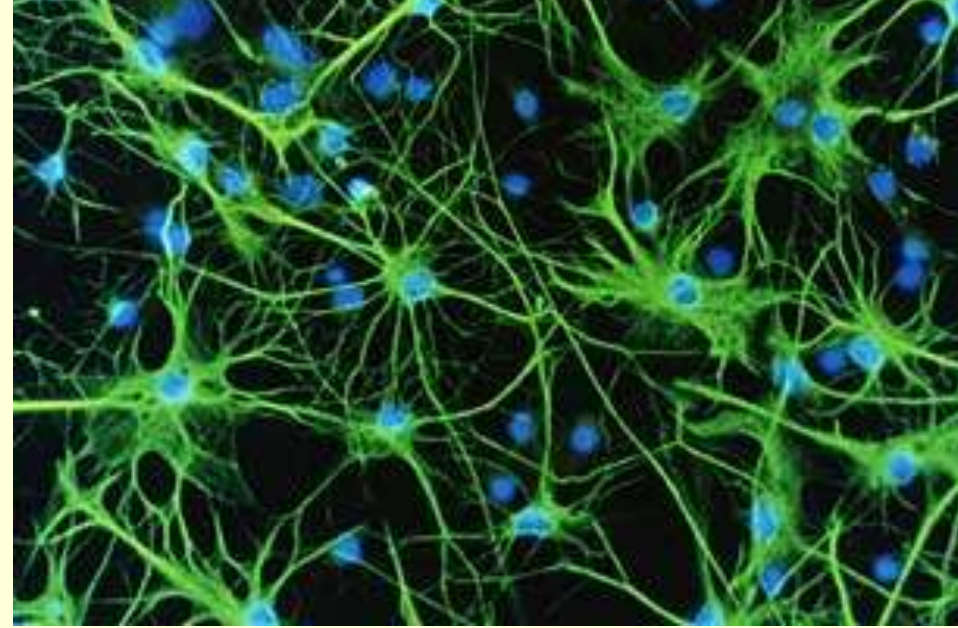
Les **oligodendrocytes** constituent la gaine de myéline qui entourent les axones de nombreux neurones.

# Astrocytes

## Fantastic Astrocyte Diversity

August 2, **2015**

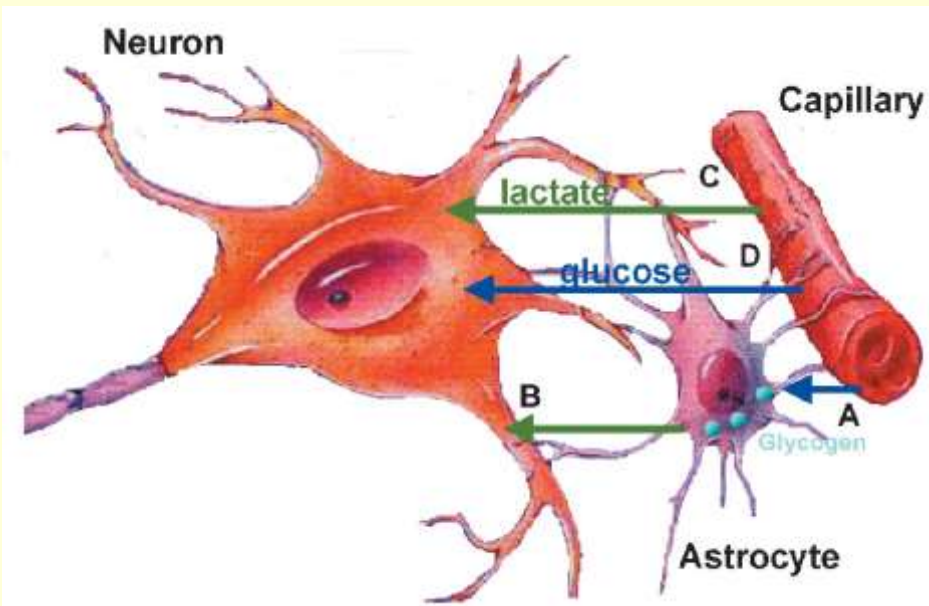
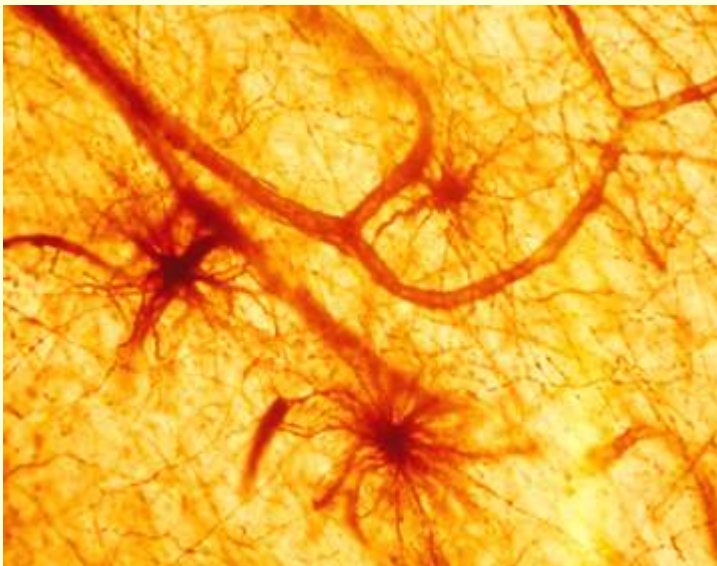
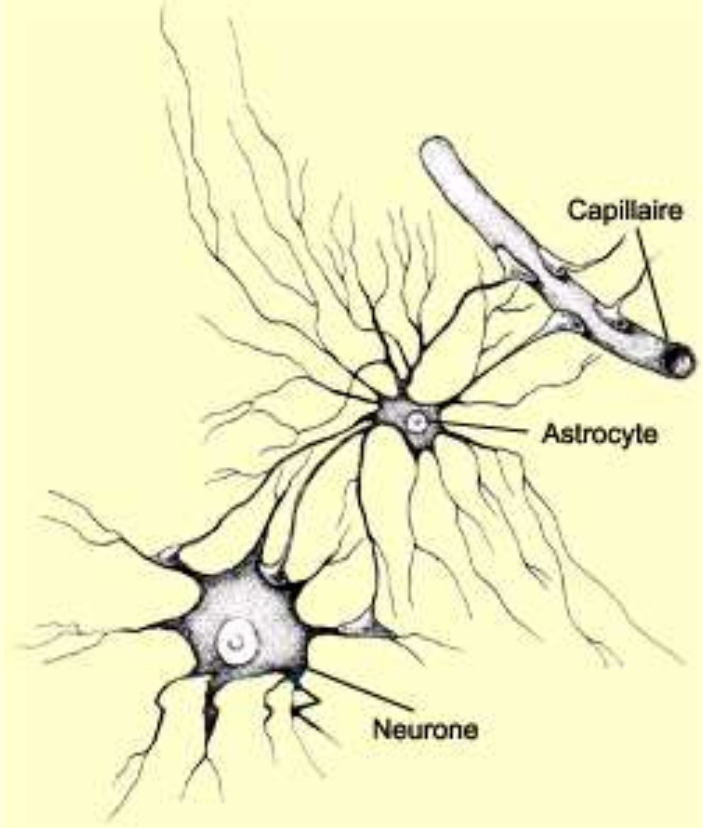
[http://jonliefmd.com/blog/fantastic-astrocyte-diversity?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=3a0ae2f9c3-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-3a0ae2f9c3-94278693](http://jonliefmd.com/blog/fantastic-astrocyte-diversity?utm_source=General+Interest&utm_campaign=3a0ae2f9c3-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-3a0ae2f9c3-94278693)



## Astrocytes

On connaît depuis longtemps leur rôle de pourvoyeur du glucose nécessaires à l'activité nerveuse.

Grâce à leurs "pieds" apposés contre la paroi des capillaires sanguins cérébraux, le glucose peut pénétrer dans les astrocytes où il est partiellement métabolisé et retransmis aux neurones.



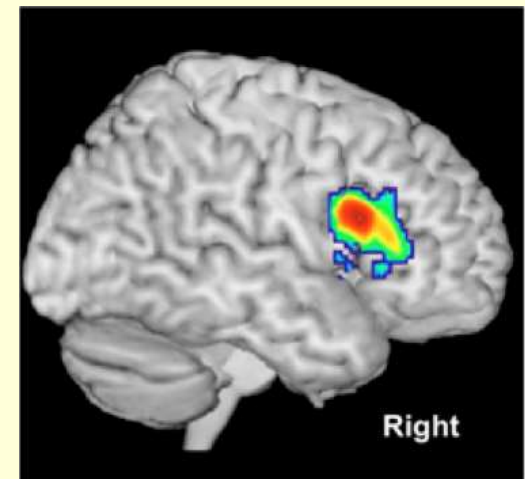
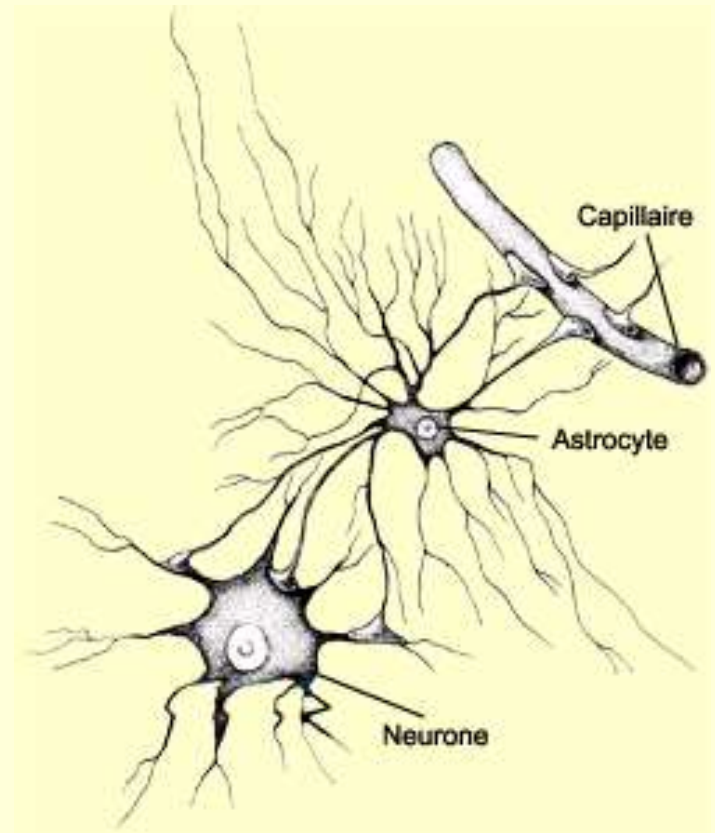
## Astrocytes

On connaît depuis longtemps leur rôle de pourvoyeur du glucose nécessaires à l'activité nerveuse.

Grâce à leurs "pieds" apposés contre la paroi des capillaires sanguins cérébraux, le glucose peut pénétrer dans les astrocytes où il est partiellement métabolisé et retransmis aux neurones.

On sait qu'une activité neuronale plus intense dans une région du cerveau favorise un apport plus élevé de glucose **en activant le travail des astrocytes.**

C'est d'ailleurs le phénomène exploité par l'imagerie cérébrale.



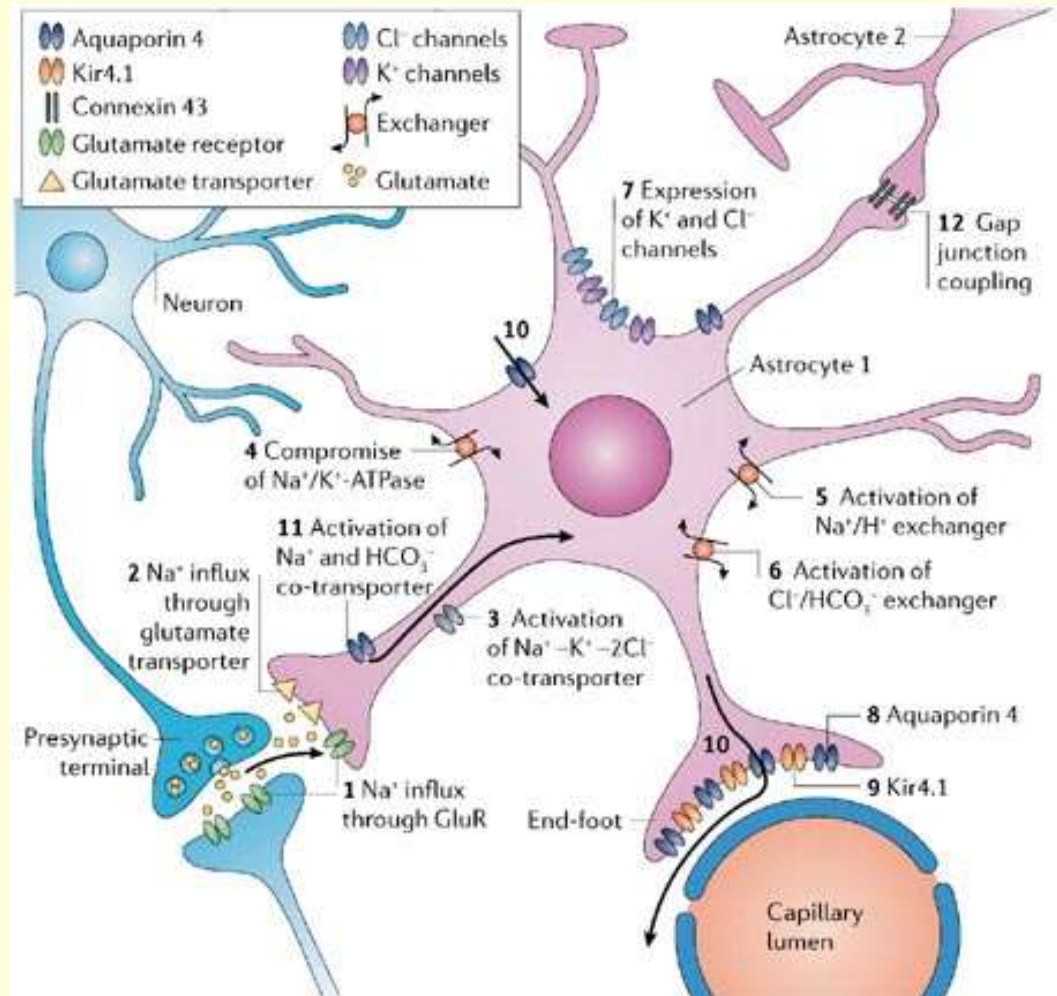
# Glutamate Released from Glial Cells Synchronizes Neuronal Activity in the Hippocampus

María Cecilia Angulo, Andreï S. Kozlov, Serge Charpak, and Etienne Audinat. *The Journal of Neuroscience*,

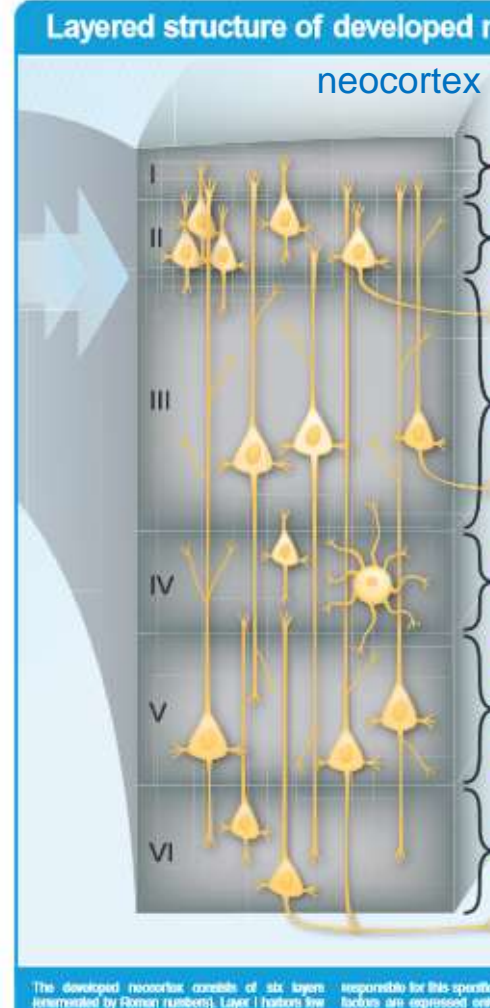
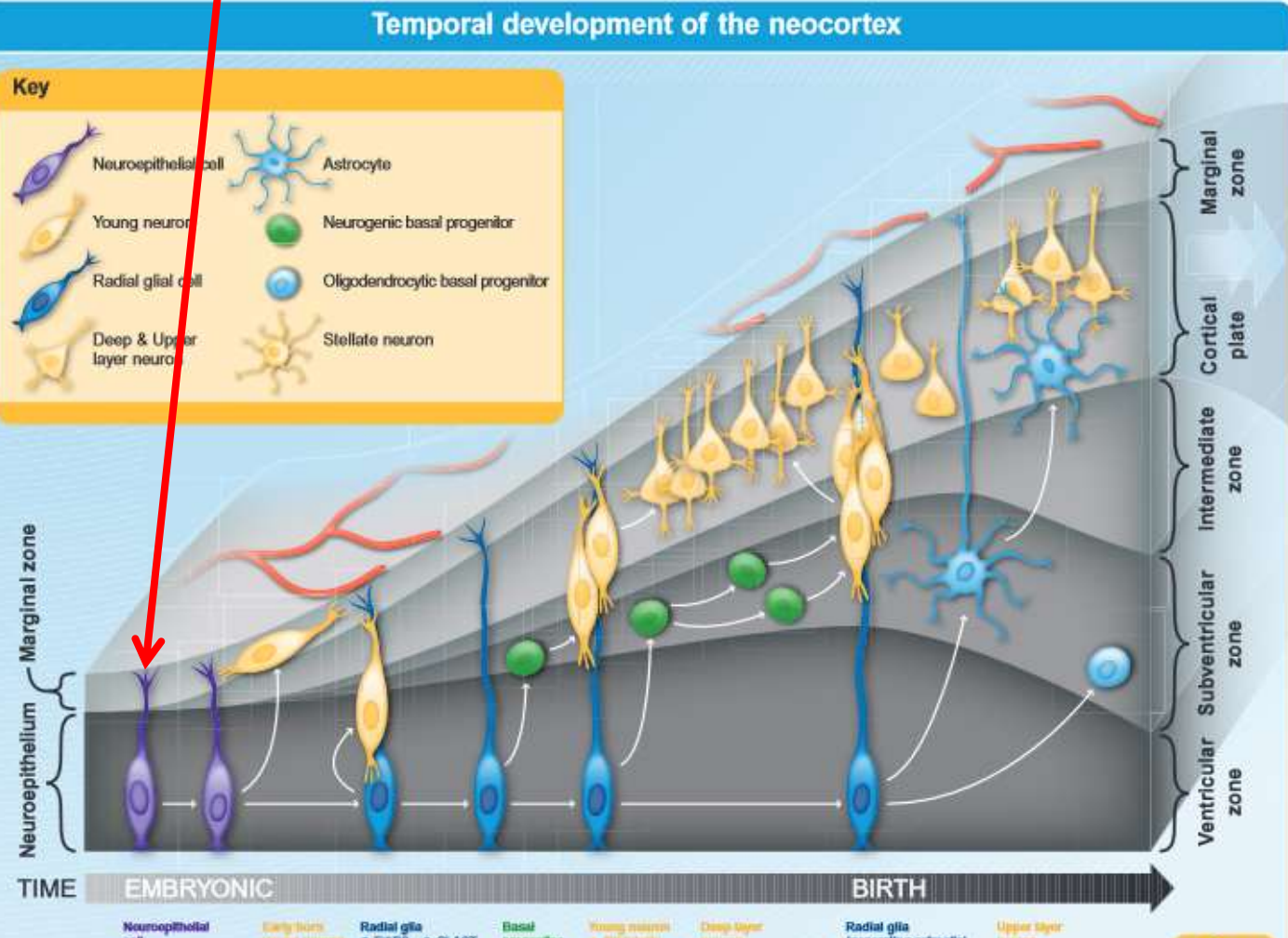
4 August 2004.

Cet article démontre que du **glutamate** relâché par des cellules gliales génère un courant transitoire

dans les neurones pyramidaux d'hippocampe de rats par l'entremise de **récepteurs NMDA**.

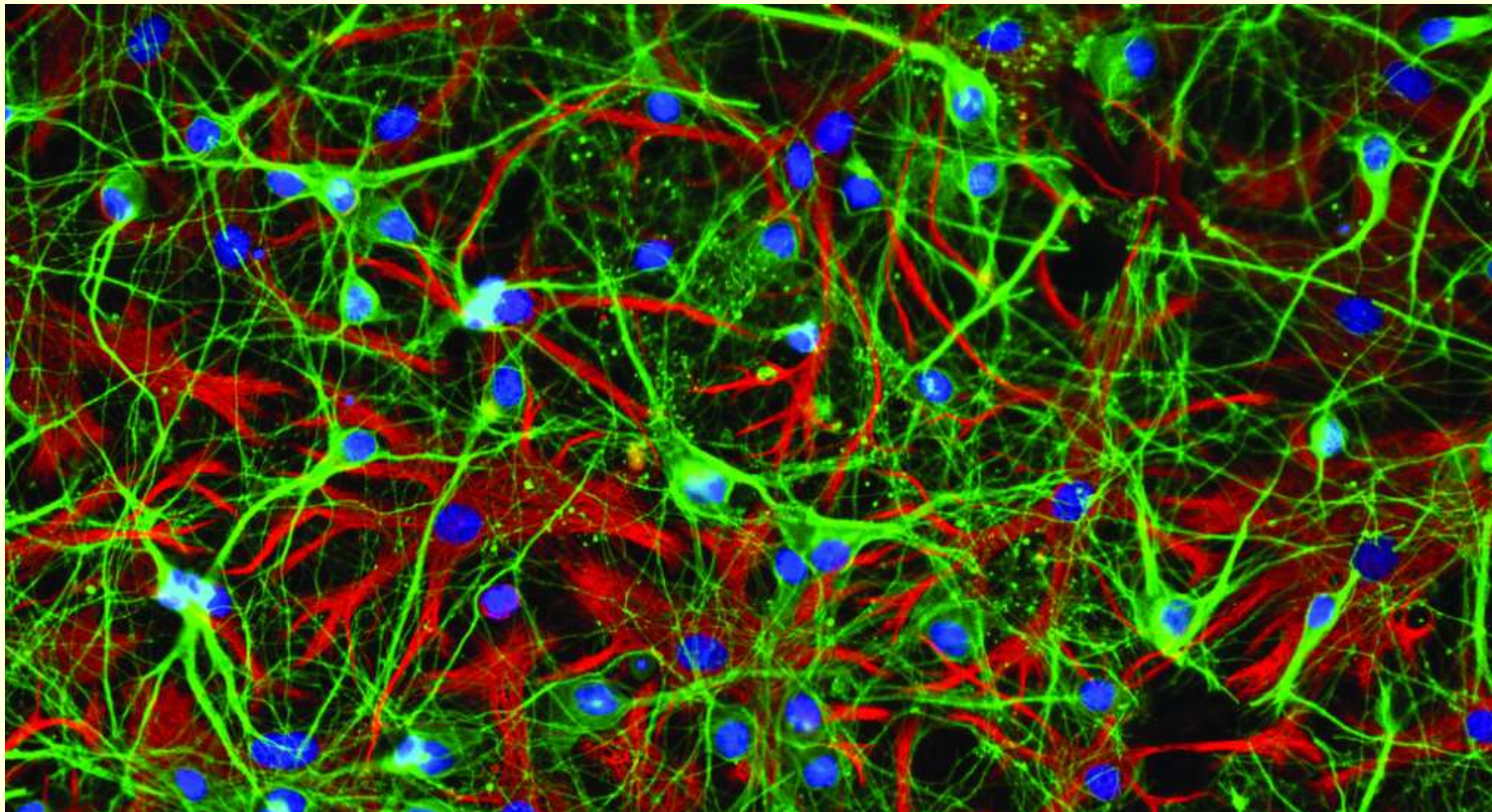


Ce n'est pas si étonnant si l'on pense à l'origine embryologique commune des neurones et des cellules gliales.



Un astrocyte peut être connecté à des milliers de différents neurones, pouvant ainsi contrôler leur excitabilité grâce à **ce réseau encore plus grand que celui formé par les neurones.**

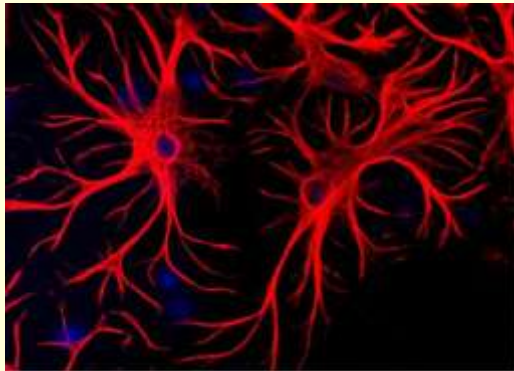
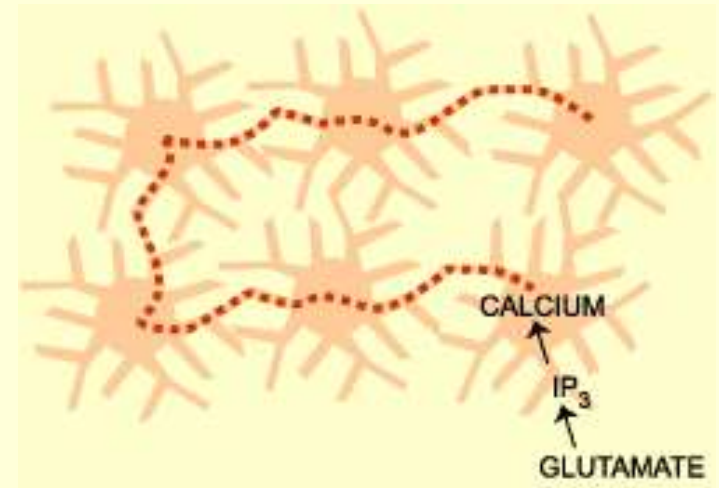
Le glutamate relâché par les cellules gliales pourrait ainsi contribuer à **synchroniser** l'activité neuronale dans l'hippocampe.



*Neurons and astrocytes isolated from rat hippocampus stained for DNA (blue), neuronal-specific  $\beta$ III-tubulin (green) and **astrocyte-specific GFAP (red).***

On sait aussi que les astrocytes sont **couplés** les uns aux autres par des "gap-jonctions" à travers lesquels peuvent circuler divers métabolites.

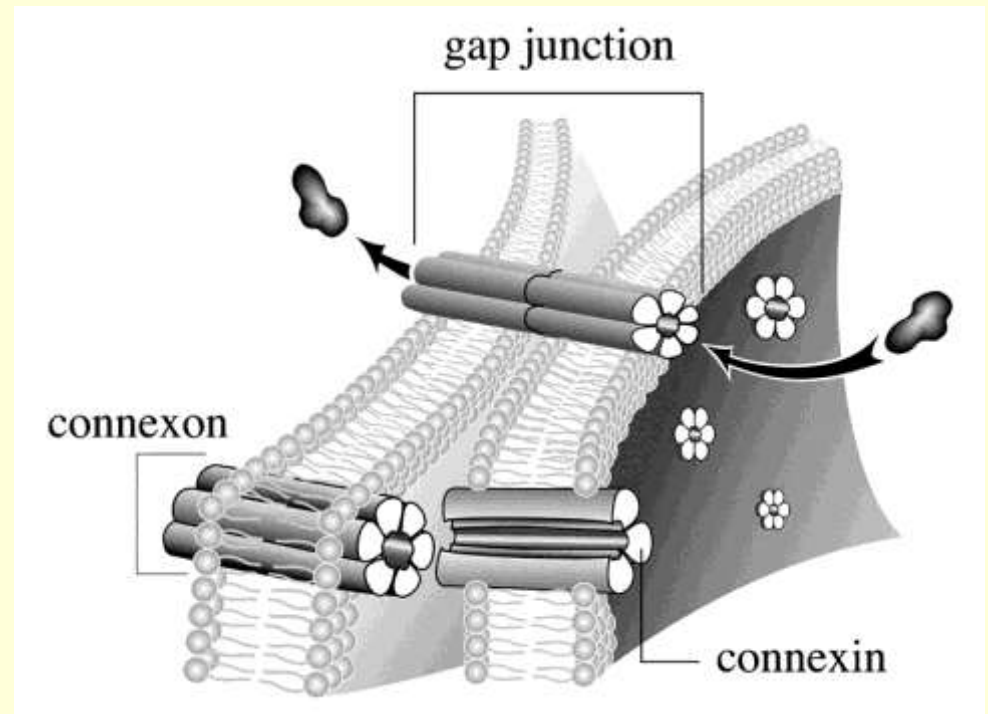
À travers ce réseau se propagent des **vagues d'ions calcium** dont l'effet régulateur pourrait se faire sentir dans un grand nombre de synapses entre neurones.



**Vidéo de 10 sec. :**

« This video captures the waves of calcium ions passing between rat astrocytes as they engage in non-electrical communication.»

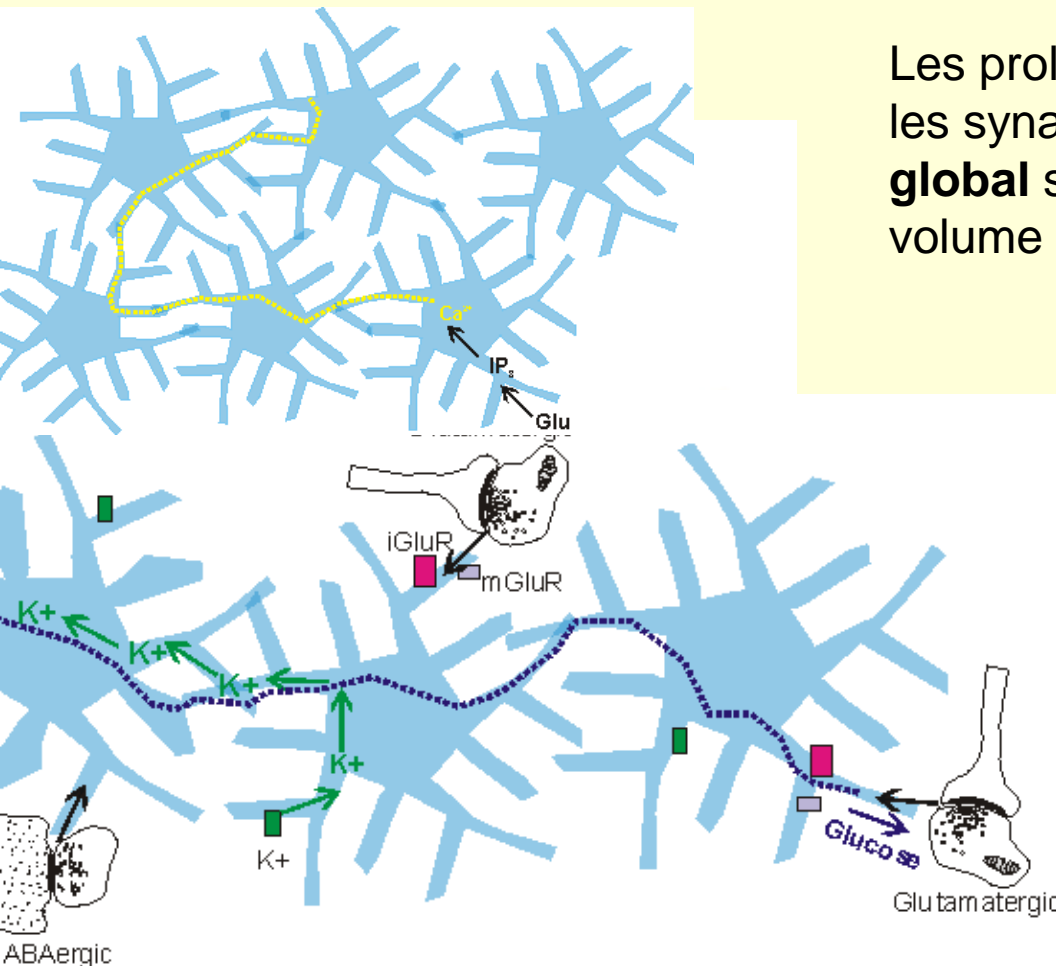
<http://www.nature.com/news/neuroscience-map-the-other-brain-1.13654>



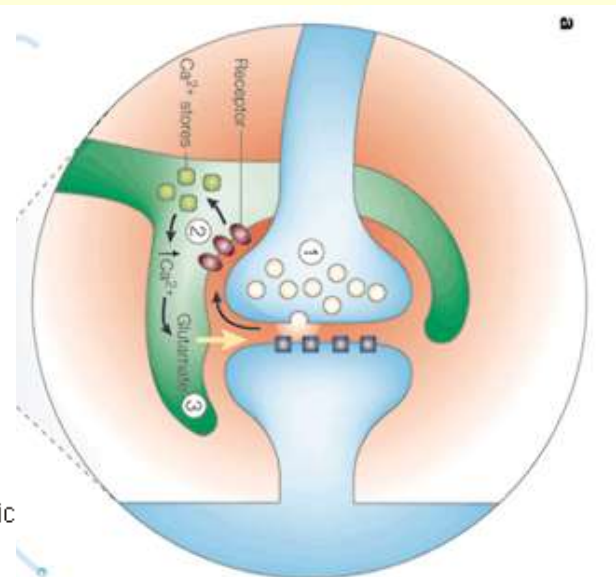


# Emerging role for astroglial networks in information processing: from synapse to behavior,

Trends in Neurosciences, July 2013



Les prolongements astrocytaires qui entourent les synapses pourraient **exercer un contrôle global** sur la concentration ionique et le volume aqueux dans les fentes synaptiques.



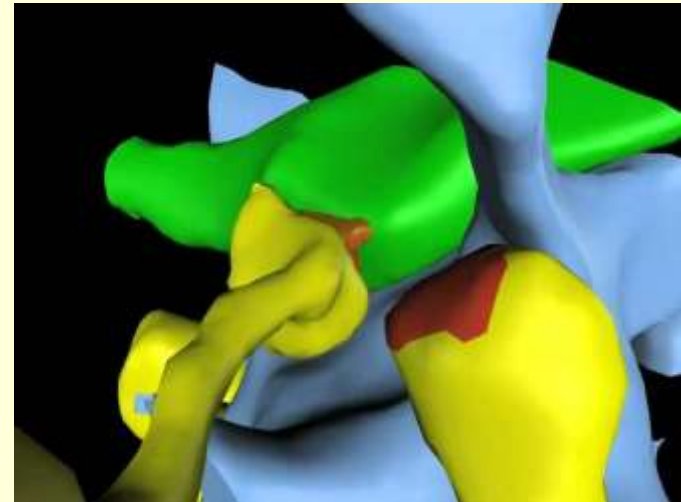
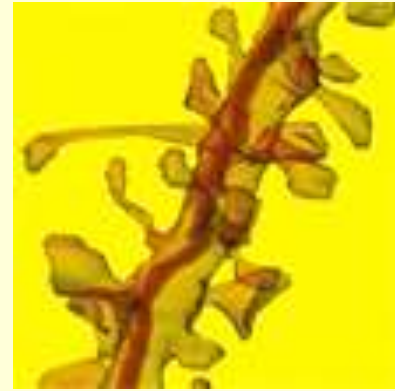
## Richesse et complexité structurale du neurone

### Waltz through hippocampal neuropil

Reconstruction of a block of hippocampus from a rat approximately 5 micrometers on a side from serial section transmission electron microscopy in the lab of Kristen Harris at the University of Texas at Austin in collaboration with Terry Sejnowski at the Salk Institute and Mary Kennedy at Caltech.

Voir le court segment du vidéo où l'on ajoute en bleu les **cellules gliales** (0:45 à 2:00):

<http://www.youtube.com/watch?v=FZT6c0V8fW4>



**Ultrastructural Analysis of Hippocampal Neuropil from the Connectomics Perspective**  
**Neuron**, Volume 67, Issue 6, p1009–1020, 23 September **2010**

<http://www.cell.com/neuron/abstract/S0896-6273%2810%2900624-0>

Bref :

“**Most neuroscientists are still extremely neuron-centric,**” thinking almost exclusively in terms of neuronal activity when explaining brain function, while ignoring glia..”

- Mo Costandi,  
scientific writer

“It's very obvious that we have to redefine our approach to the brain, and to **stop dividing it into neurons and glia.**”

- Alexei Verkhratsky,  
neurophysiologist,  
University of Manchester

THE  
OTHER BRAIN



From Dementia to Schizophrenia,  
How New Discoveries about the  
Brain Are Revolutionizing Medicine  
and Science

R. DOUGLAS FIELDS, Ph.D.

## No Brain Mapping Without Glia

May 17, **2015**

Jon Lieff

[http://jonlieffmd.com/blog/no-brain-mapping-without-glia?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=048f7a464d-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-048f7a464d-94278693](http://jonlieffmd.com/blog/no-brain-mapping-without-glia?utm_source=General+Interest&utm_campaign=048f7a464d-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-048f7a464d-94278693)

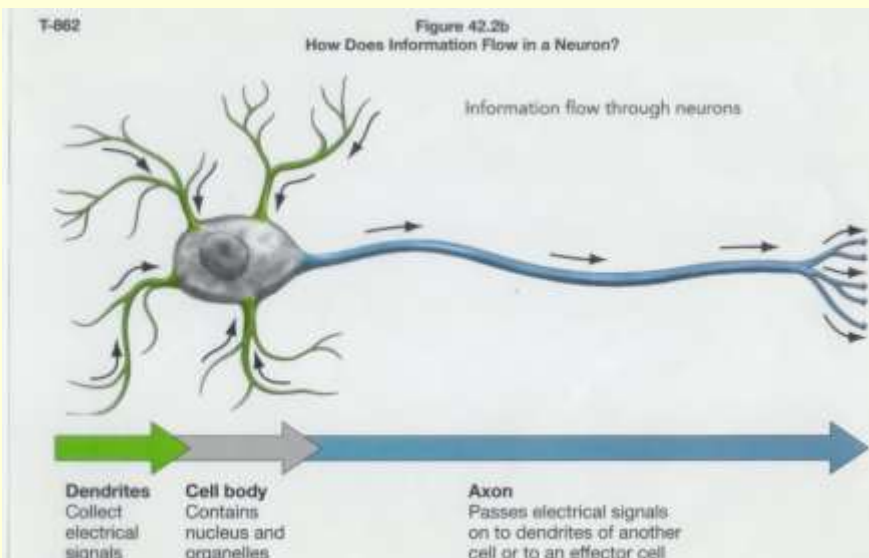
## La « théorie du neurone » :

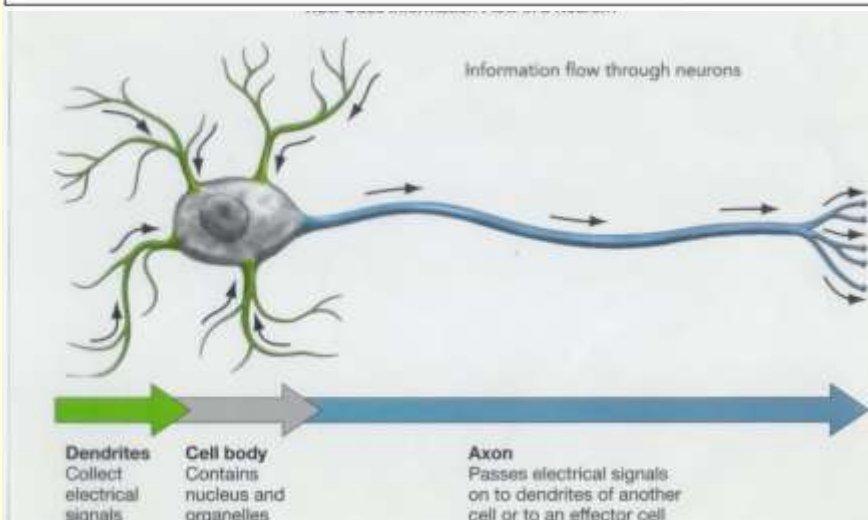
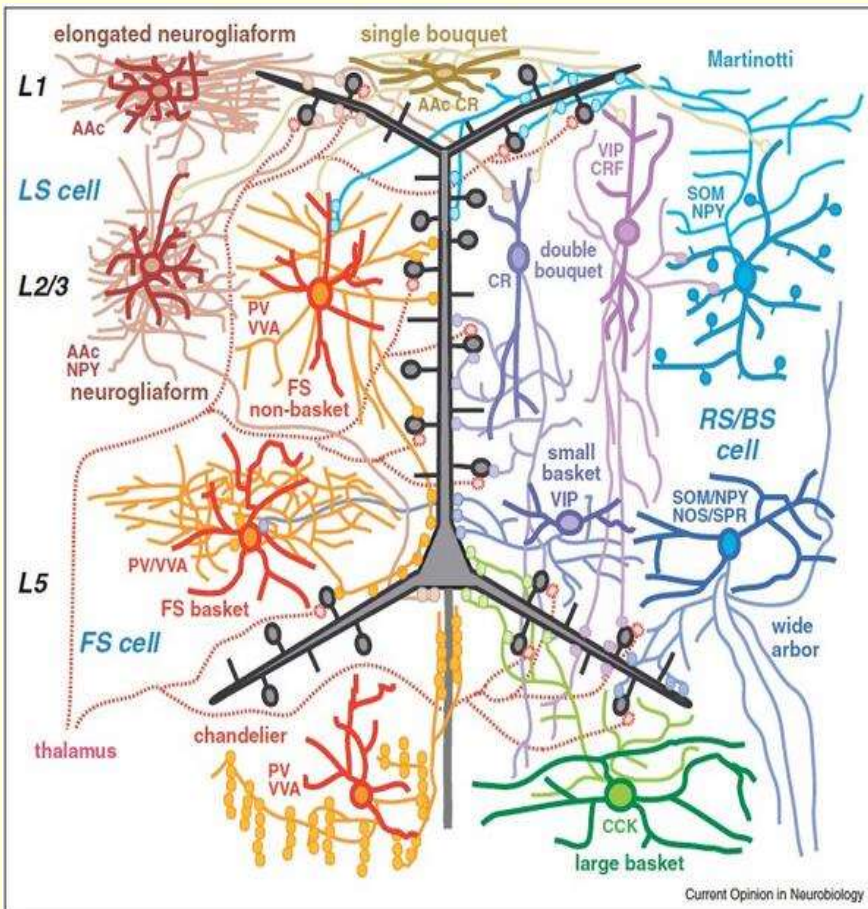
1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles;**

3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites, le corps cellulaire et l'axone;**

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).





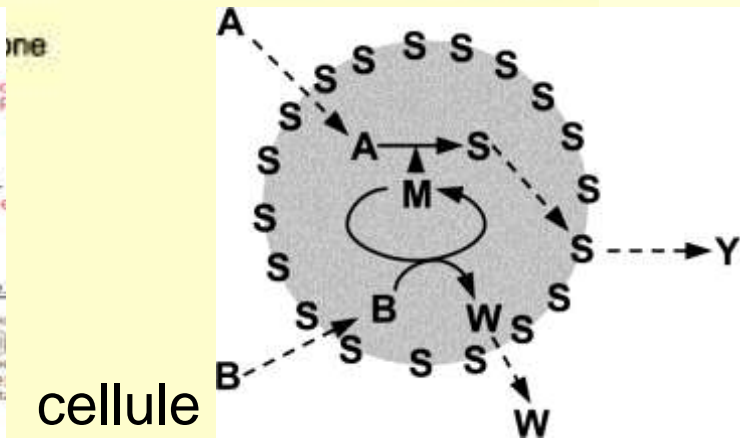
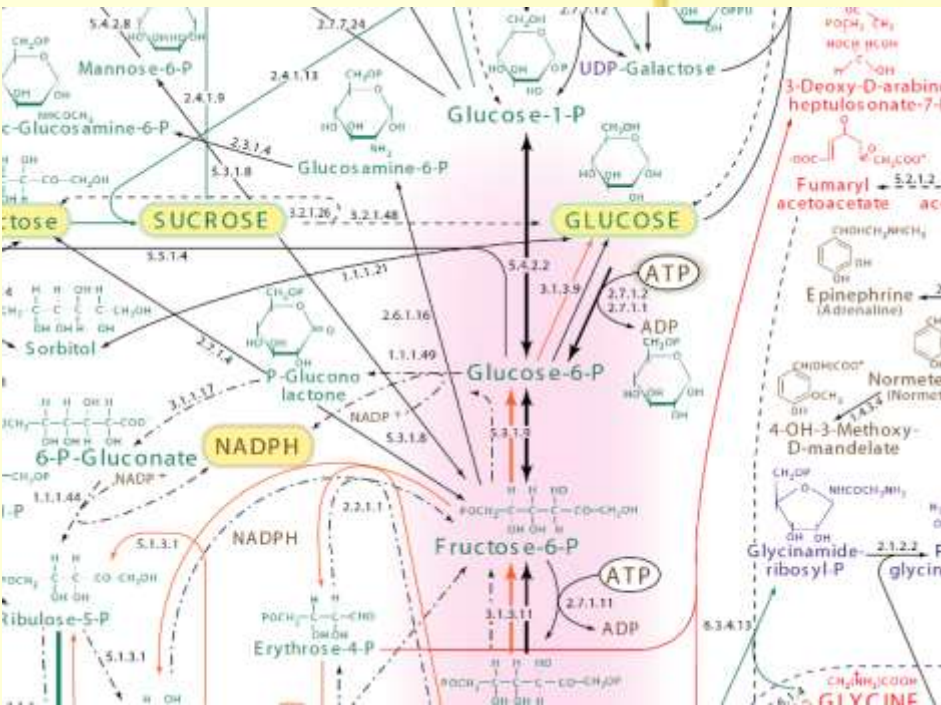
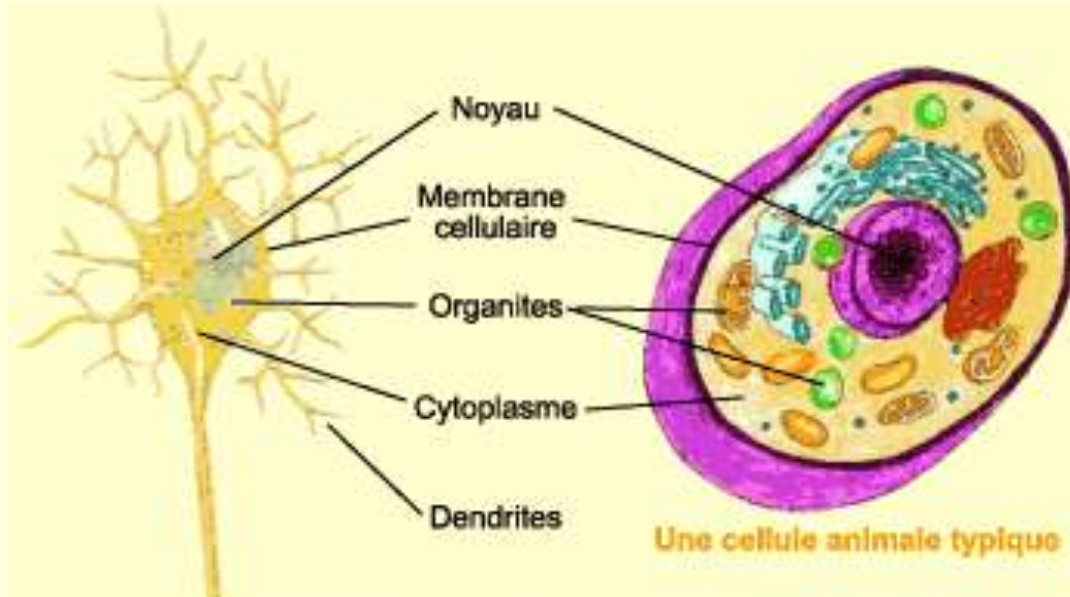
La « théorie du neurone » :

1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

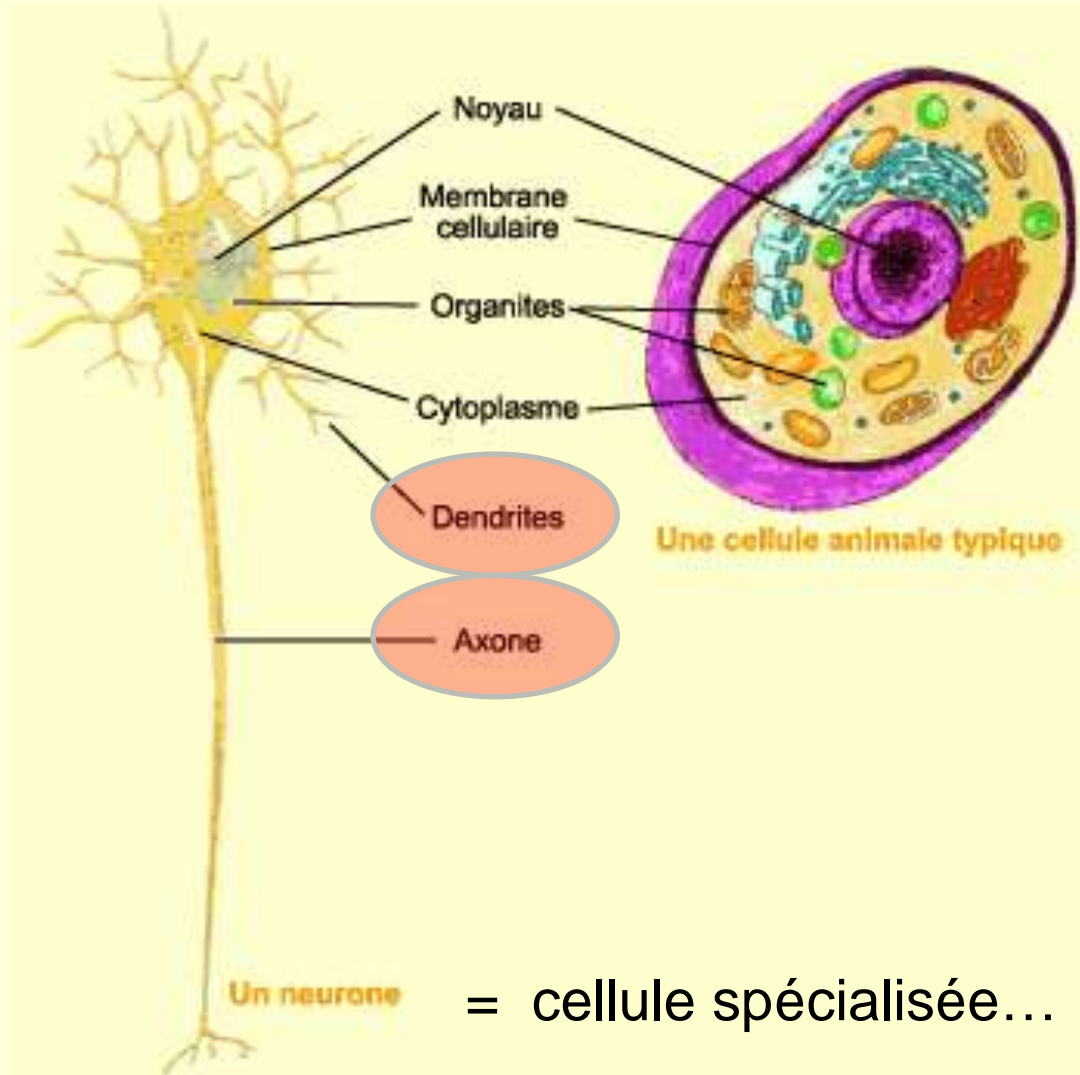
2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles;**

3) ~~Un neurone est composé de 3 parties : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone;~~

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).

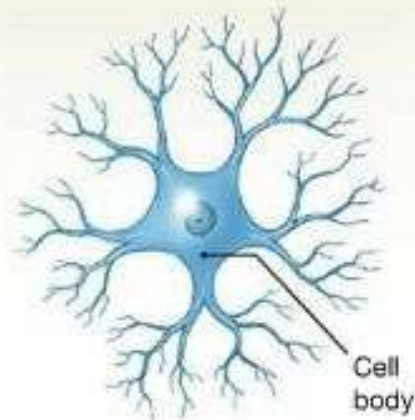


cellule



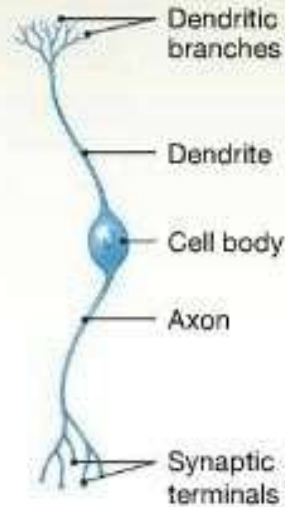
## A Structural Classification of Neurons.

**Anaxonic neuron**



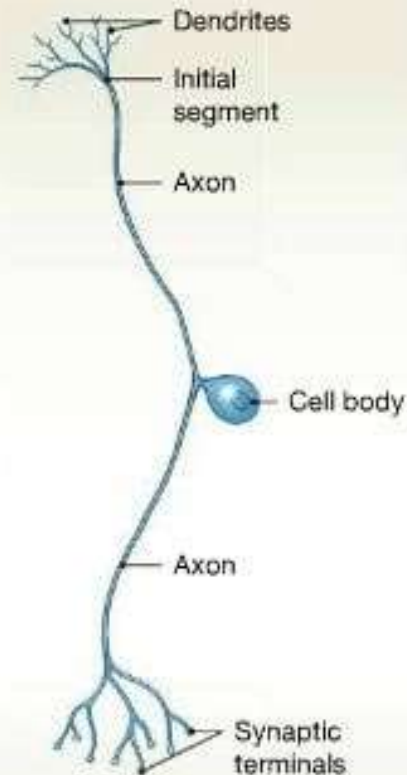
**a** Anaxonic neurons have more than two processes, but axons cannot be distinguished from dendrites.

**Bipolar neuron**



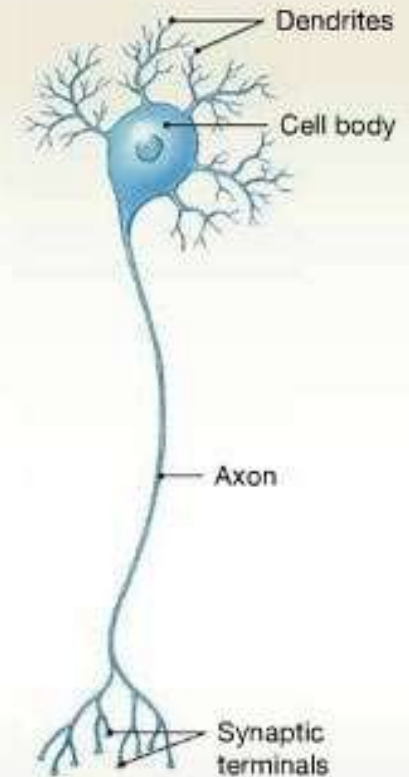
**b** Bipolar neurons have two processes separated by the cell body.

**Unipolar neuron**



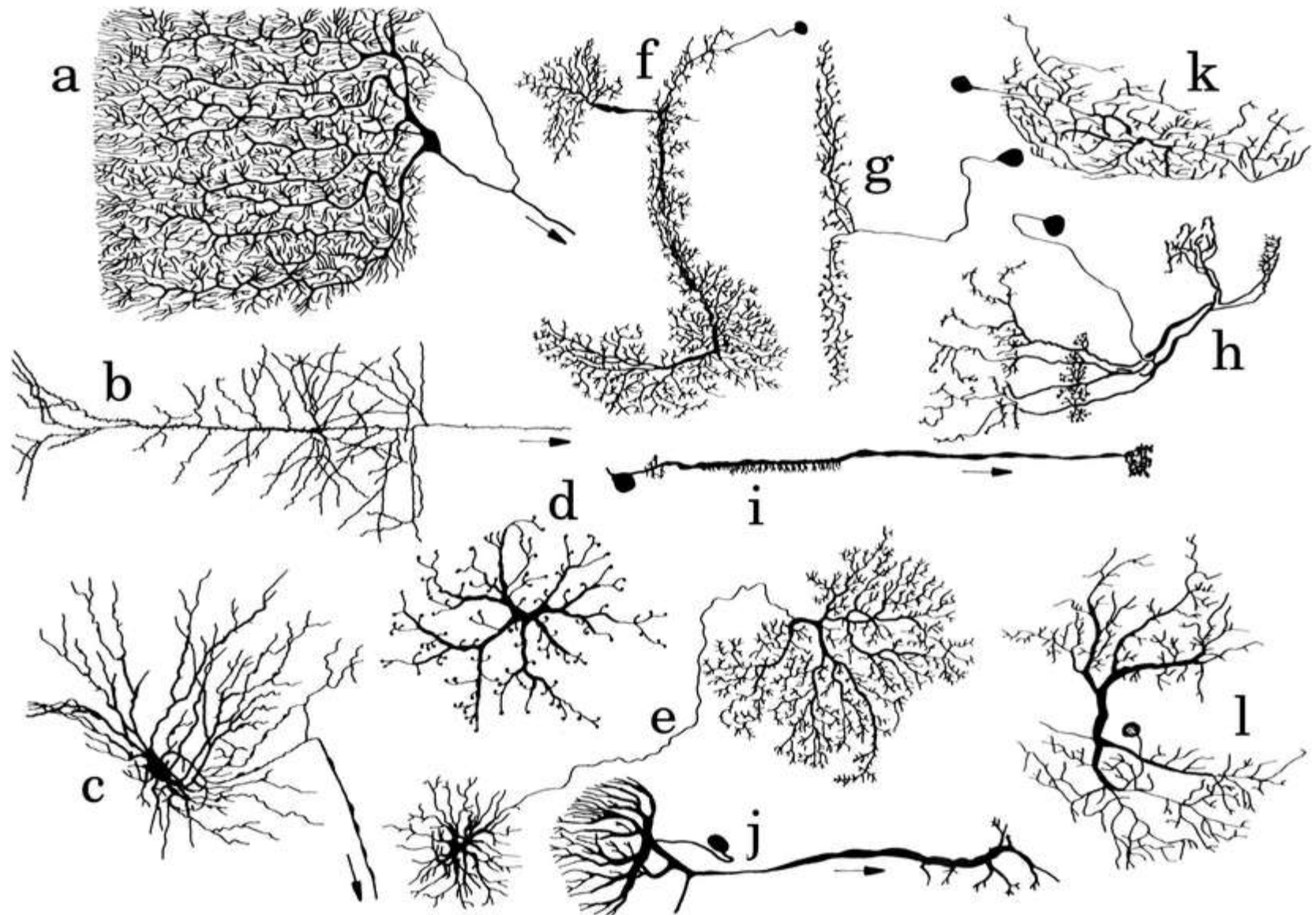
**c** Unipolar neurons have a single elongate process, with the cell body situated off to the side.

**Multipolar neuron**

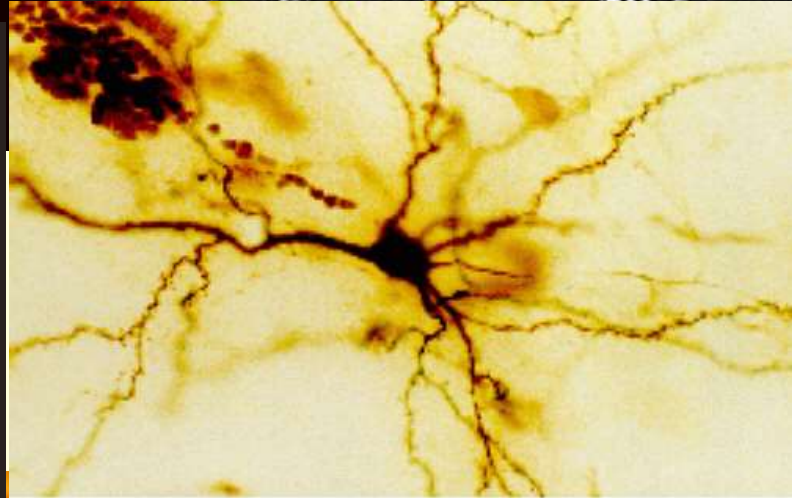
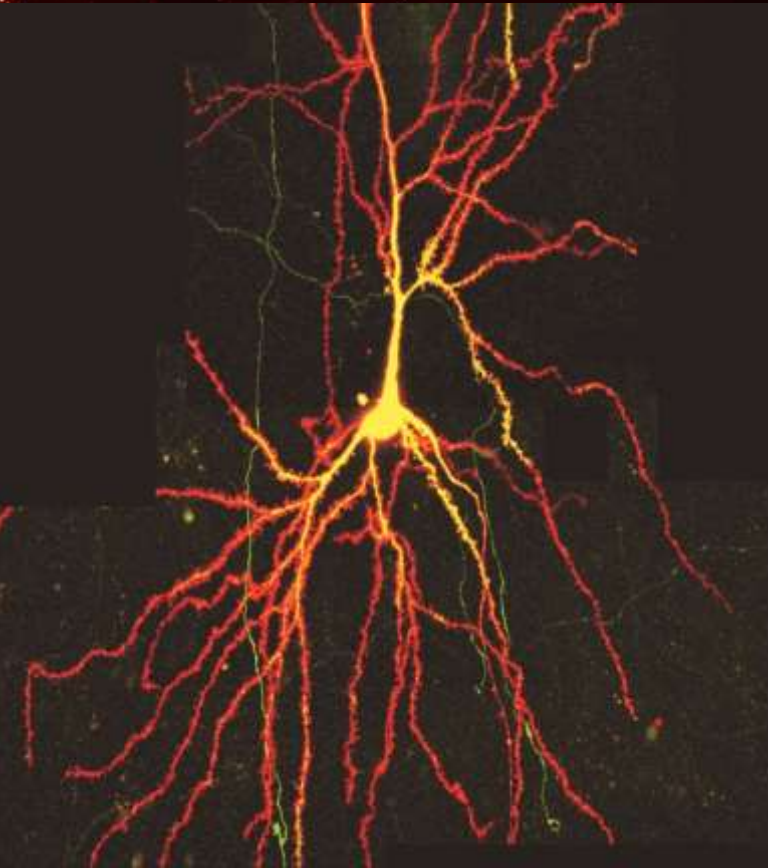
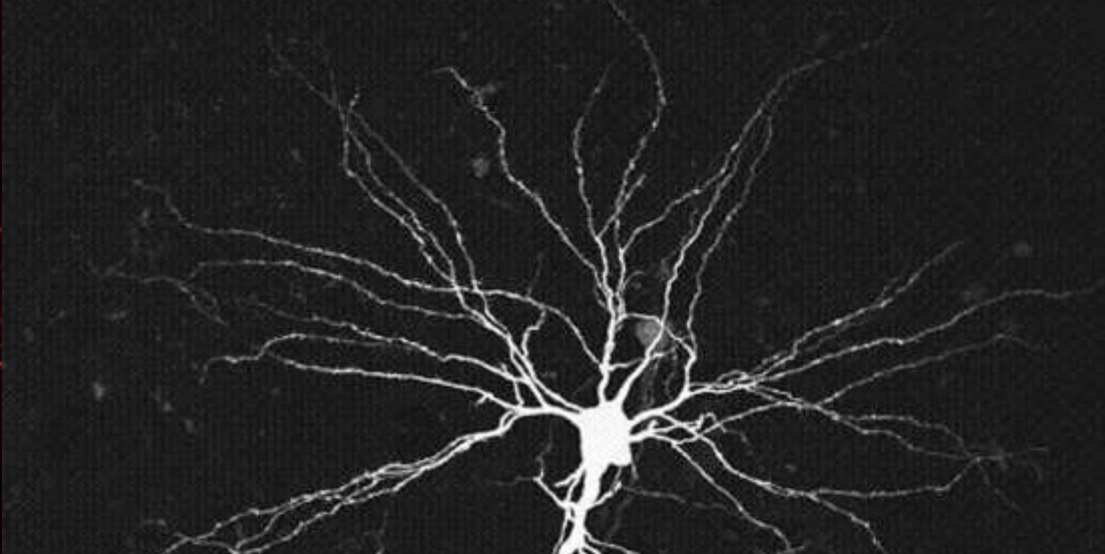
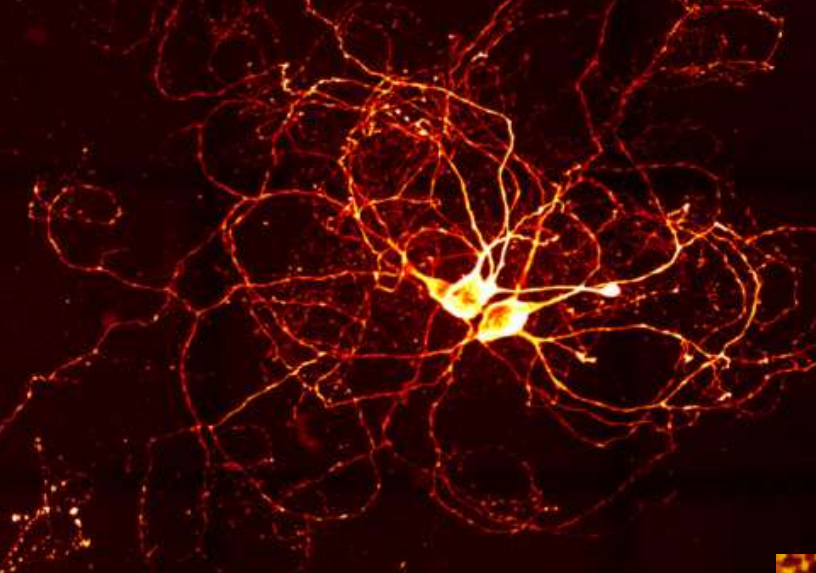


**d** Multipolar neurons have more than two processes; there is a single axon and multiple dendrites.





**Anatomical diversity of neuronal cells:** a Purkinje neuron from human b pyramidal neuron (rabbit) c motor neuron (cat) d,e horizontal neuron (cat) f pre-motor interneuron (locust) g visual amacrine neuron (fly) h multipolar neuron (fly) i visual monopolar neuron (fly) j visual interneuron (locust) k pre-motor interneuron (crayfish) l mechanical sensory neuron (crayfish); The arrows indicate the signal output zone. (from Cajal, Fisher and Boycott, Burrows, Strausfeld, O'Shea, Rowell and Reichert). The illustration has been taken from: H. Reichert; Neurobiologie, page 23 [9].

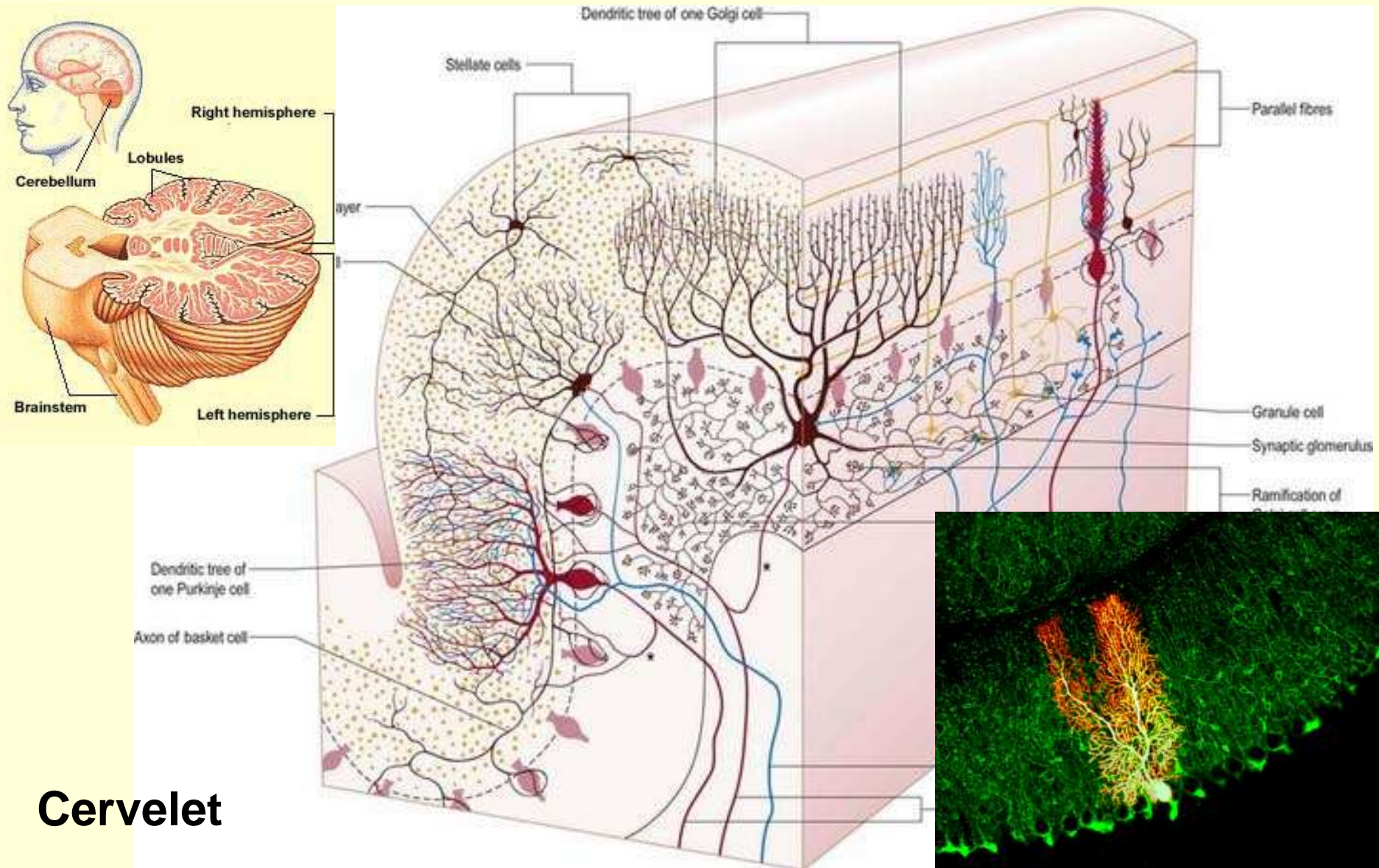


Très grand nombre de types de neurones différents

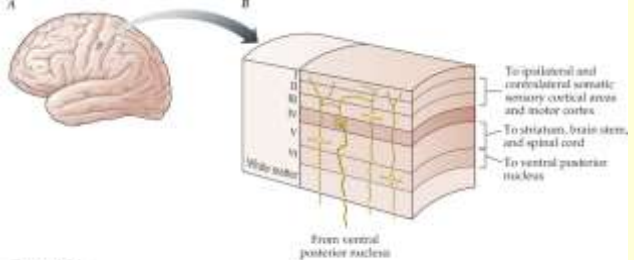
(estimé à plus de 1 000 et peut-être beaucoup plus, voire un continuum de types...).

<http://jonlieffmd.com/blog/how-many-different-kinds-of-neurons-are-there>

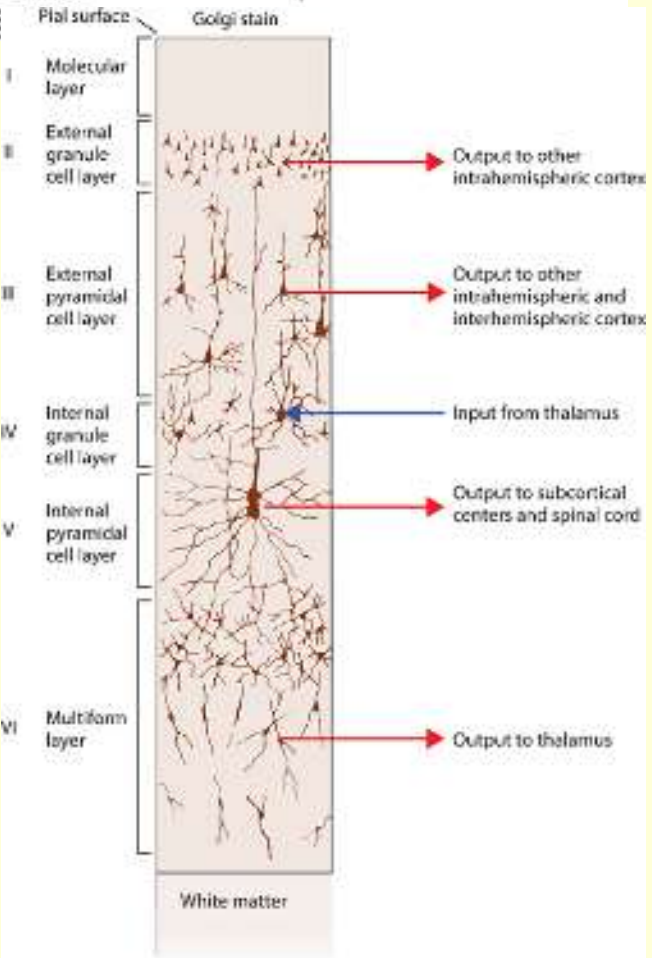
Cette variabilité de forme s'explique par le pattern de connectivité entre les neurones, qui va déterminer les capacités computationnelles d'un circuit nerveux donné.



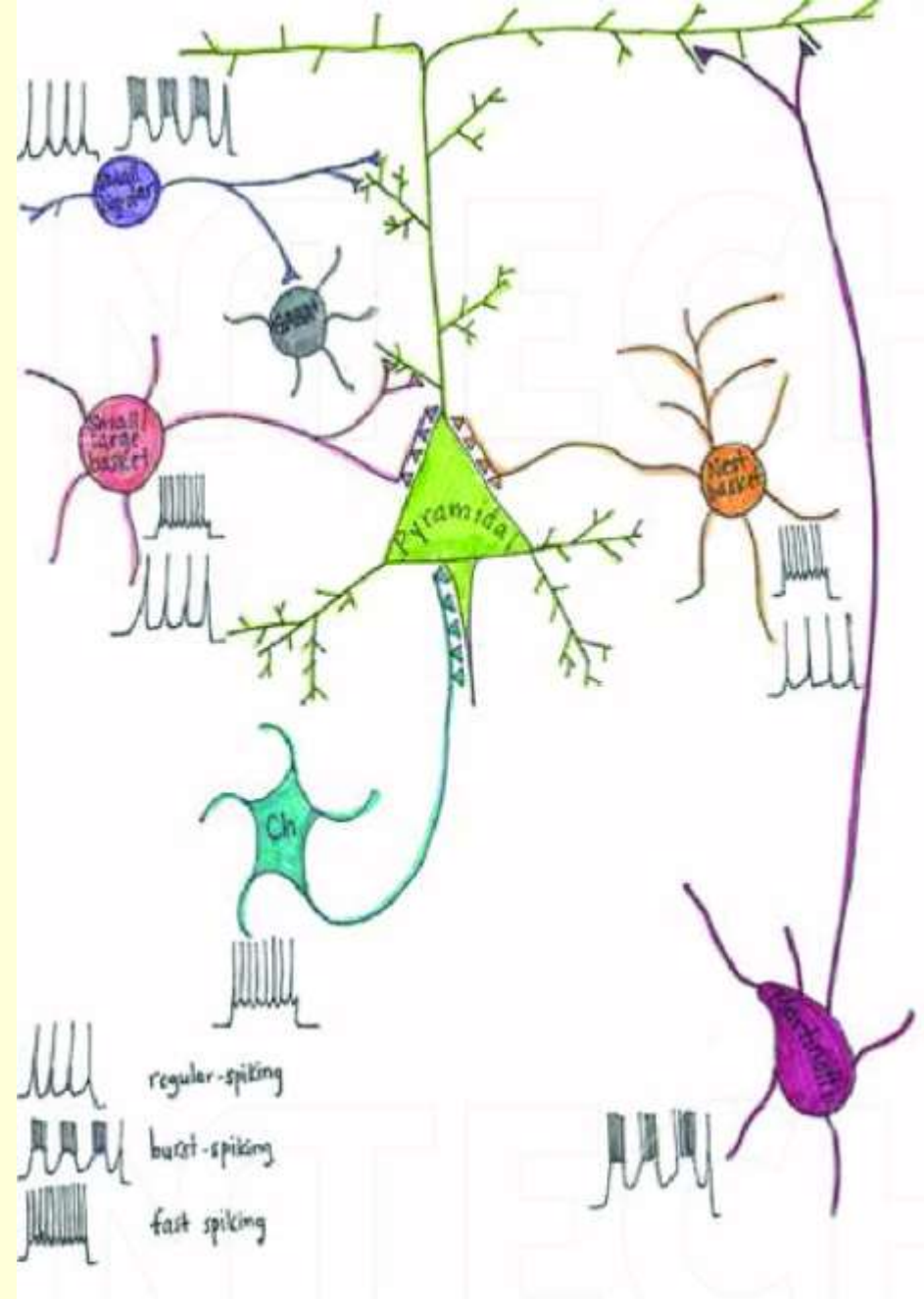
# Cervelet



# Cortex

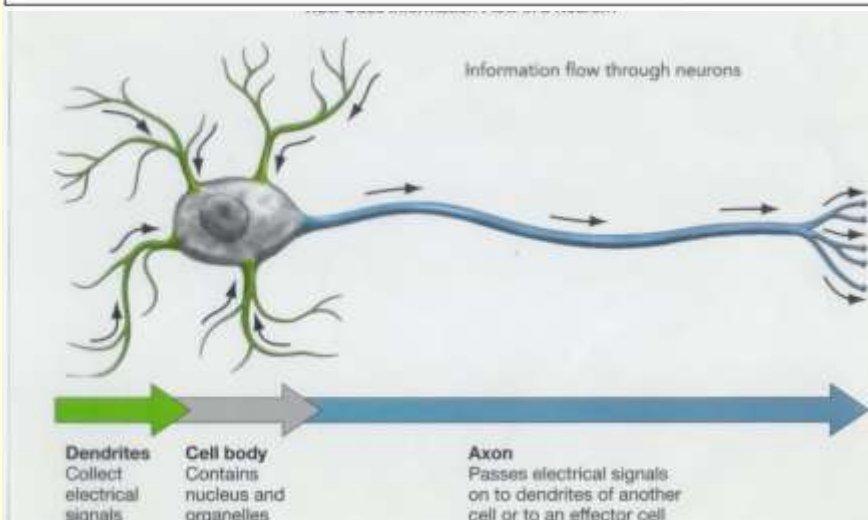
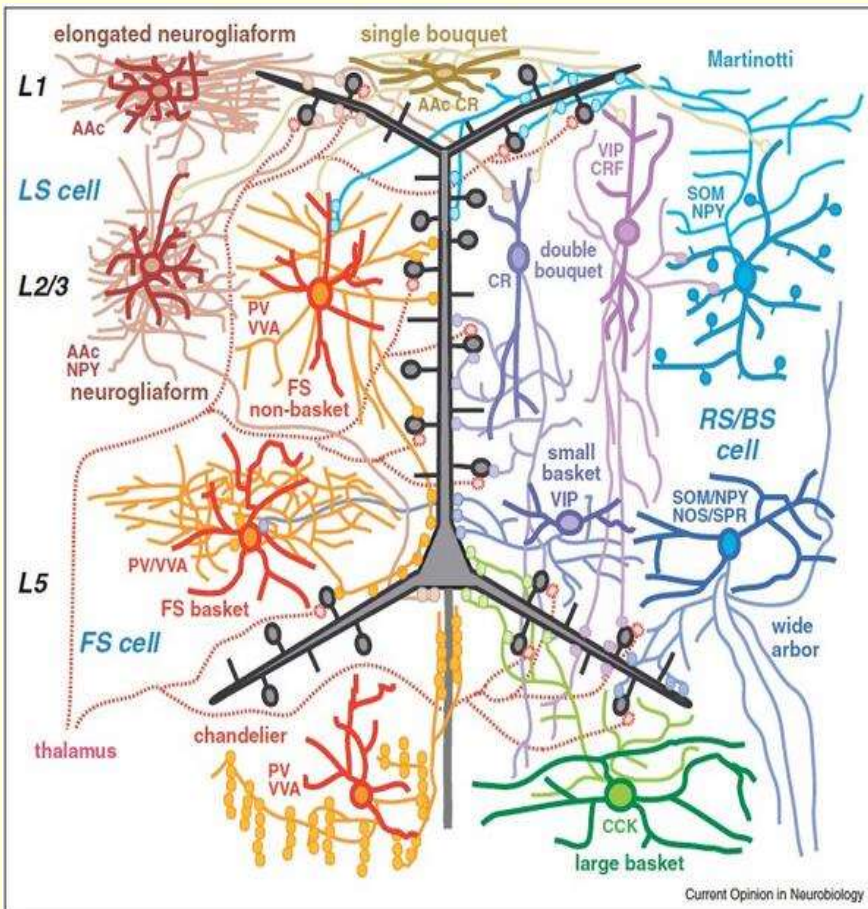


Source: Tony Mosconi, Victoria Graham: Neuroscience for Rehabilitation Copyright © McGraw-Hill Education. All rights reserved.



Les neurones ont leur identité **anatomique...**

...et **physiologique !**



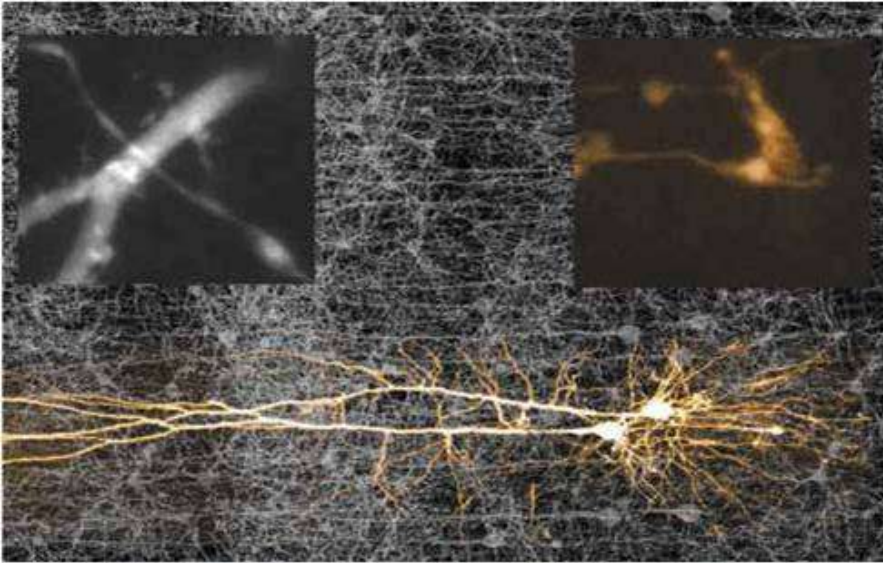
La « théorie du neurone » :

1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

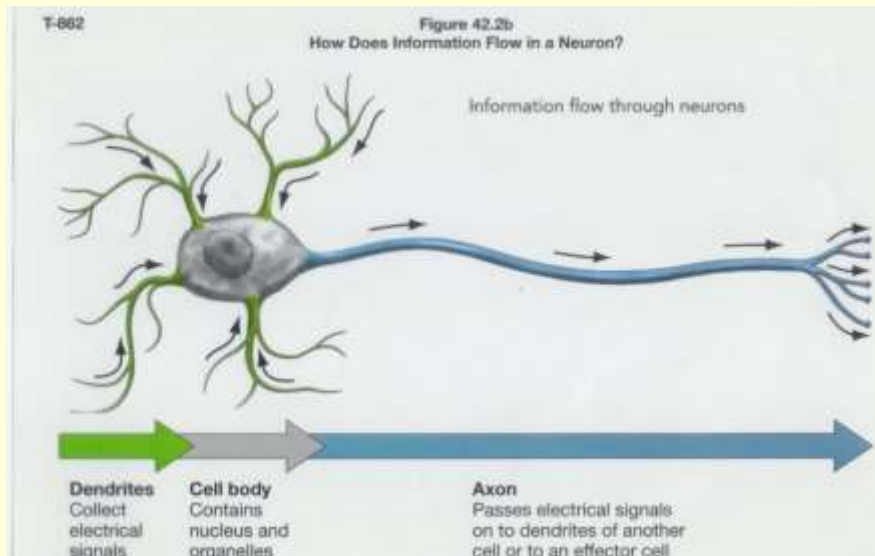
2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles;**

3) ~~Un neurone est composé de 3 parties : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone;~~

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).



## Des couplages électriques



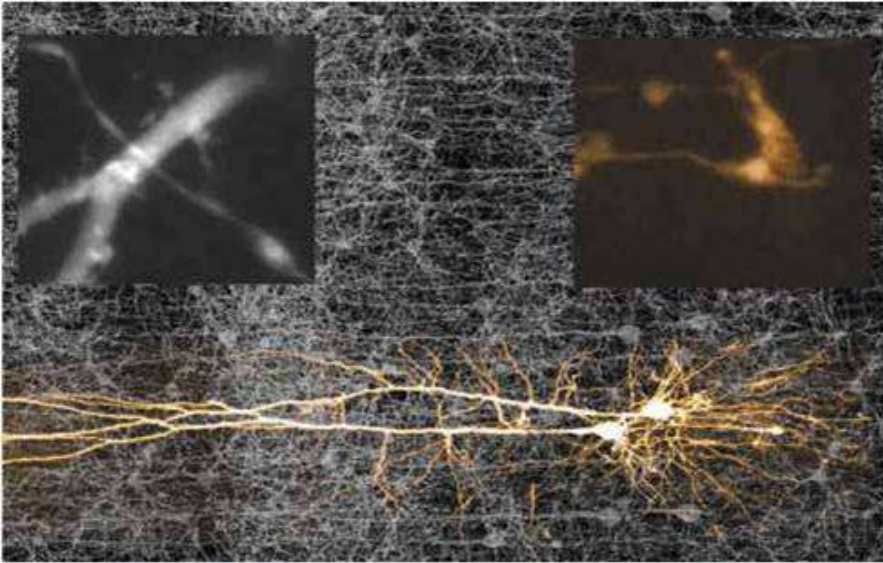
## La « théorie du neurone » :

1) ~~Le neurone est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;~~

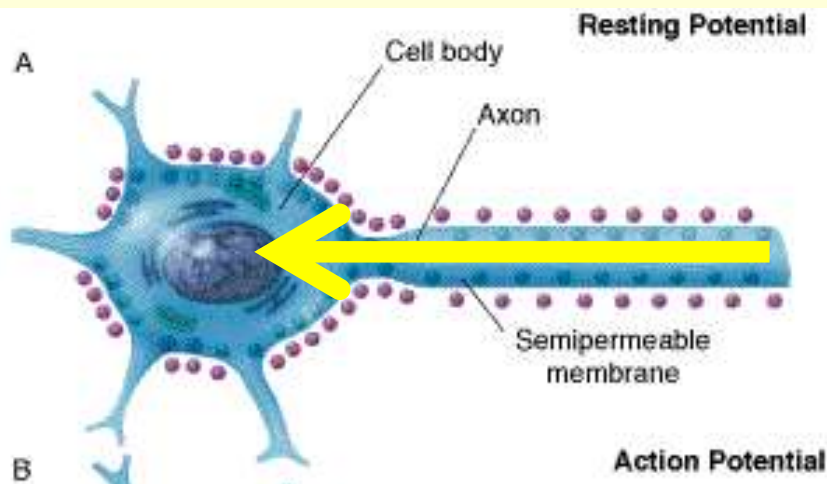
2) ~~Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont pas reliées en continu entre elles;~~

3) ~~Un neurone est composé de 3 parties : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone;~~

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).



Des couplages électriques donnent lieu à des potentiels d'action antidromiques.



## La « théorie du neurone » :

1) **Le neurone** est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux;

2) Les neurones sont des cellules discrètes qui ne sont **pas reliées en continu entre elles**;

3) Un neurone est composé de 3 parties : les **dendrites**, le **corps cellulaire** et l'**axone**;

4) L'information circule le long d'un neurone **dans une direction** (des dendrites à l'axone, via le corps cellulaire).

Neuron. **2001** Sep 13;31(5):831-40.

## **Axo-axonal coupling.**

A novel mechanism for ultrafast neuronal communication.

Schmitz D, et al.

## **Information processing in the axon.**

Dominique Debanne. Nature Reviews Neuroscience 5, 304-316

(April **2004**)

« the functional capabilities of axons are much more diverse than traditionally thought.»



# Electrotonic Coupling between Pyramidal Neurons in the Neocortex

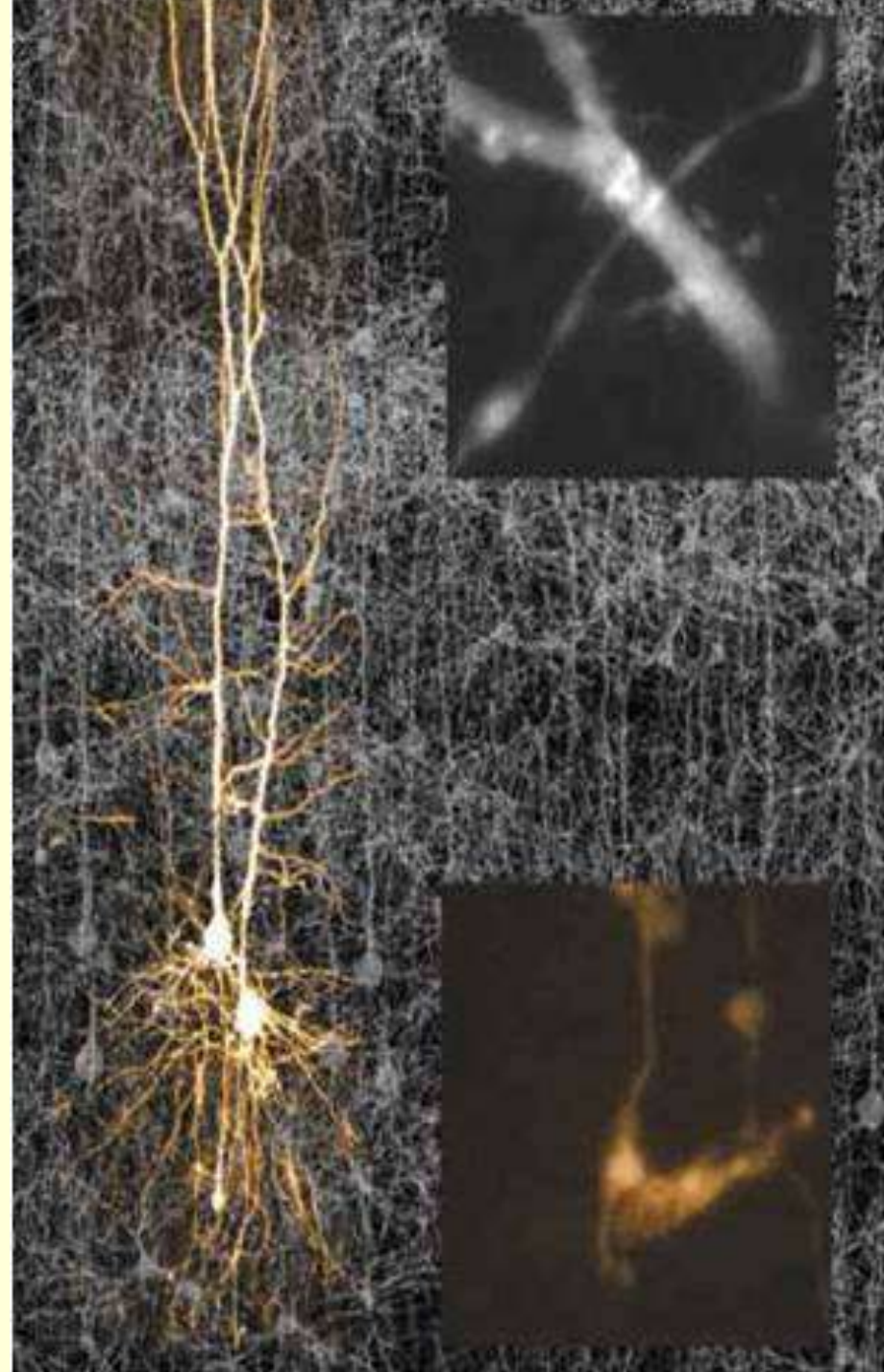
Yun Wang mail, et al., April 26, 2010

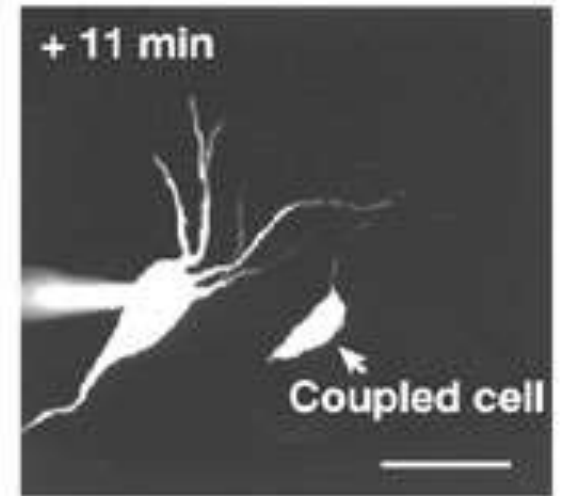
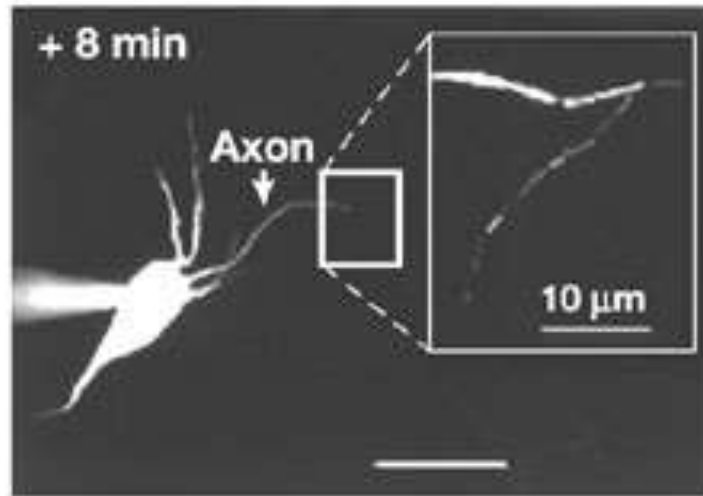
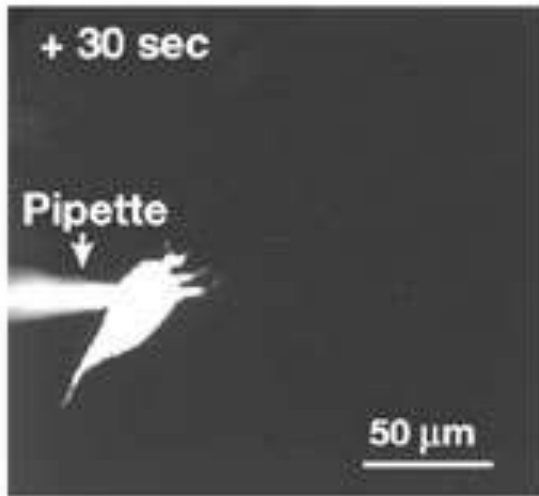
Couplages électriques enregistrés  
entre des **neurones pyramidaux**

dans le **cortex préfrontal médian**  
et dans le **cortex visuel**  
du rat et du furet.

Potentiels d'action parfaitement  
**synchronisés** entre  
**les neurones pyramidaux couplés.**

Suggère un rôle dans la  
**synchronisation** neuronale  
dans le cortex...



**b**

Nature Reviews | Neuroscience

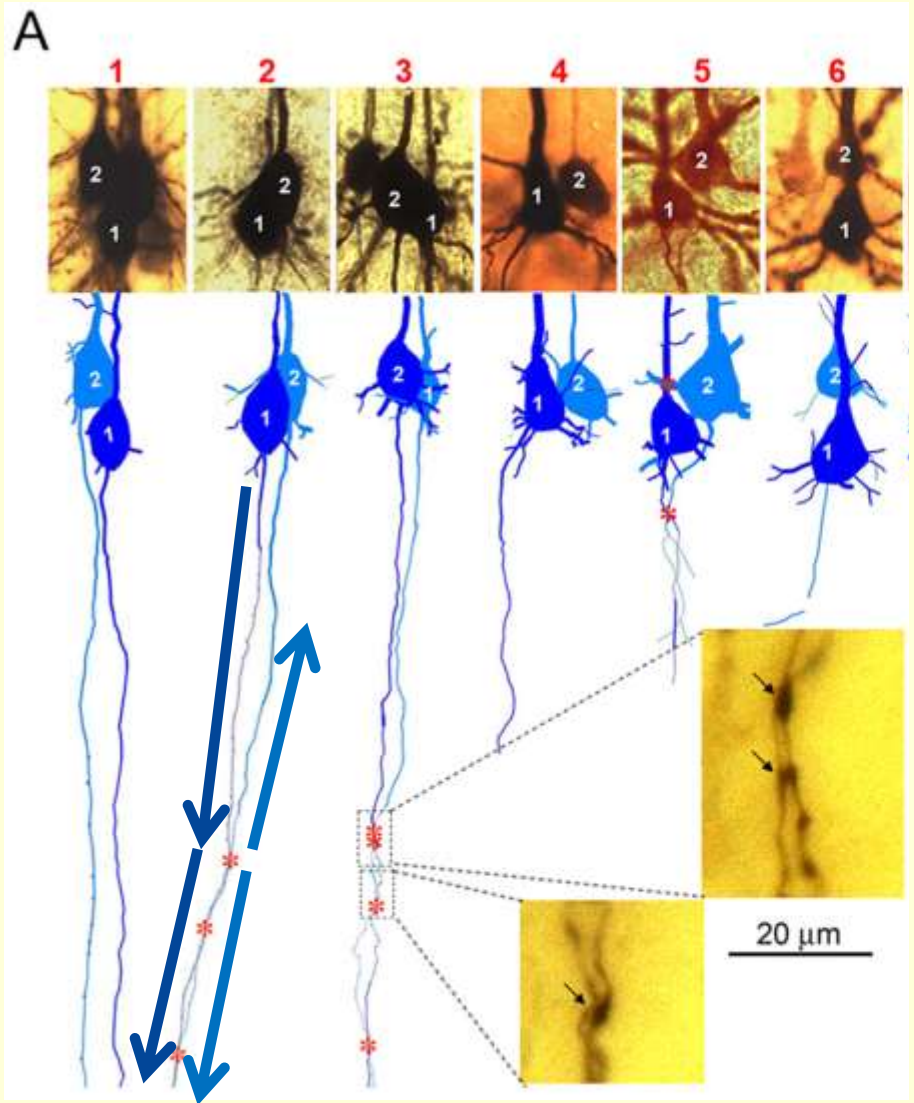
**Données anatomiques :**

Information processing in the axon.

Dominique Debanne

Nature Reviews Neuroscience 5, 304-316

(April **2004**)



**Gap junctions create gaps that connect animal cells.**

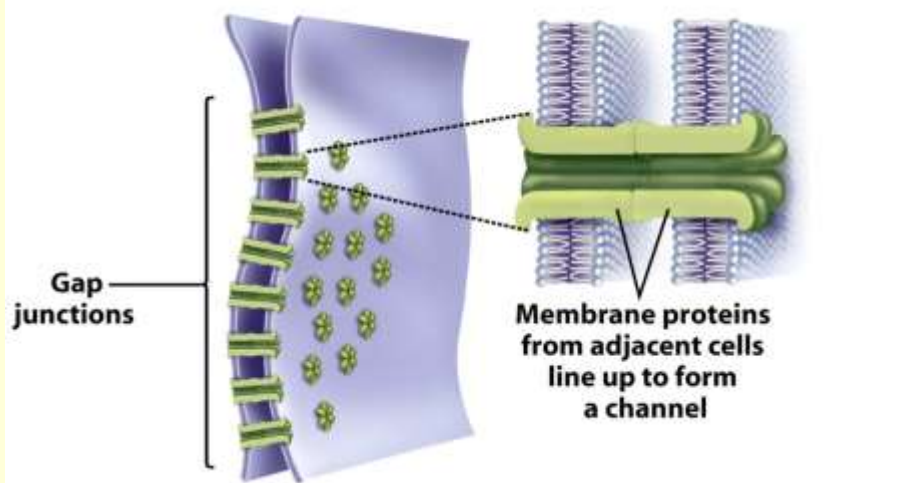
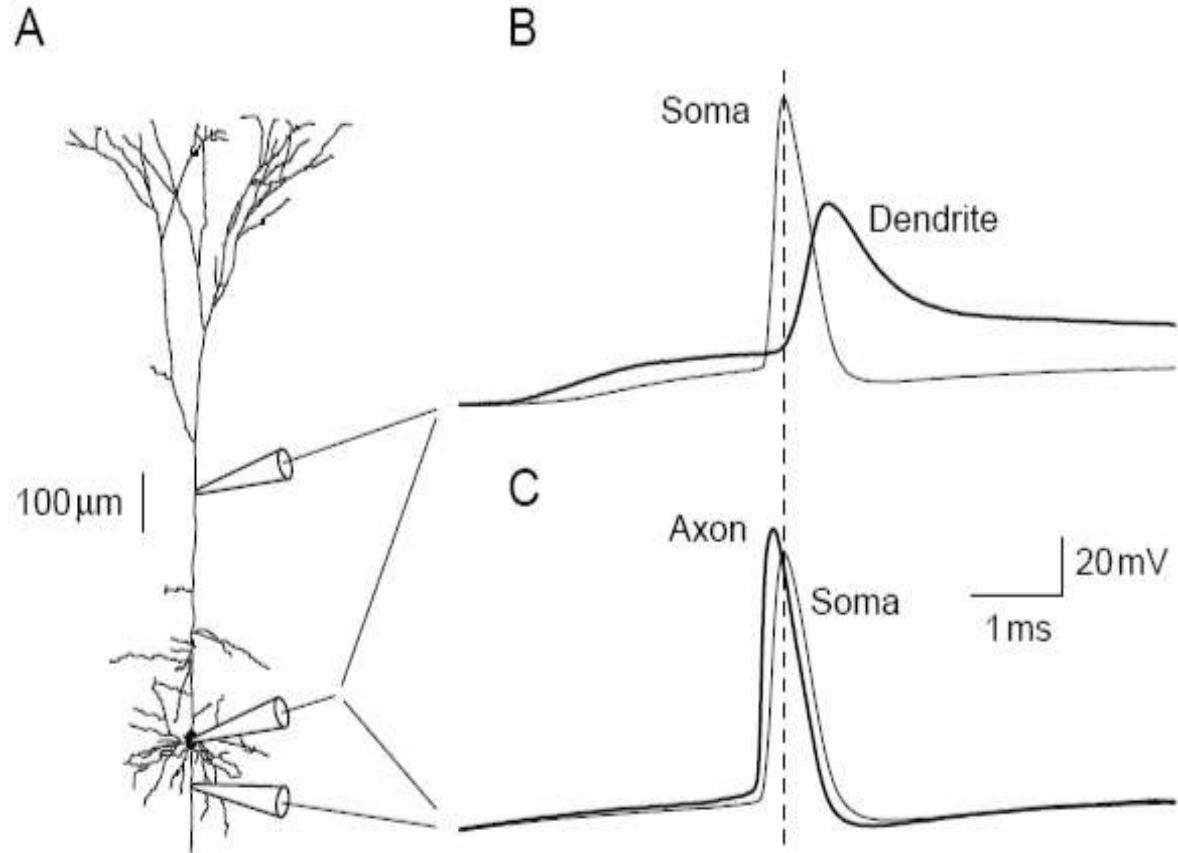
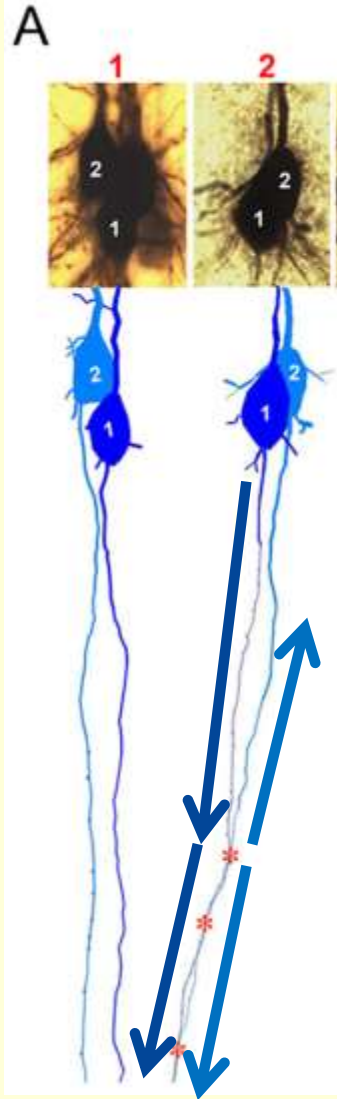


Figure 8-13b part 2 Biological Science, 2/e

On connaissait le phénomène depuis longtemps...



## Le “coming out” de la synapse électrique

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/05/05/le-coming-out-de-la-synapse-electrique/>

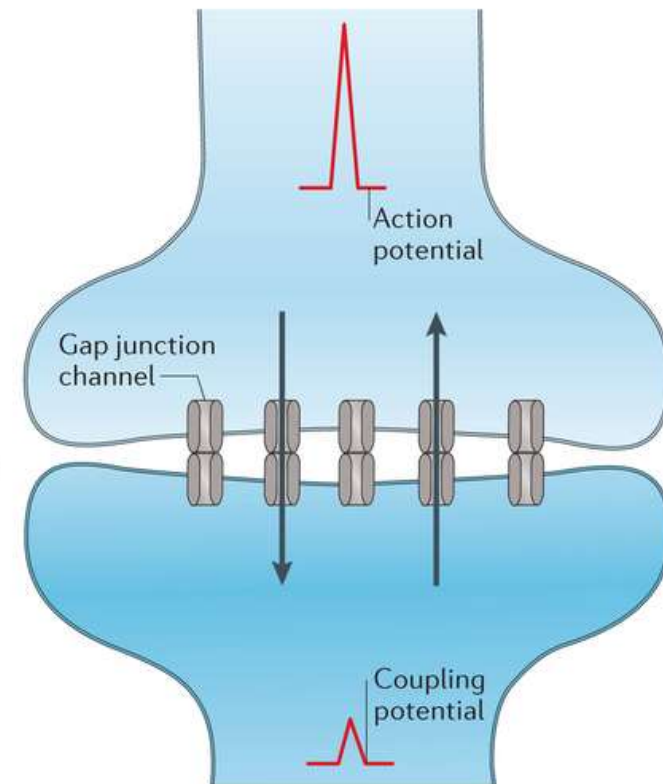
## Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses

Alberto E. Pereda

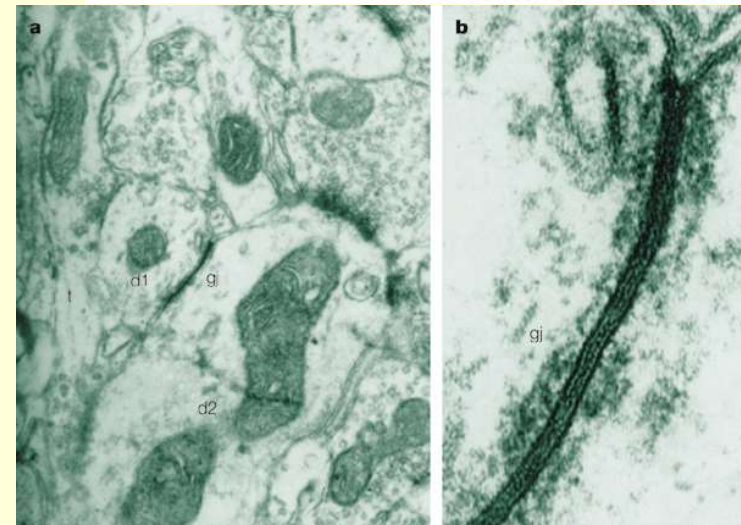
Nature Reviews Neuroscience 15, 250–263 (2014)

<http://www.nature.com/nrn/journal/v15/n4/full/nrn3708.html>

**b** Electrical synapse



Nature Reviews | Neuroscience



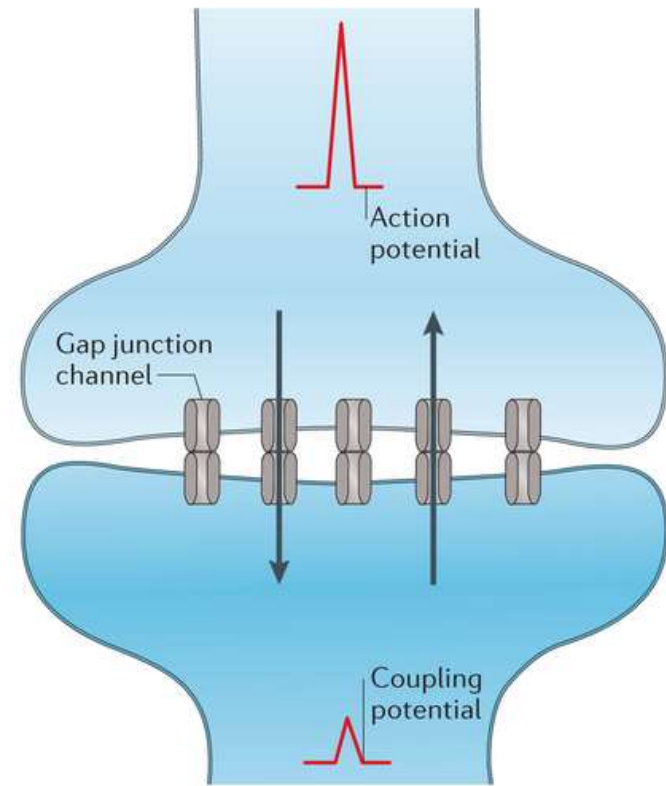
## Le “coming out” de la synapse électrique

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/05/05/le-coming-out-de-la-synapse-electrique/>

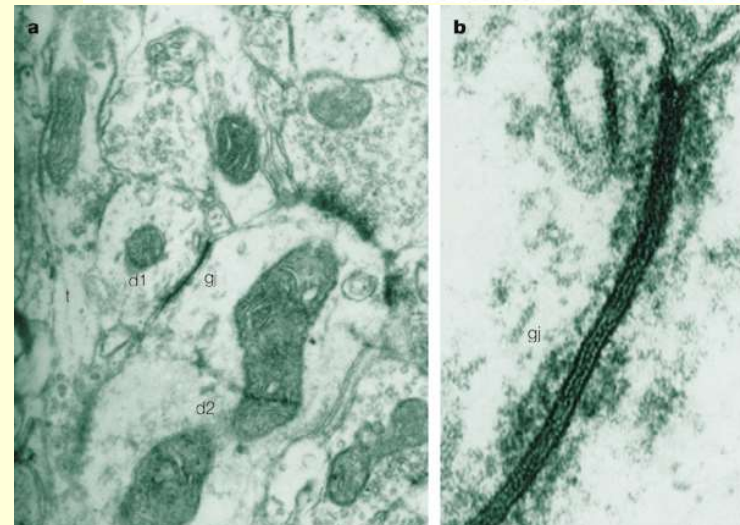
- les synapses électriques sont beaucoup **plus répandues** que ce que l'on croyait dans le cerveau humain.

- les synapses chimiques et électriques **interagiraient énormément**, que ce soit durant le développement de notre système nerveux que dans le cerveau humain adulte.

b Electrical synapse

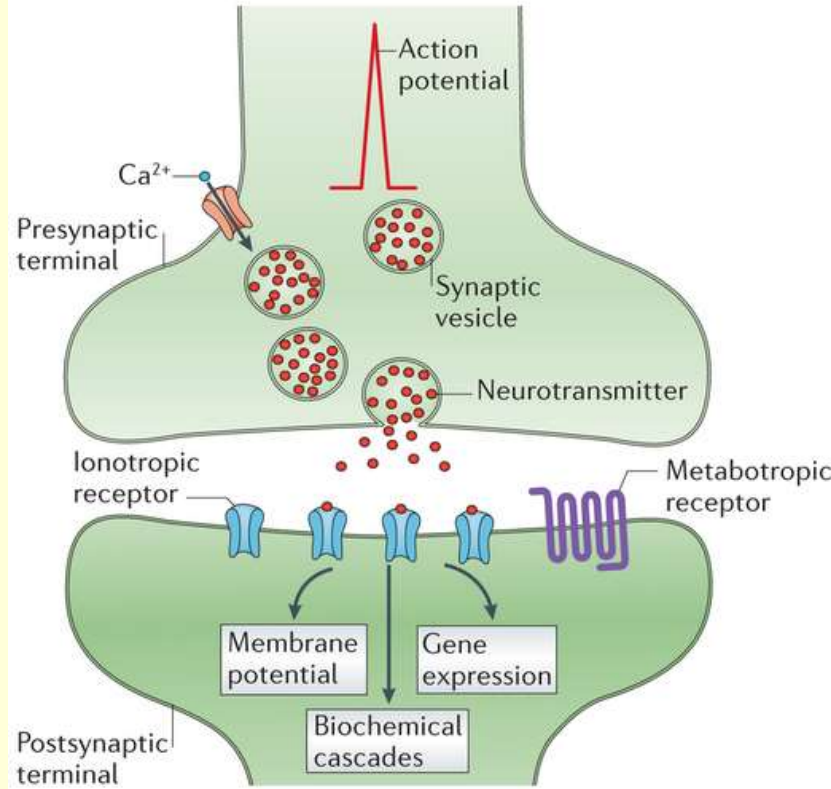


Nature Reviews | Neuroscience

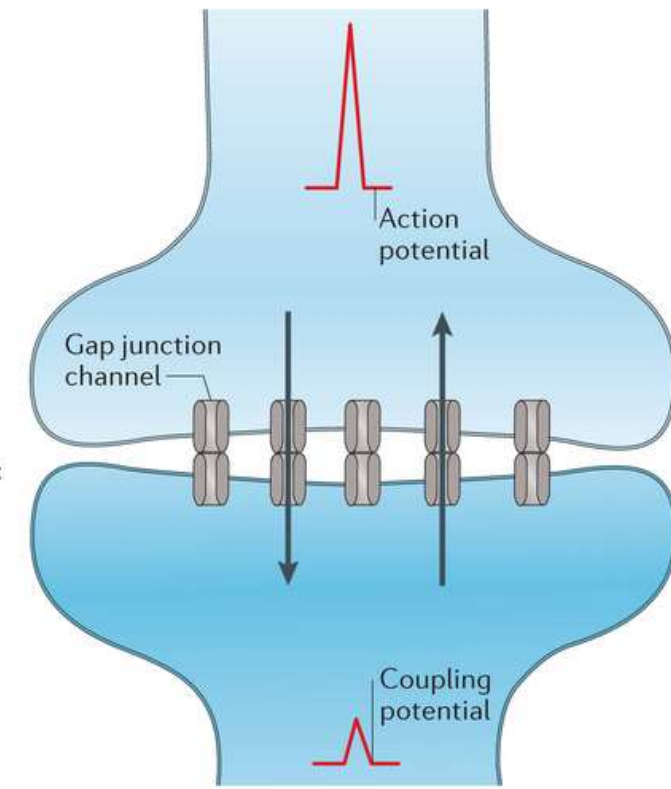


- la synapse électrique atteindrait des niveaux de complexité et de **plasticité** tout à fait comparable à la synapse chimique.

a Chemical synapse

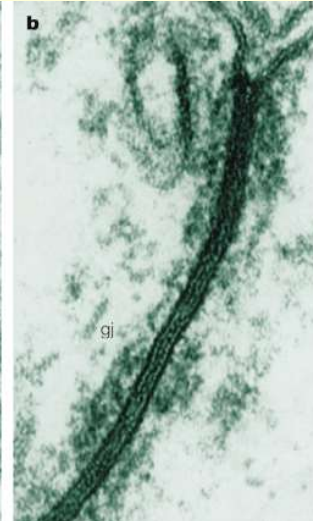
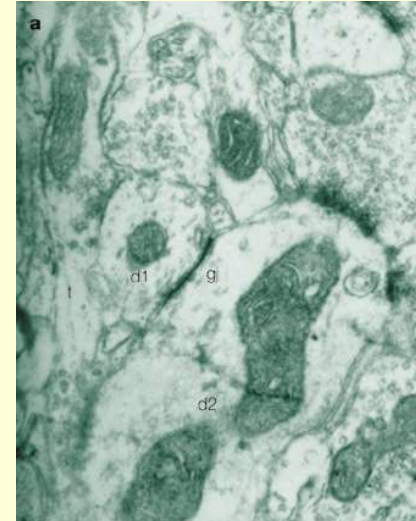


b Electrical synapse



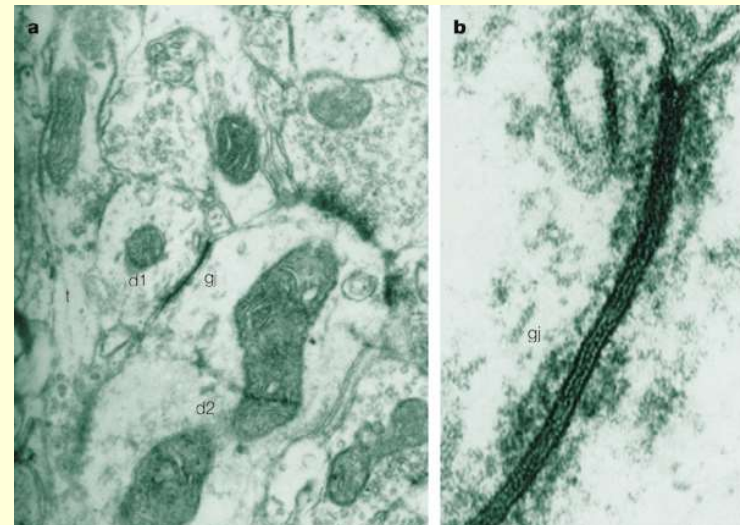
Nature Reviews | Neuroscience

- rappelons que ces connexions bidirectionnelles des synapses électriques étaient traditionnellement décrites comme rapides mais **rigides**, contrairement à la synapse chimique.



## Synchronisation :

Les synapses électriques permettraient d'abord à de nombreux neurones de **synchroniser leur activité** en répartissant les excitations reçues par un neurone à ses voisins connectés par des synapses électriques.

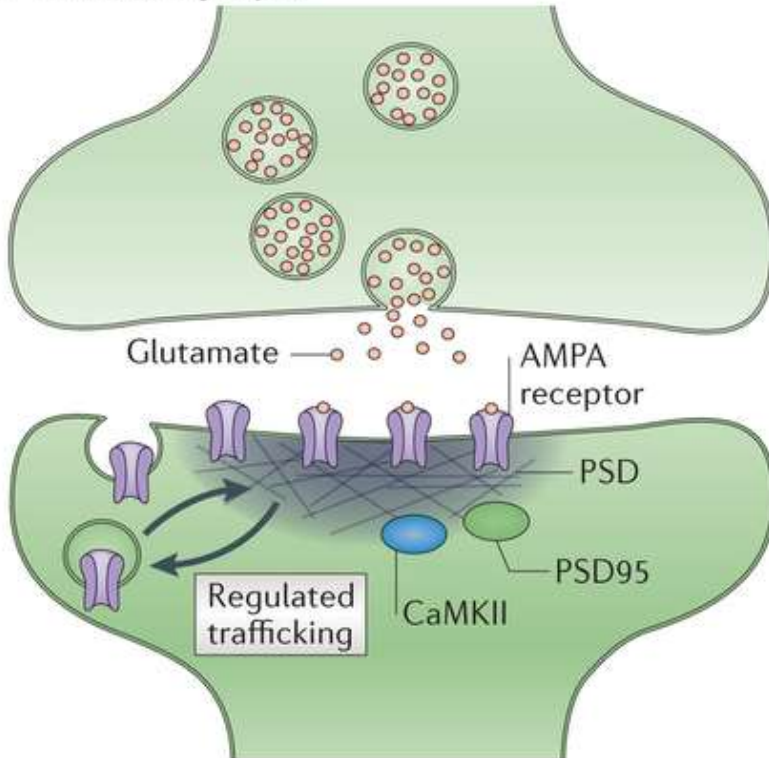




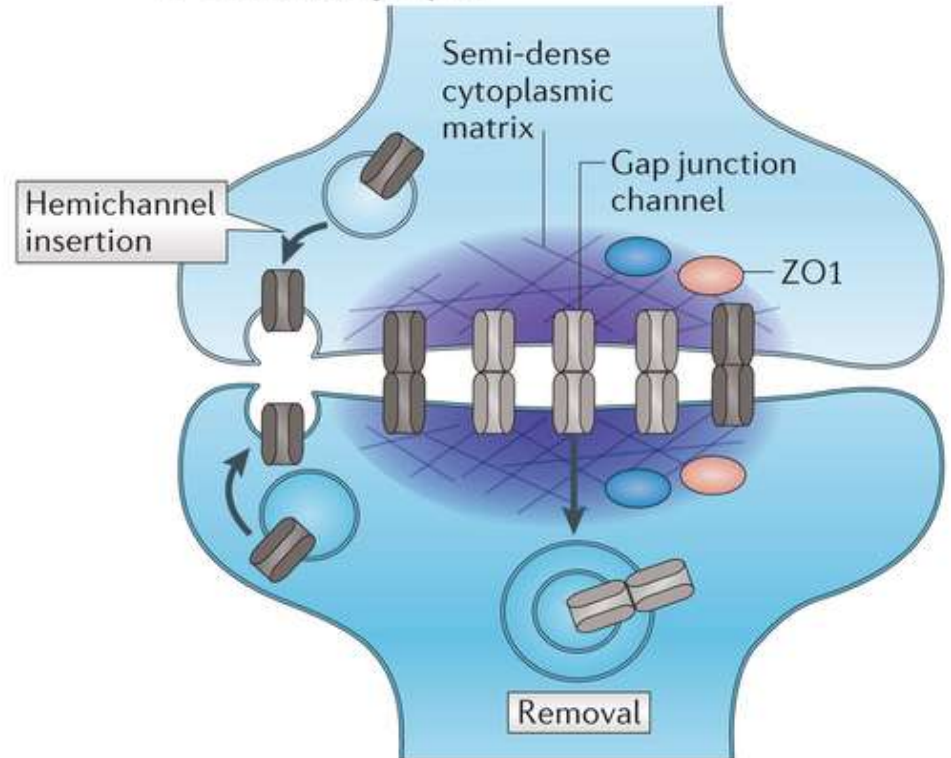
## Plasticité :

De la même manière qu'un récepteur à un neurotransmetteur peut être modifié pour renforcer une synapse chimique, les molécules de **connexine** qui forment les synapses électriques peuvent être altérées afin d'en augmenter ou d'en diminuer la porosité, donc la facilité avec laquelle les petites molécules chargées peuvent la traverser !

**a** Chemical synapse

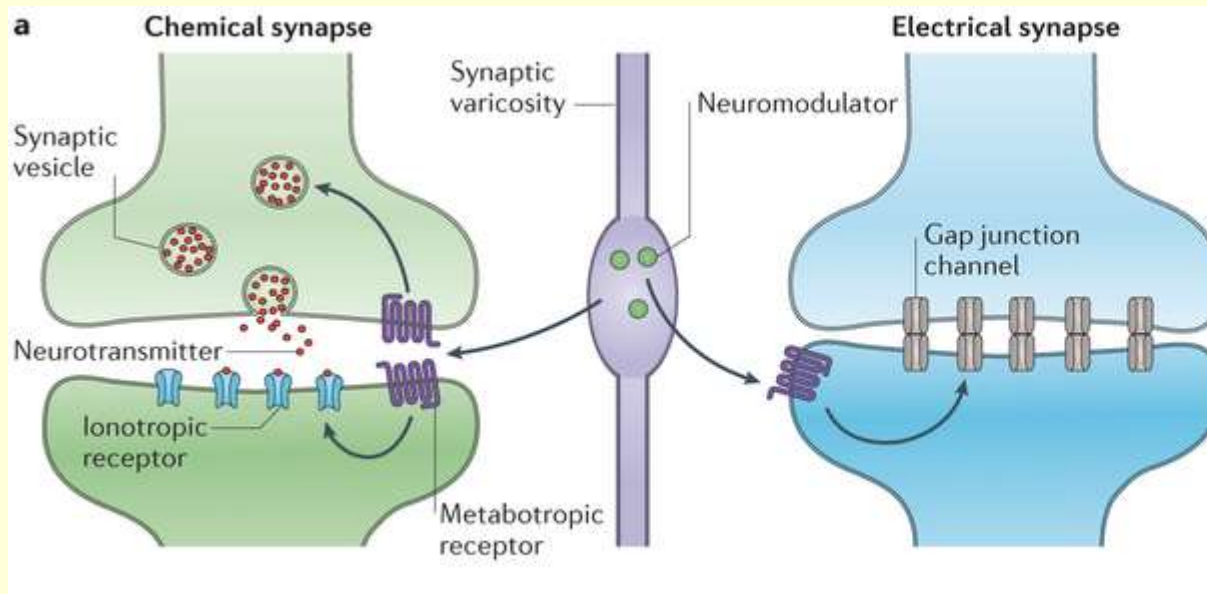


**b** Electrical synapse



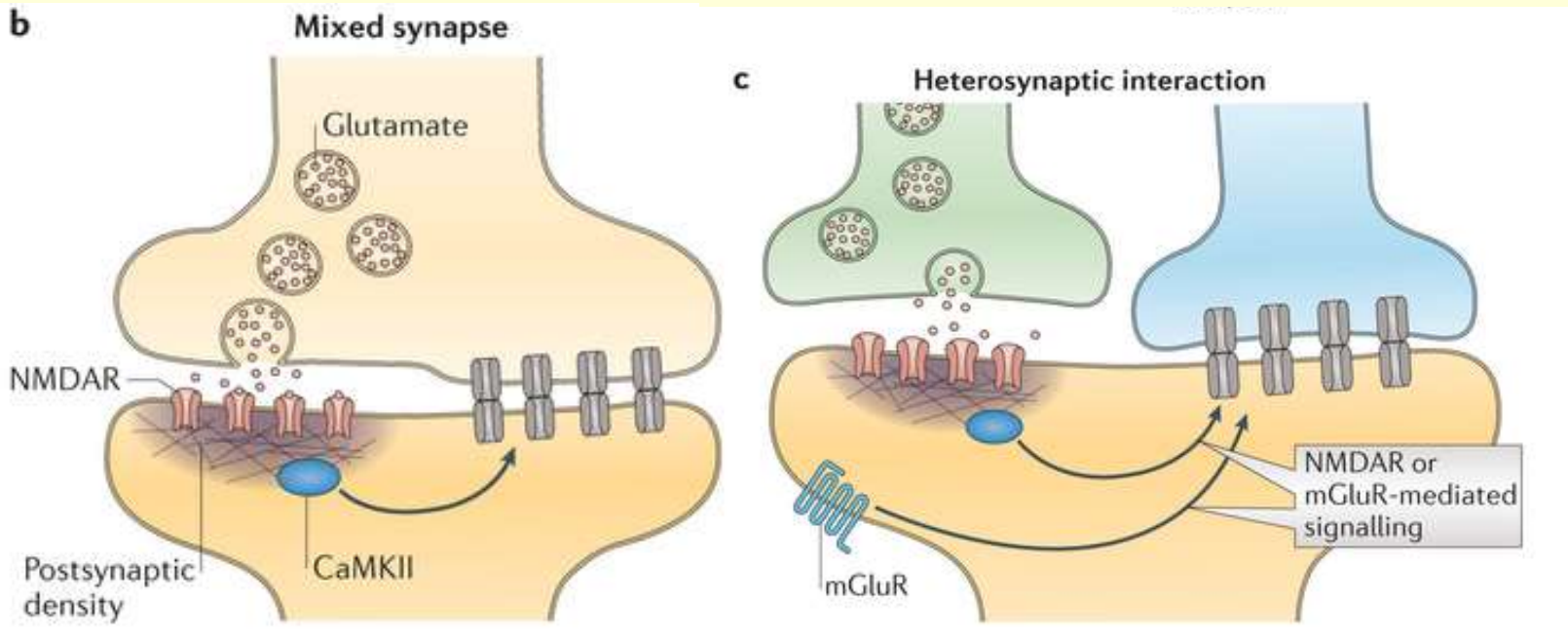
## Neuromodulation :

Il existe même des **substances modulatrices des connexines**, comme la **dopamine**, émise par d'autres neurones à une certaine distance de la synapse électrique et qui, en se fixant sur des récepteurs spécifiques, vont activer des réactions biochimiques capables de modifier l'efficacité de la synapse électrique.

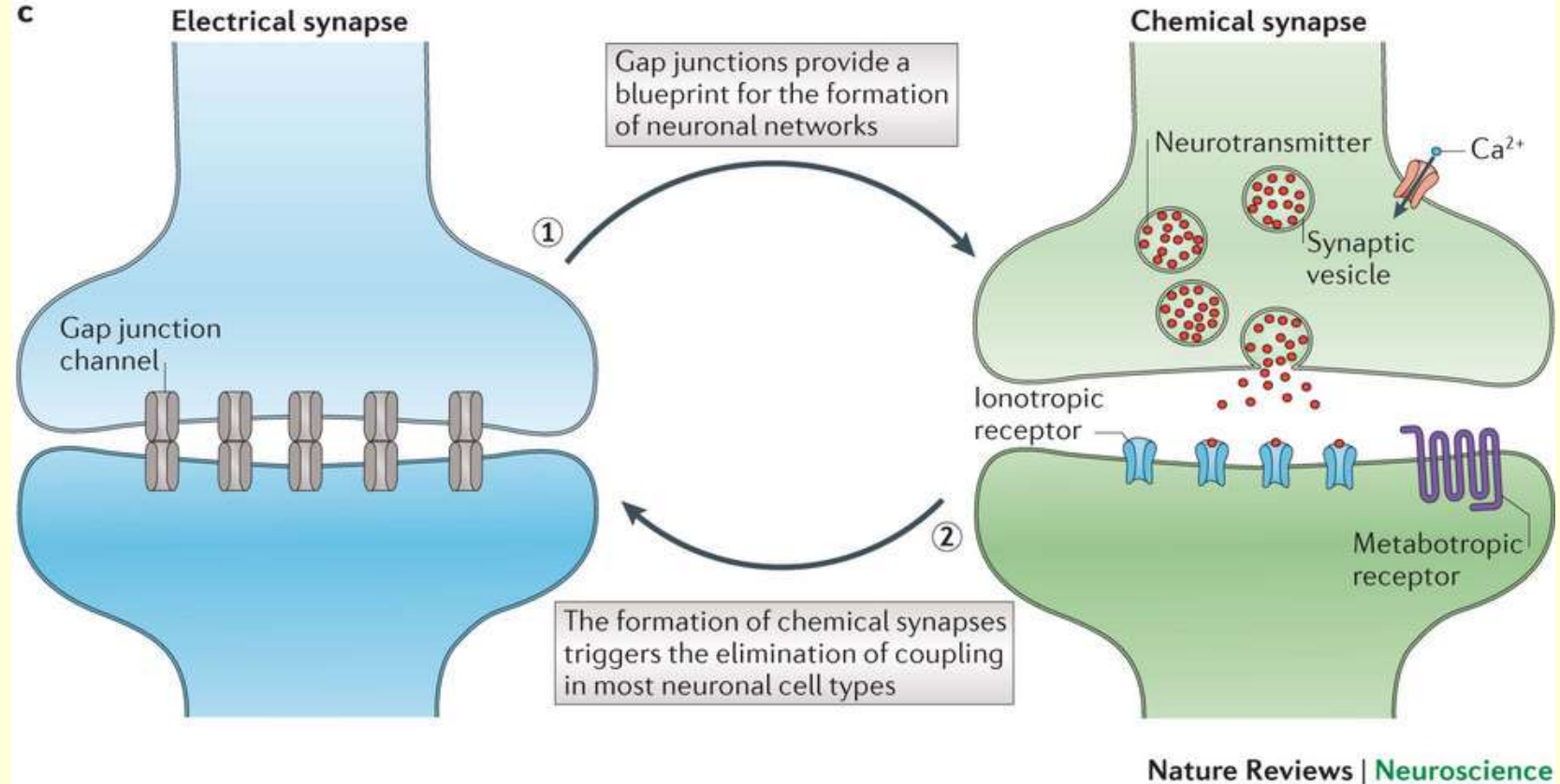


## Synapses mixtes :

Le tableau se complique encore avec la découverte de **synapses « mixtes »** avec une composante chimique et une composante électrique dans la même région synaptique.

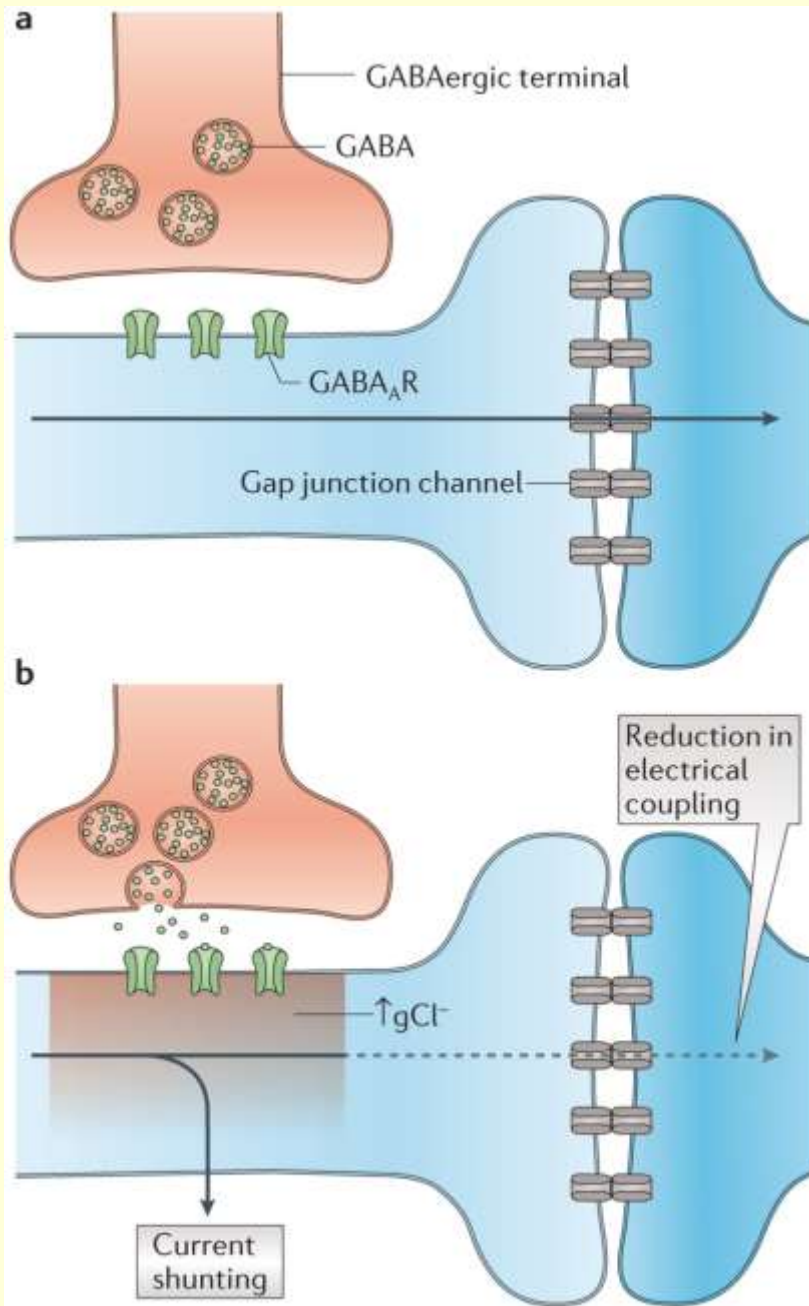


Ou mixtes  
hétérosynaptiques.



## Développement :

Sans parler de l'interaction entre les synapses électriques et chimique **durant le développement embryonnaire**, où l'activité électrique dans les réseaux de neurones due aux premières permet progressivement aux synapses chimiques de se mettre en place.



Et finalement, le dernier mais non le moindre...

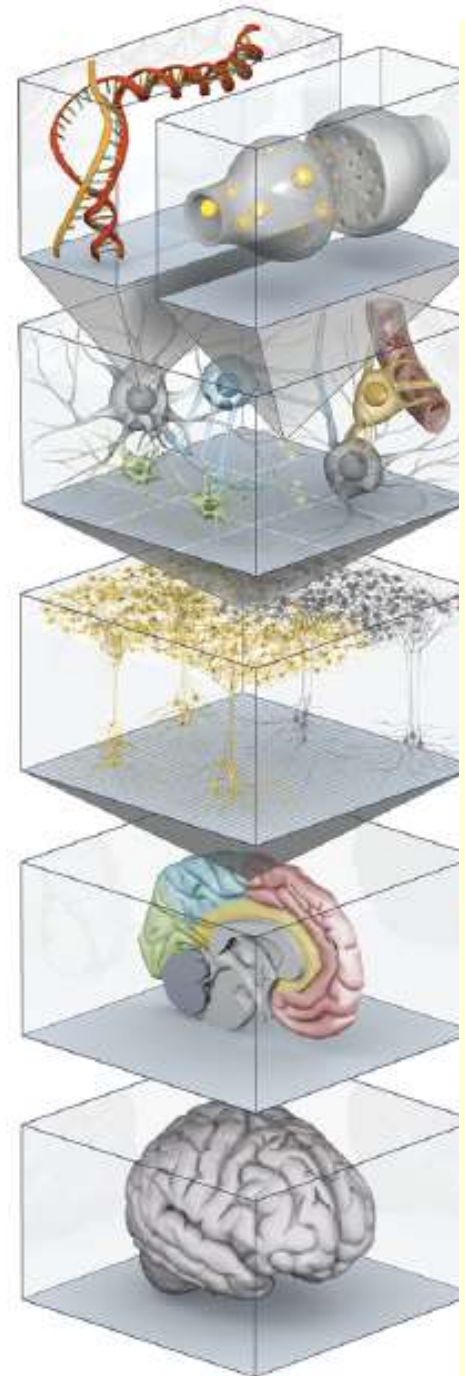
### Interneurone au GABA :

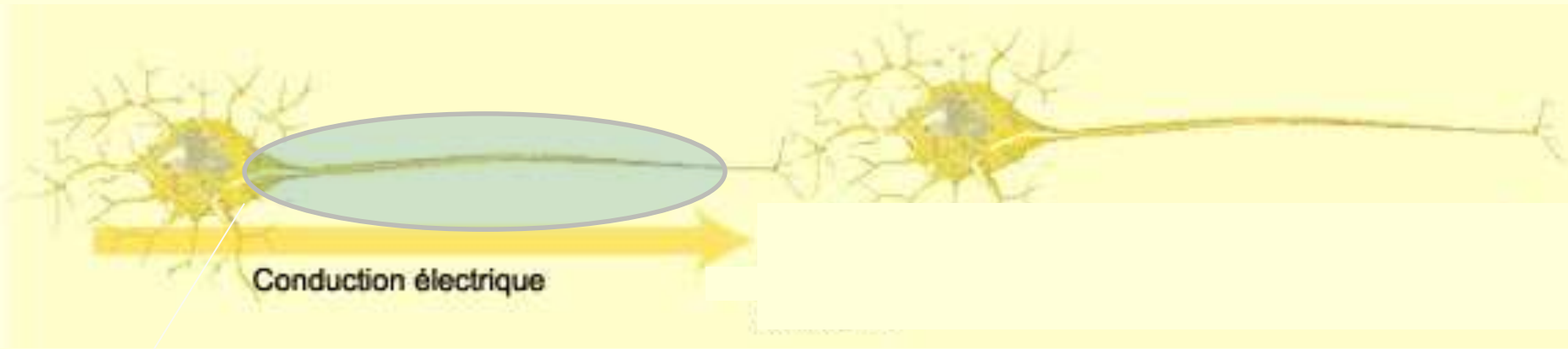
Le lien intime entre les interneurones au GABA et les synapses électrique où les premiers viennent court-circuiter l'influx nerveux afférent ce qui réduit l'efficacité du couplage électrique.

On en arrive en bout de ligne à une conception beaucoup moins tranchée entre les deux types de synapse **qui semblent indissociablement liées.**

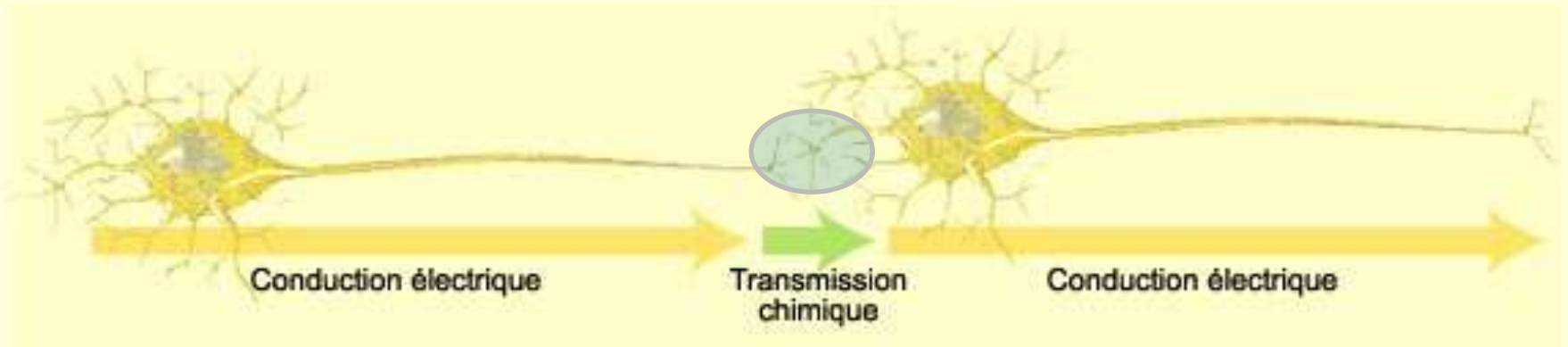
Cellules  
(neurones)

Très brève transition... → **Circuits de neurones**

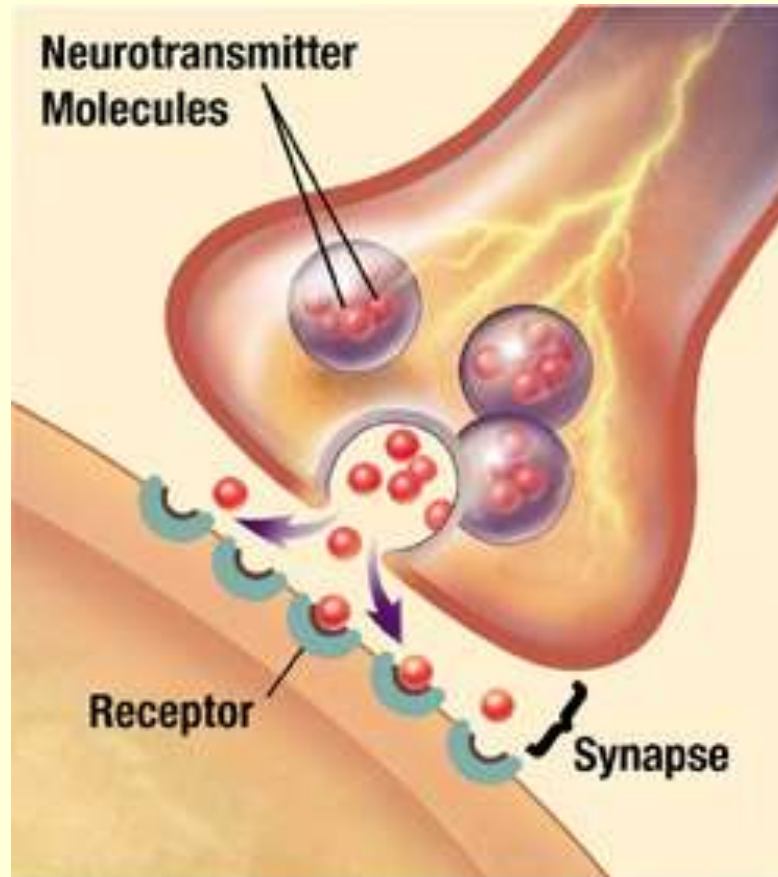




- on a donc un influx nerveux qui se propage le long de l'axone.



Au niveau de la **synapse**

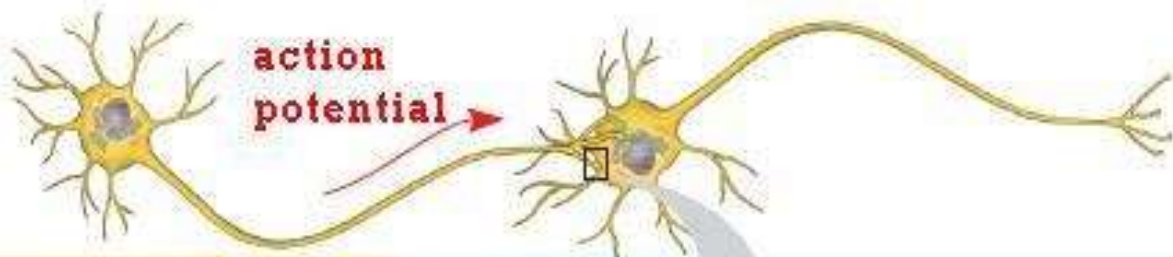




Presynaptic cell

Postsynaptic cell

action potential



Synaptic vesicles containing neurotransmitter

Presynaptic membrane

Voltage-gated  $\text{Ca}^{2+}$  channel

1  $\text{Ca}^{2+}$

Synaptic cleft

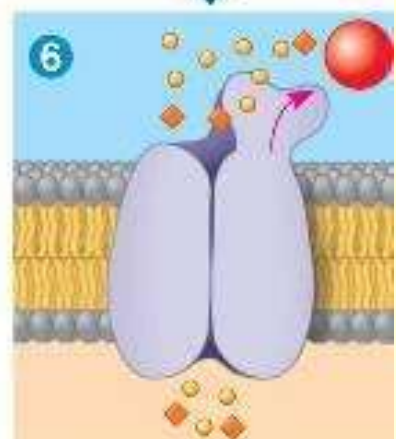
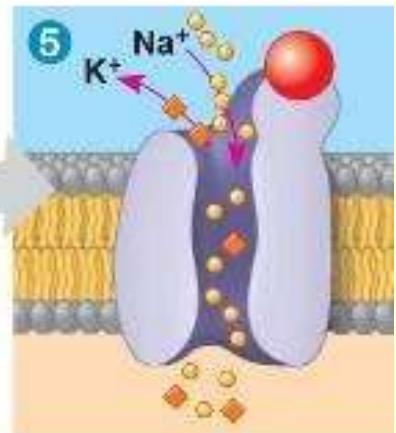
2

3

4

Ligand-gated ion channels

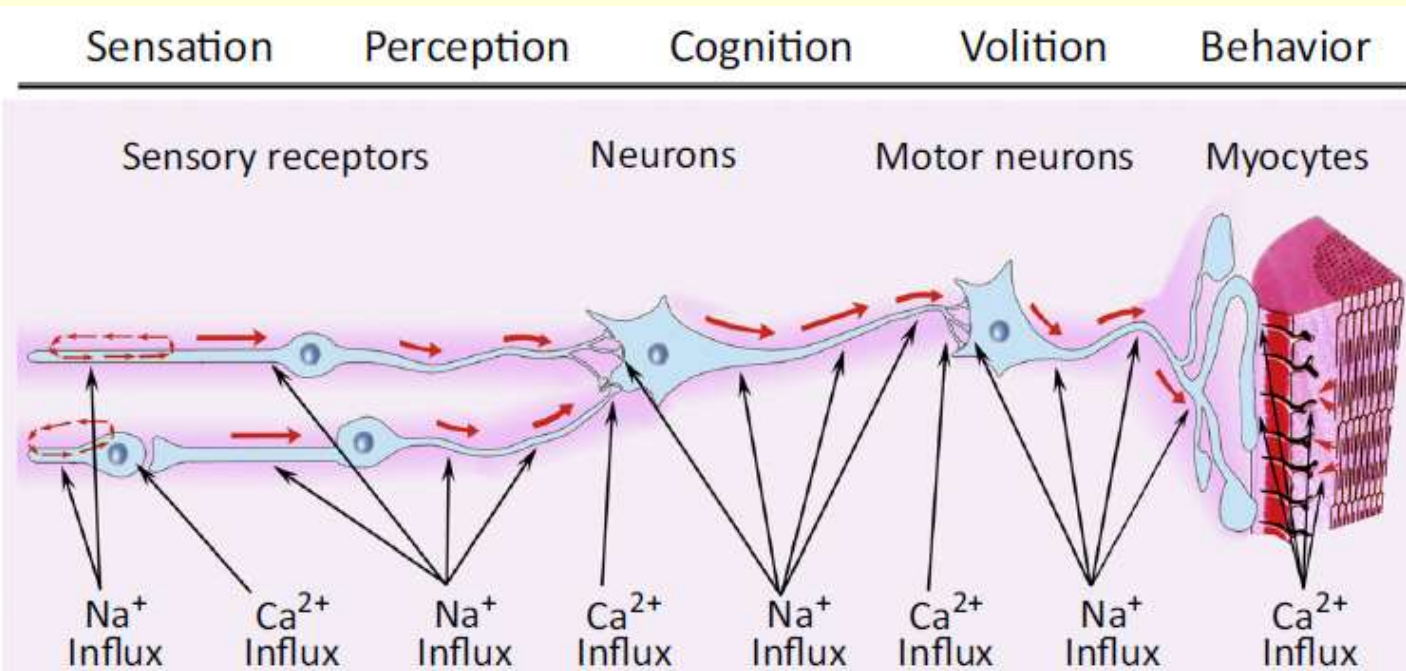
Postsynaptic membrane



## Observation intéressante :

N.D. Cook, G.B. Carvalho et A. Damasio se sont demandé quel serait **l'événement premier** au niveau cellulaire à partir duquel se construirait toute « **sentience** » subséquente dans la psychologie animale.

Selon eux, cette perturbation première qui alerte en quelque sorte la cellule qu'il se passe « quelque chose » qui la concerne dans l'environnement seraient les **ions positifs**, essentiellement de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) qui entrent massivement dans la cellule...



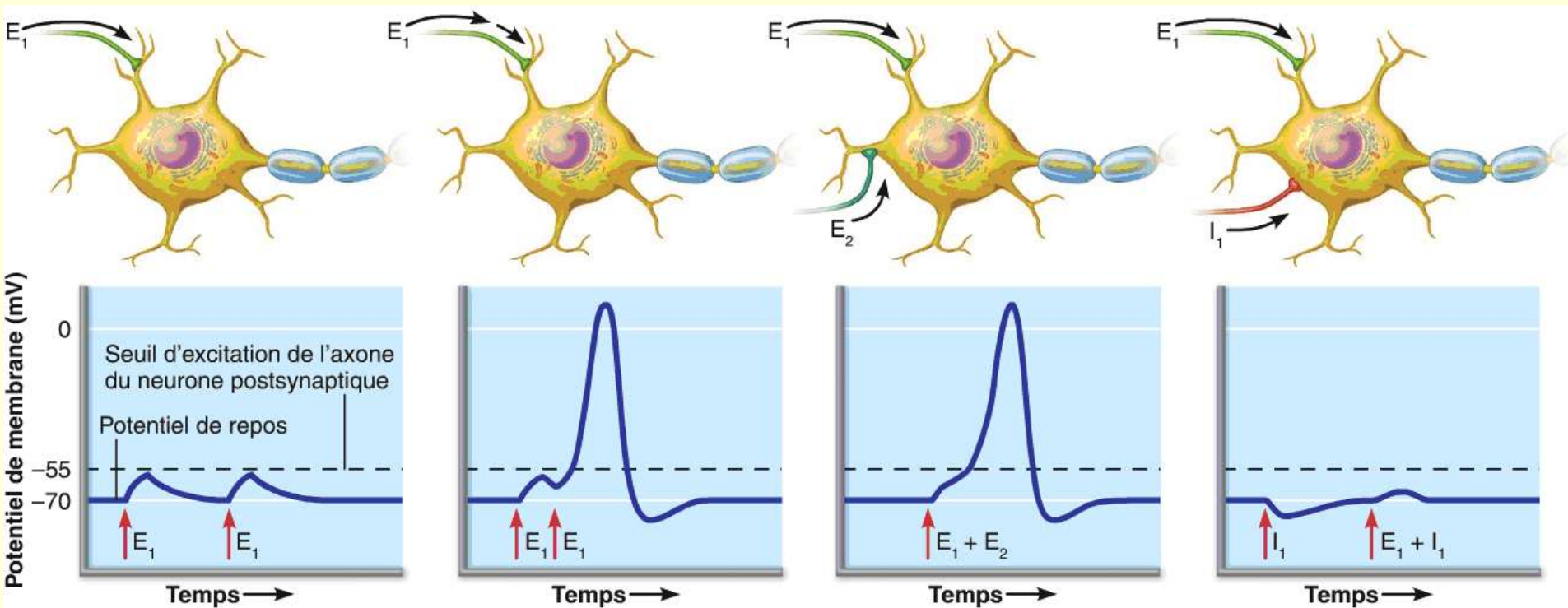
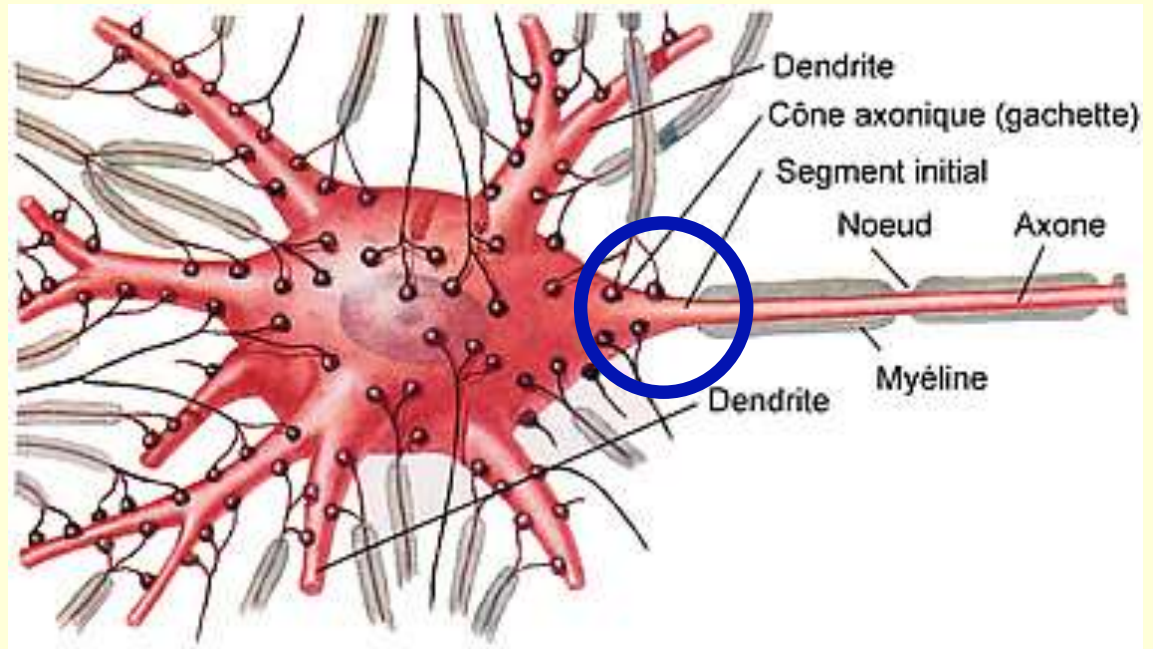
## From membrane excitability to metazoan psychology

<http://www.cell.com/trends/neurosciences/abstract/S0166-2236%2814%2900128-3?cc=y>

Trends in  
Neuroscience,

December 2014

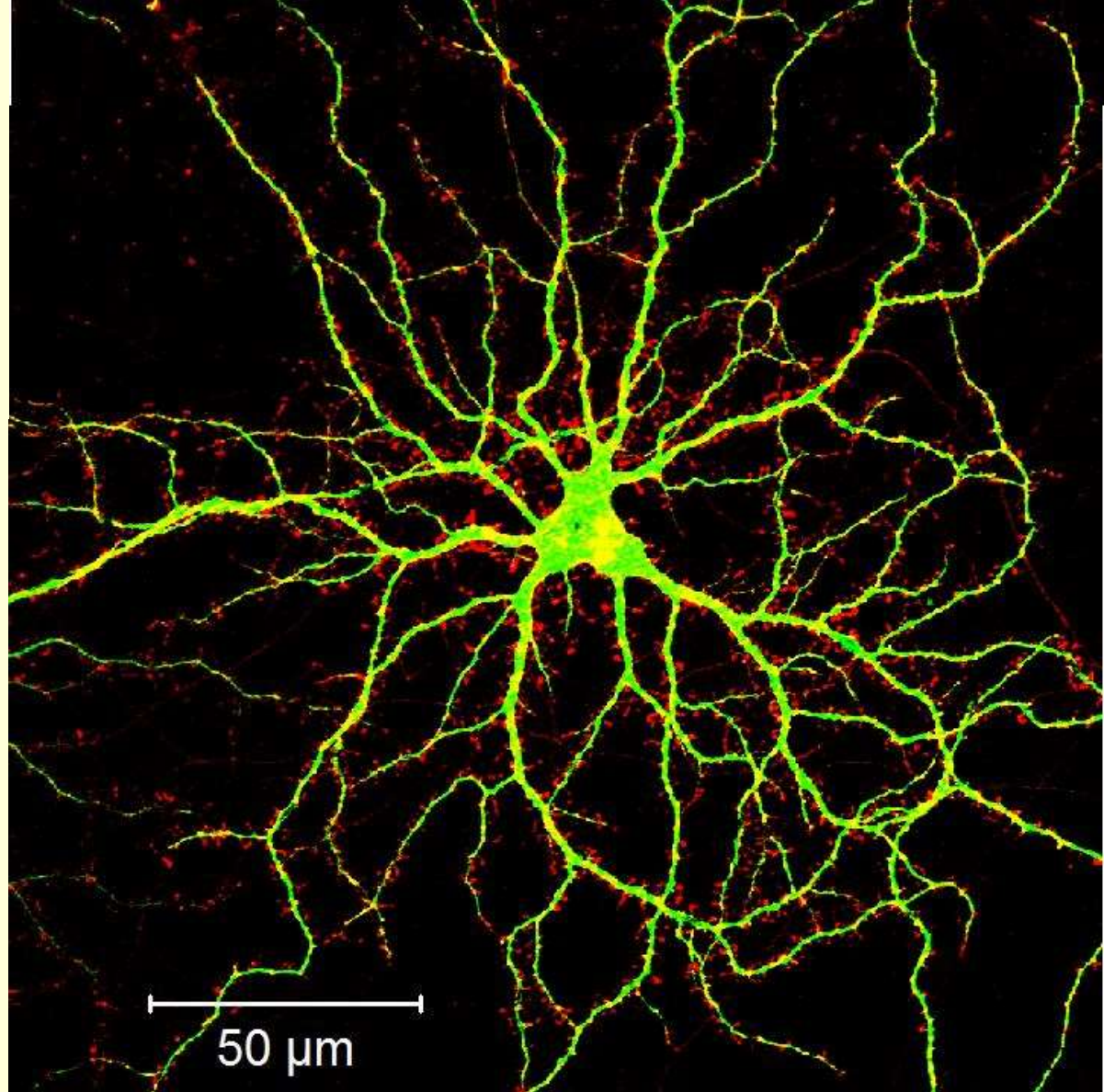
Chaque neurone est un « **intégrateur** »



« Le fait qu'une cellule vivante se soit adaptée en une structure capable de recevoir et **d'intégrer** des données,

de **prendre des décisions** fondées sur ces données, et **d'envoyer des signaux** aux autres cellules en fonction du résultat de cette intégration

est un exploit remarquable de **l'évolution.** »

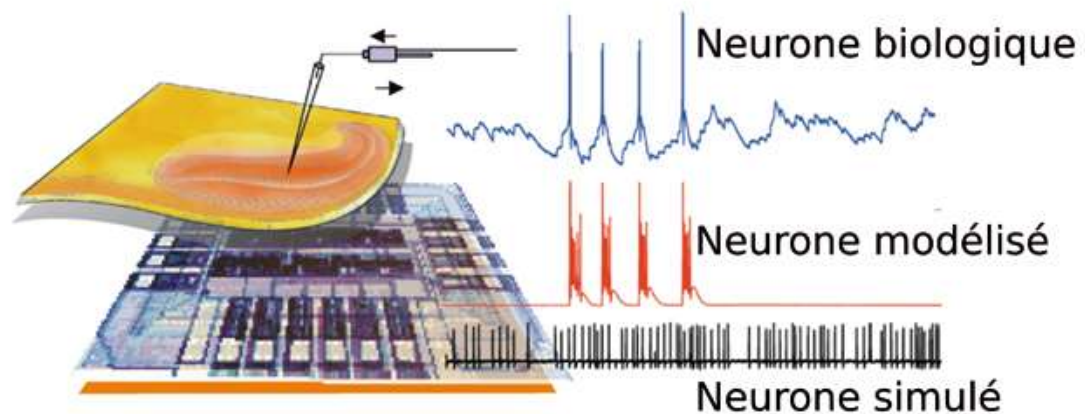


<http://m.cacm.acm.org/magazines/2011/8/114944-cognitive-computing/fulltext>

Dharmendra S. Modha, Rajagopal Ananthanarayanan, Steven K. Esser, Anthony Ndirango, Anthony J. Sherbondy, Raghavendra Singh, Communications of the ACM, Vol. 54 No. 8, Pages 62-71 (2011)

## Les « neurosciences computationnelles »

regroupent des approches **mathématiques**, **physiques** et **informatiques** appliquées à la compréhension du **système nerveux**.



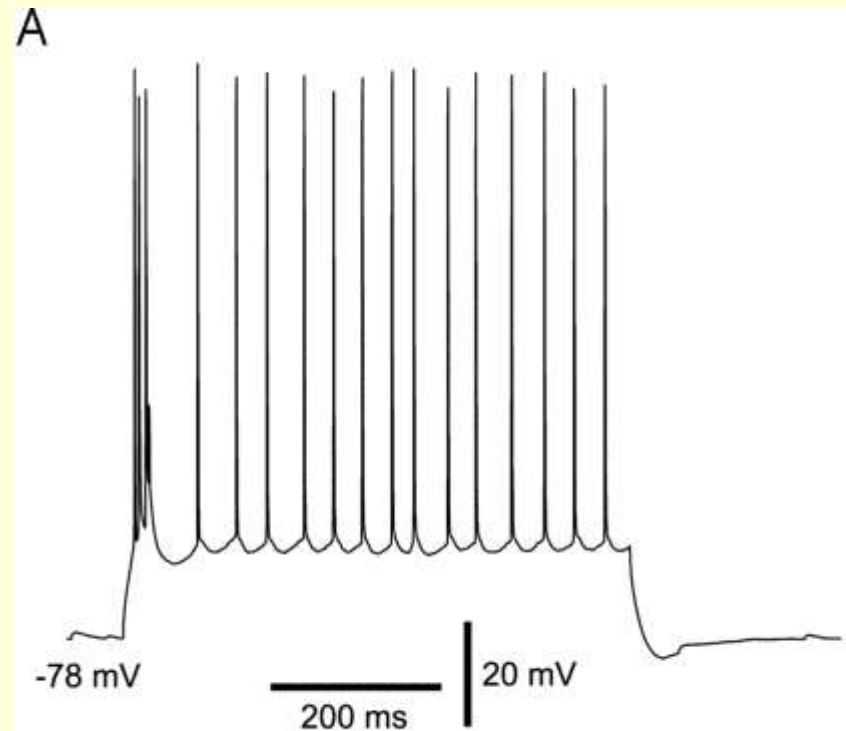
## Quel type de computation dans le cerveau ?

La réponse traditionnelle depuis les années 1960 était que le système nerveux effectue des computation **digitales** comme les ordinateurs (potentiel d'action = phénomène tout ou rien...).

## Mais !

Les “véhicules computationnels” primaires du système nerveux, **les trains de potentiels d'action**, sont irrémédiablement graduels dans leur propriétés fonctionnelles. (bien qu'un seul potentiel d'action est un phénomène “tout ou rien”, donc binaire)

Autrement dit, la pertinence fonctionnelle du signal neuronal dépend d'aspects non digitaux du signal comme le taux de **décharge des potentiels d'action** et la **synchronisation de l'activité neuronale**.



## Mais !

Les “véhicules computationnels” primaires du système nerveux, **les trains de potentiels d'action**, sont irrémédiablement graduels dans leur propriétés fonctionnelles. (bien qu'un seul potentiel d'action est un phénomène “tout ou rien”, donc binaire)

Autrement dit, la pertinence fonctionnelle du signal neuronal dépend d'aspects non digitaux du signal comme le taux de **décharge des potentiels d'action** et la **synchronisation de l'activité neuronale**.

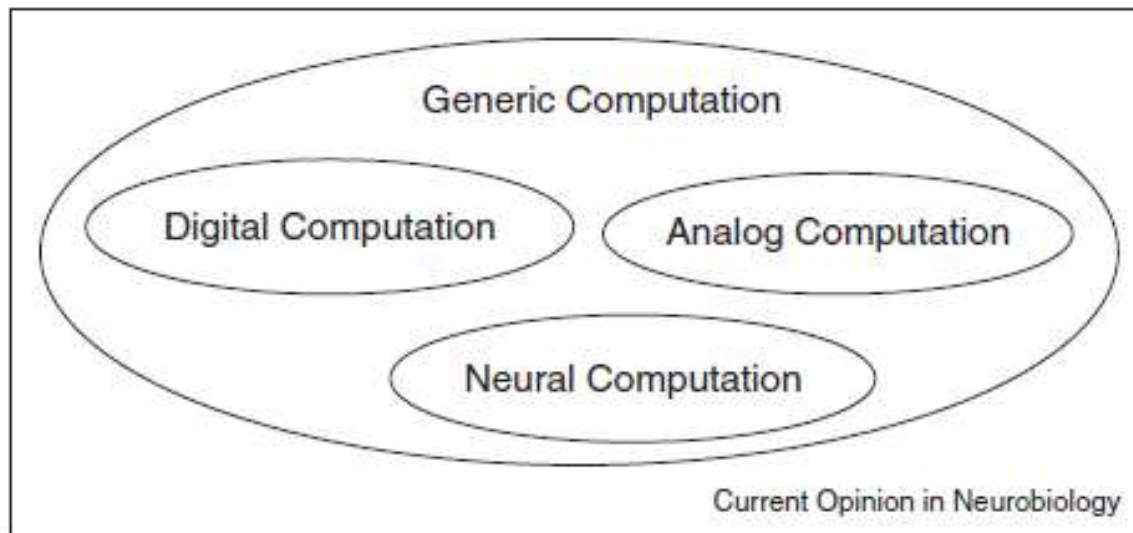
Par conséquent, un signal neuronal typique n'est **pas une suite de “0” ou de “1”** sous quelque forme que ce soit et n'est donc pas une computation digitale.



**Cela ne veut pas dire que la computation neuronale est de type analogique, i.e. qui utilise un signal continu.**

Car, comme on l'a mentionné, le signal nerveux est fait d'unités fonctionnelles discontinues que sont les potentiels d'action.

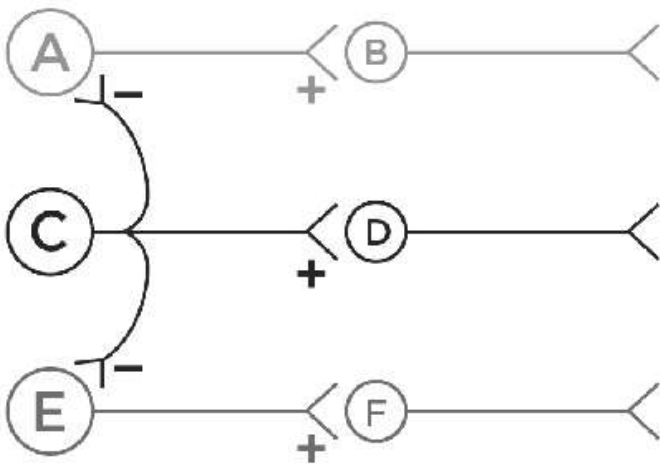
Par conséquent, les computations neuronales semblent être ni digitales, ni analogues, **mais bien un genre distinct de computation.**



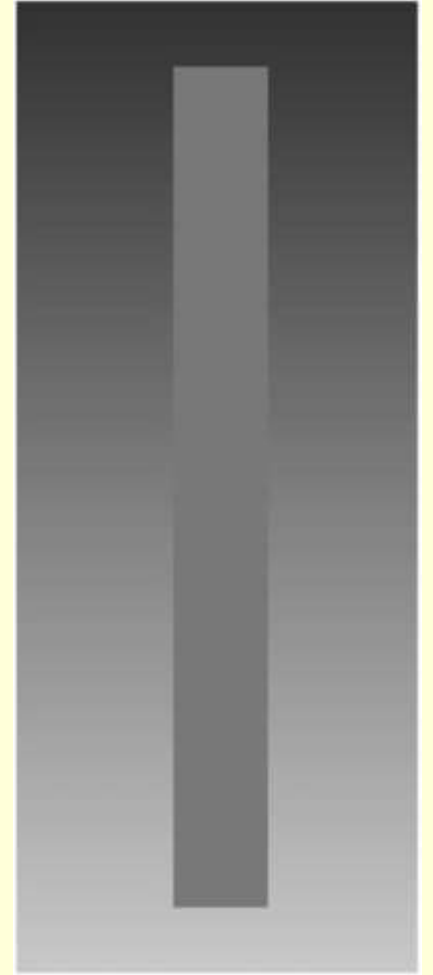
Some types of generic computation. Neural computation may sometimes be either digital or analog in character, but, in the general case, neural computation appears to be a distinct type of computation.

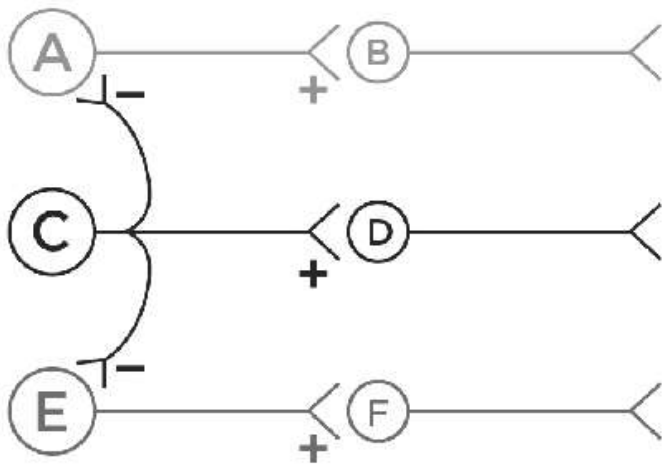
Piccinini, G., Shagrir, O. (2014). **Foundations of computational neuroscience.**

*Current Opinion in Neurobiology*, 25:25–30.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959438813002043>

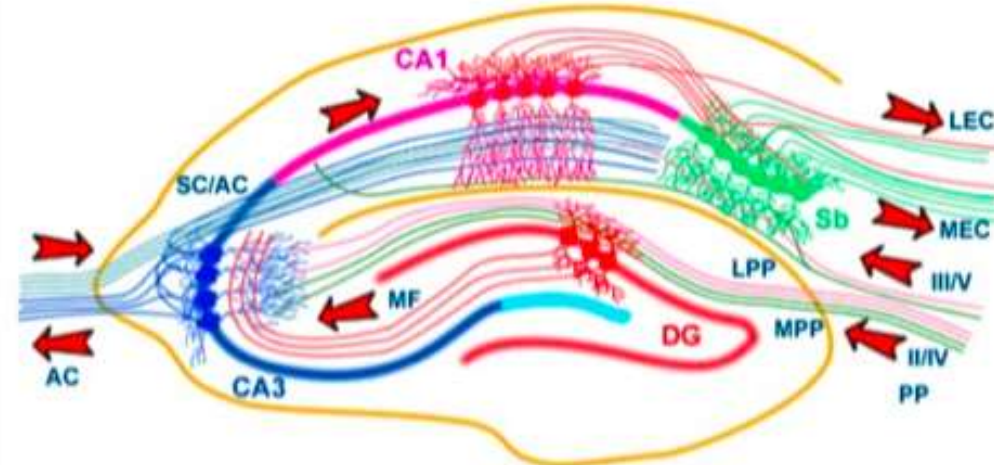


On va passer de quelques neurones...





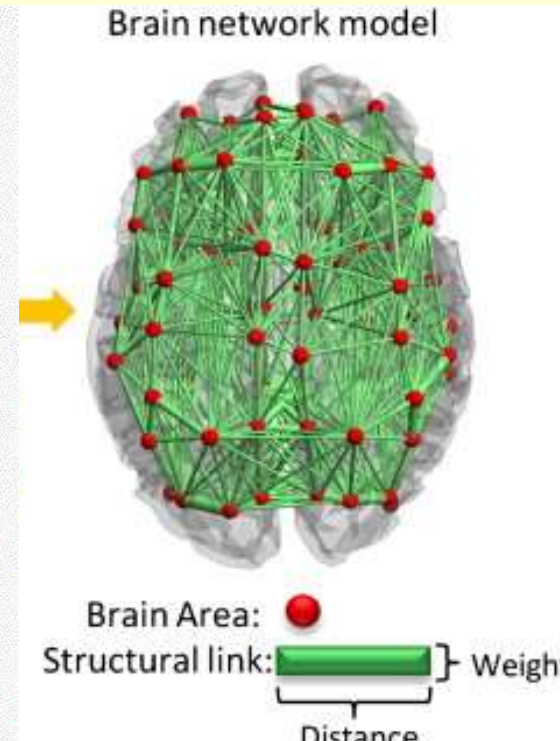
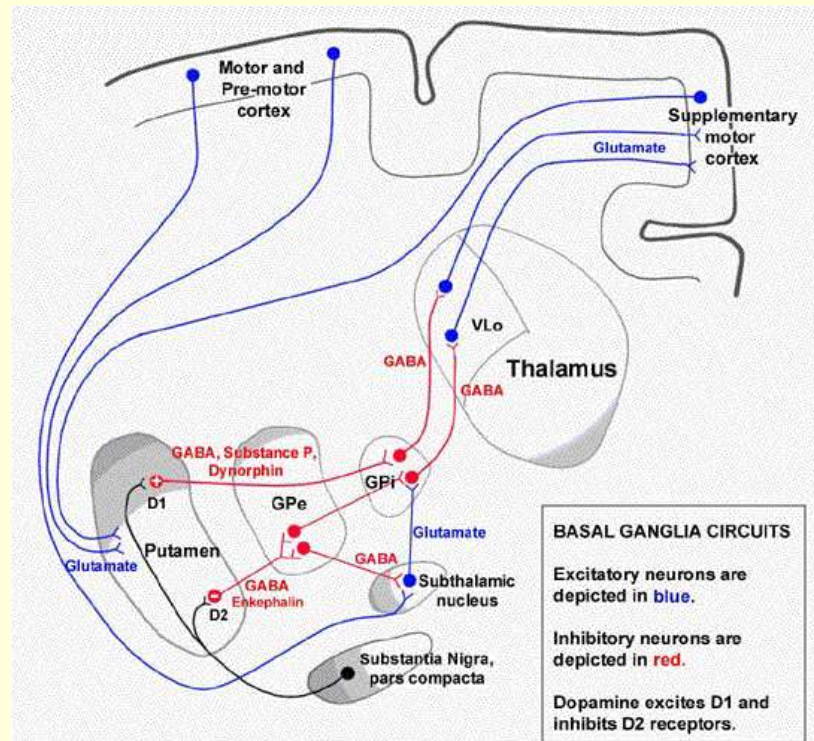
On va passer de quelques neurones...



...à des circuits de millions de neurones dans des structures (comme l'hippocampe)

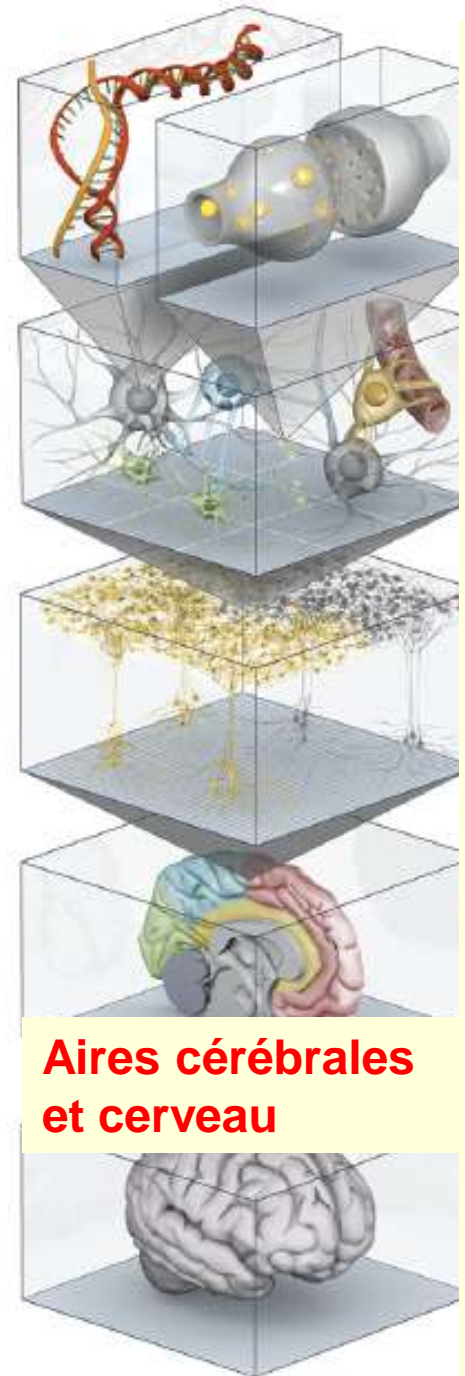
Puis à des structures cérébrales qui vont se connecter en réseaux locaux...

... mais aussi à l'échelle du cerveau entier !



-Cellules  
(neurones)

Circuits de  
neurones



**Aires cérébrales  
et cerveau**



L'objectif de cette section est de passer d'une

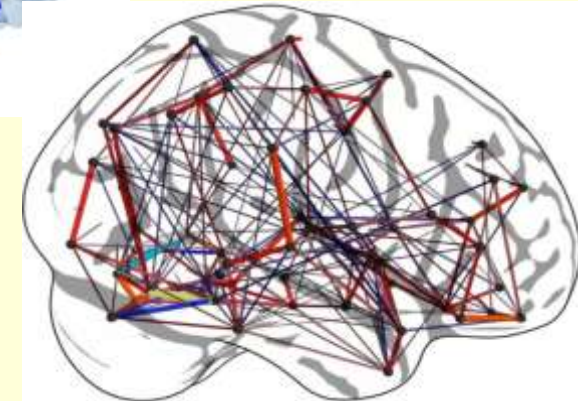
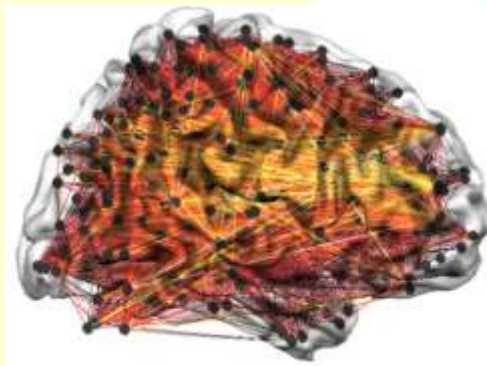
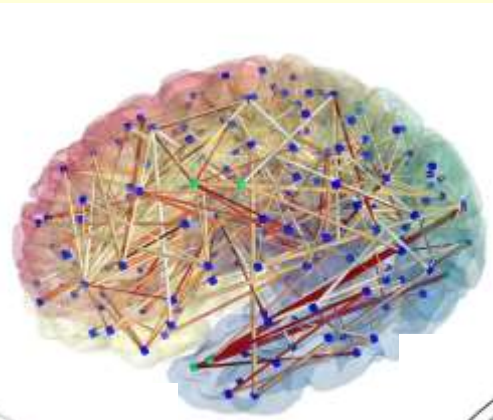
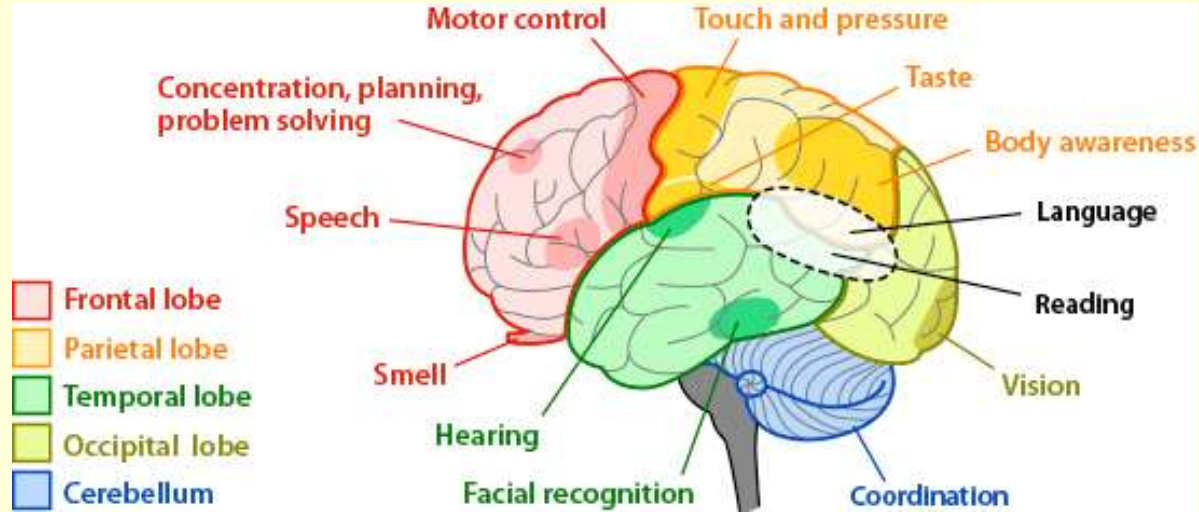
conception traditionnelle du cerveau

i.e. un objet (relativement) stable et régulier fait de composantes manifestant une relation structure-fonction (relativement) simple;

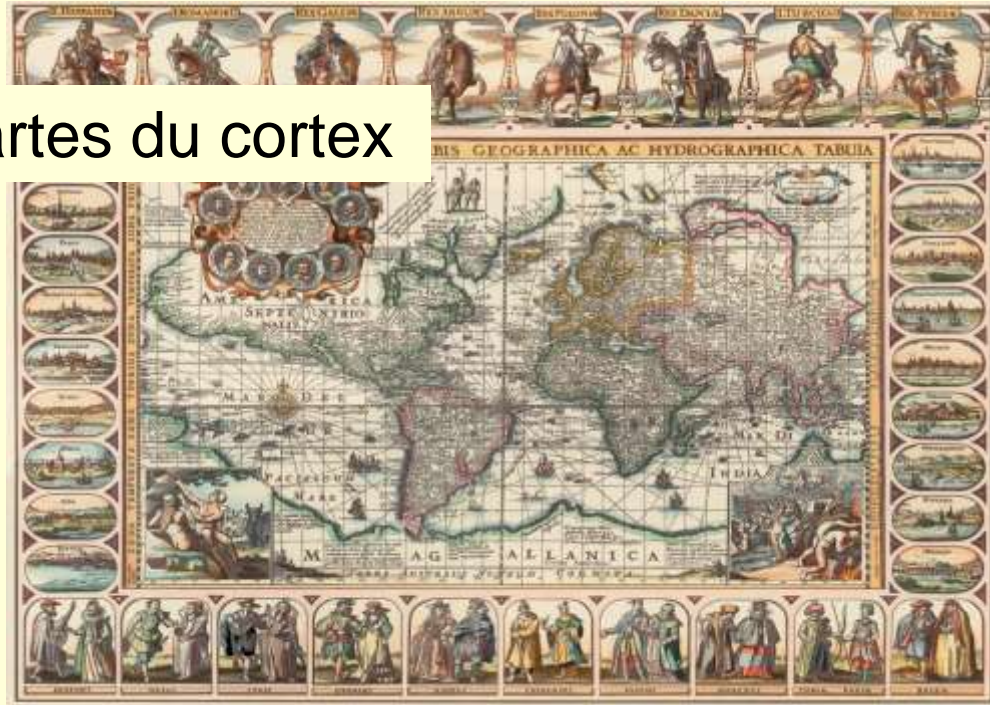
à une

nouvelle conception du cerveau

Un réseau (presque) infiniment plastique manifestant une relation structure-fonction complexe (plusieurs-à-plusieurs)

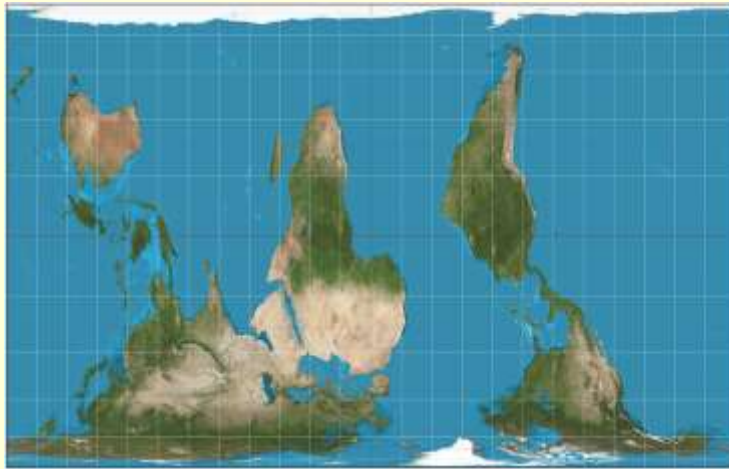


# Les premières cartes du cortex



Les cartes sont des outils utiles pour simplifier la complexité du réel en des représentations pratiques. Mais elles ne sont pas neutres.

Elles reflètent souvent des valeurs sociales ou des choix politiques, comme le montre ces autres façons peu utilisées pour représenter le monde.



(selon la population par pays)

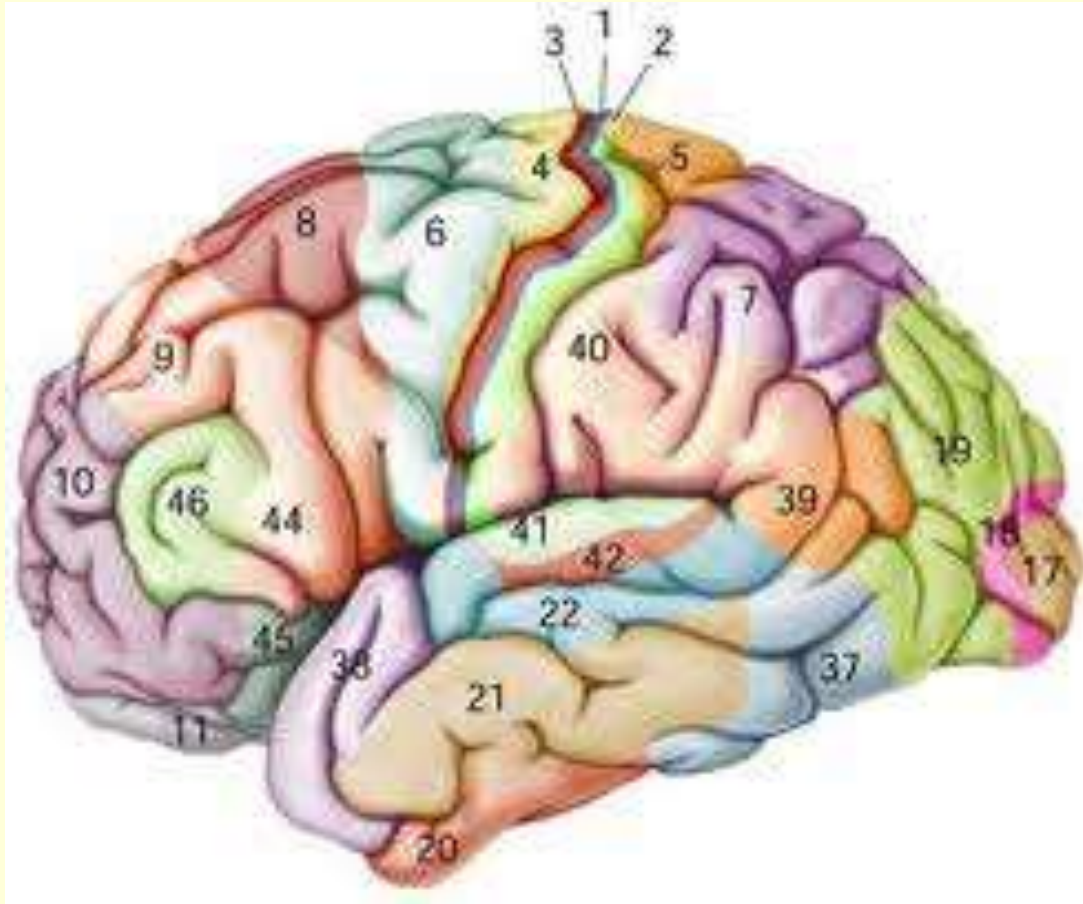


De la même façon, on peut tracer des cartes cérébrales à partir d'un ou de plusieurs aspects du cerveau (que l'on ne peut que survoler ici...) :

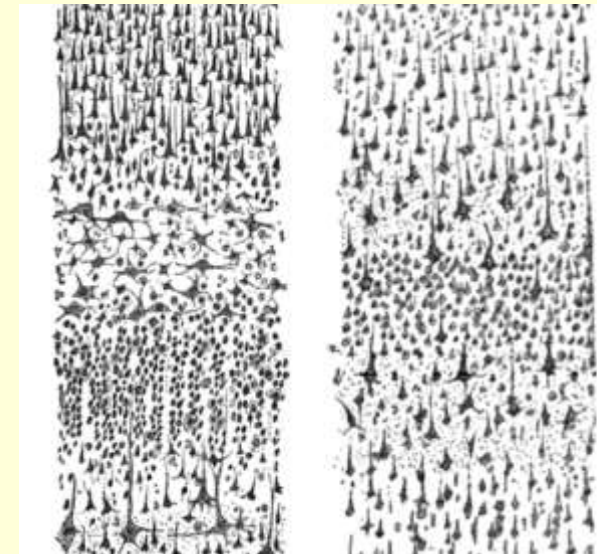
- **Cytoarchitecture** (types de neurones et leur répartition spatiale)



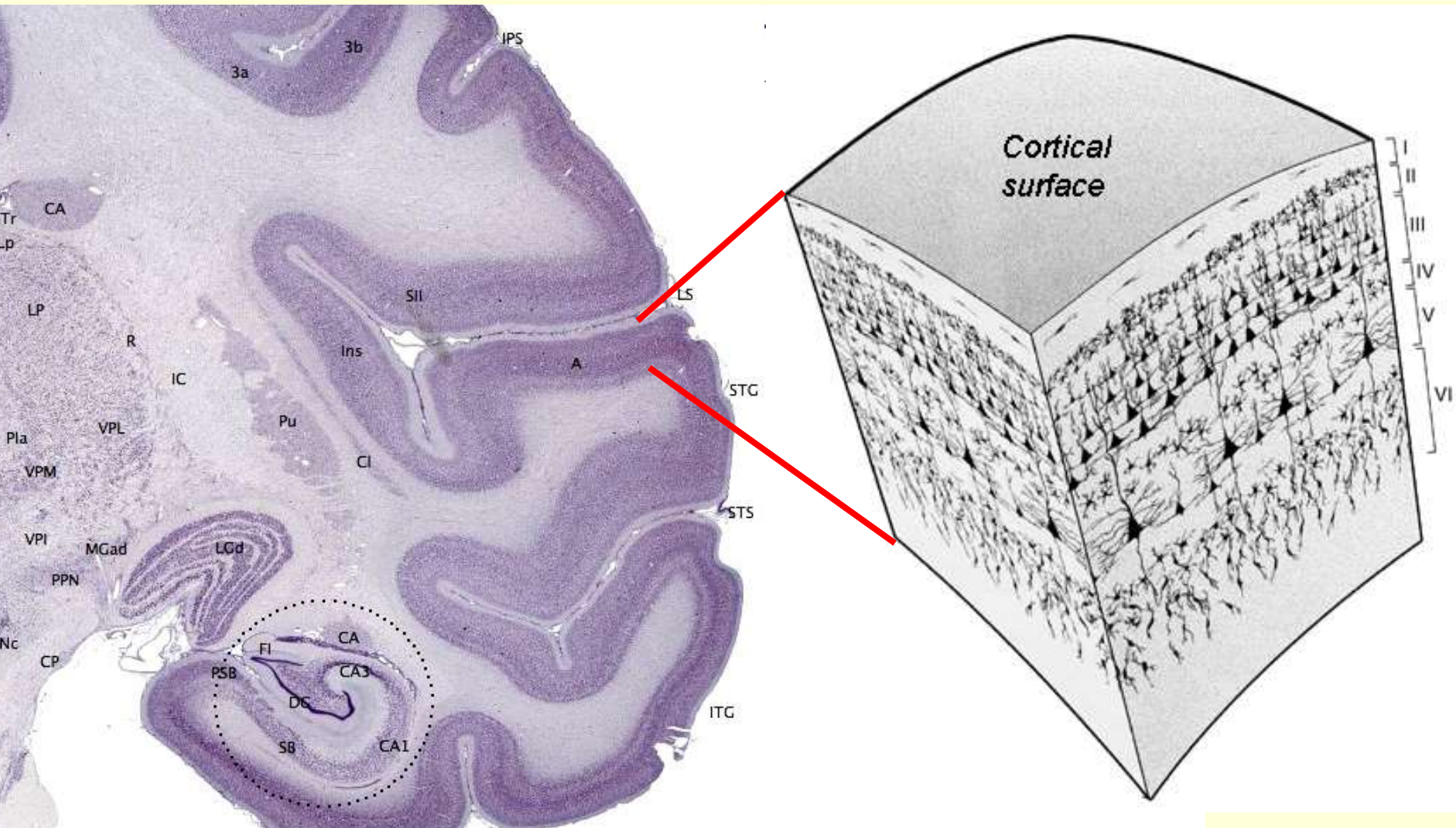
## Les premières cartes cérébrales comme celle de Brodmann étaient basées sur la cytoarchitecture



c'est-à-dire la **densité**,  
la **taille** des neurones et  
le **nombre de couches**  
observées sur des  
coupes histologiques.

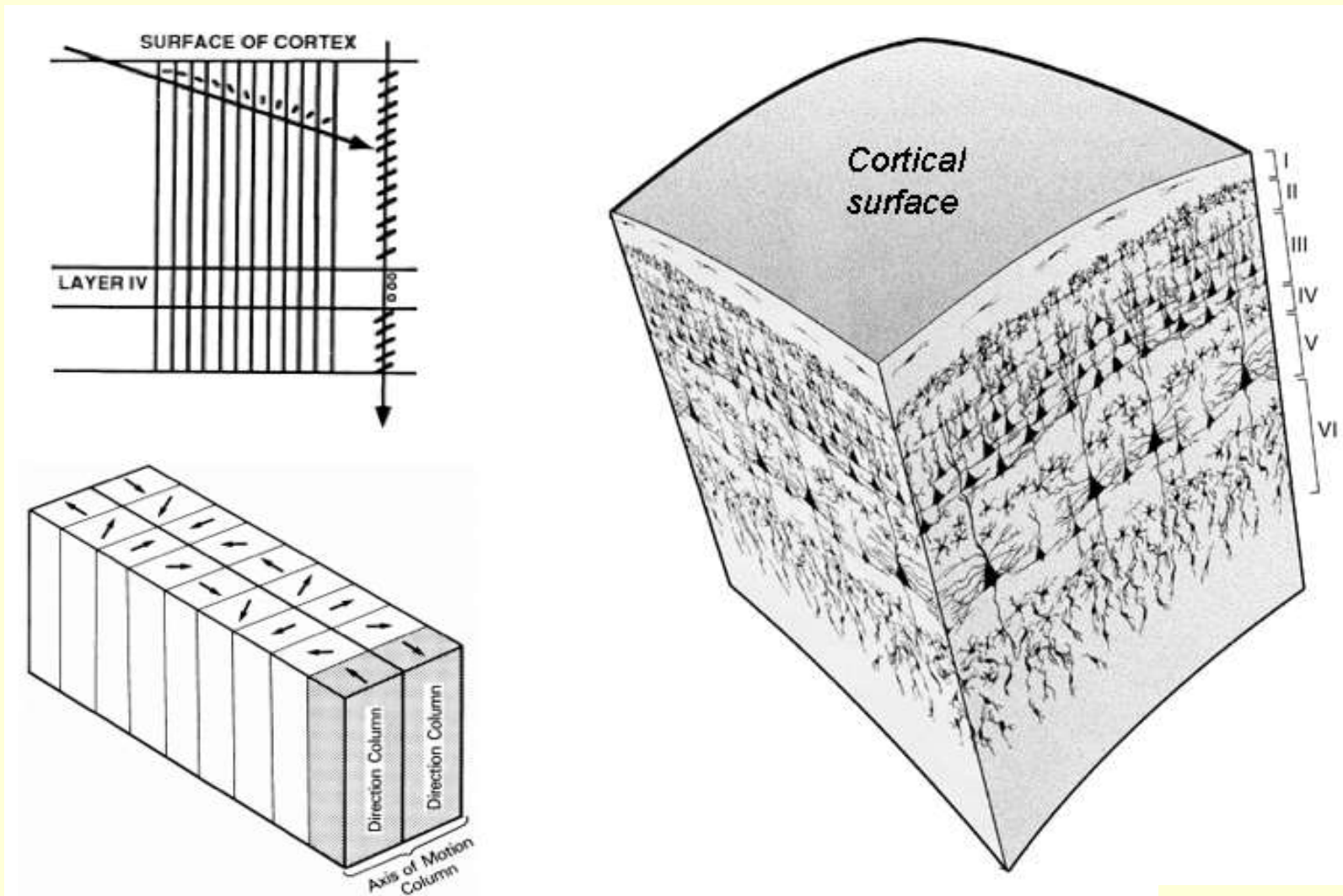


Car il y a une organisation en **couches** dans le cortex...



...il y a également une organisation **en colonne** !

Les neurones ont des connexions préférentielles **à la verticale**.

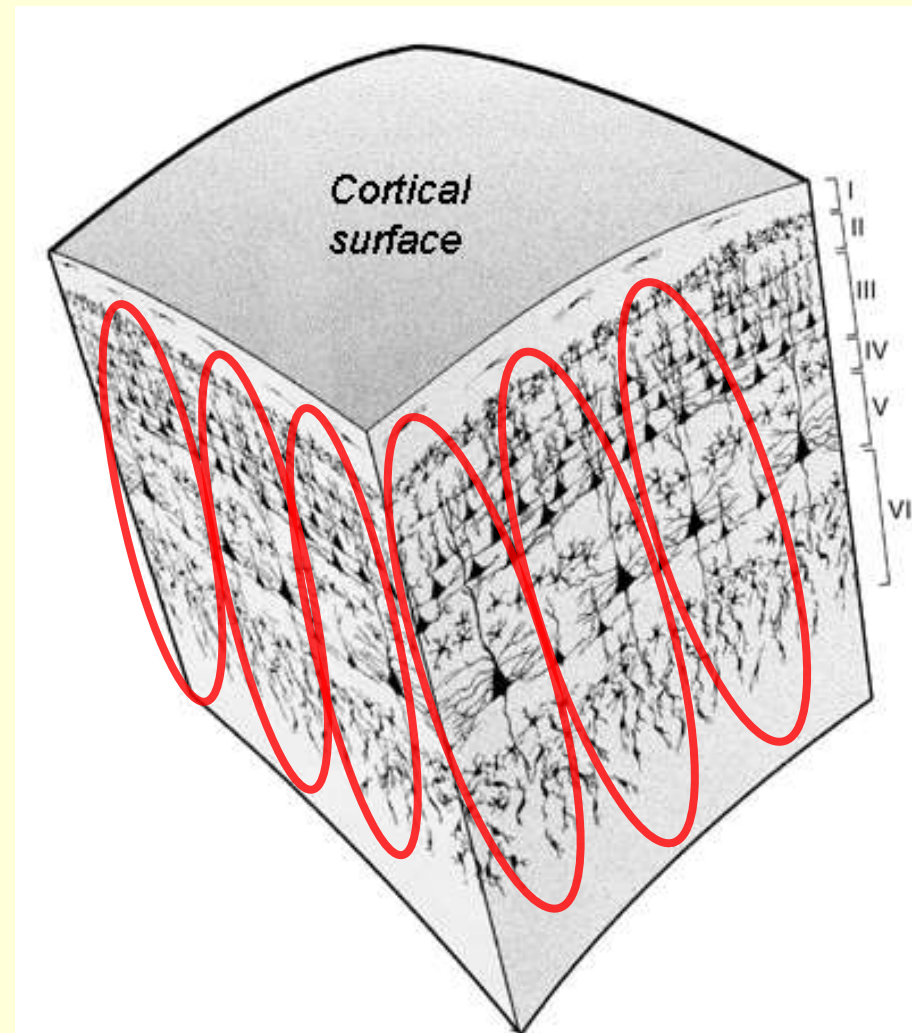


...il y a également une organisation **en colonne** !

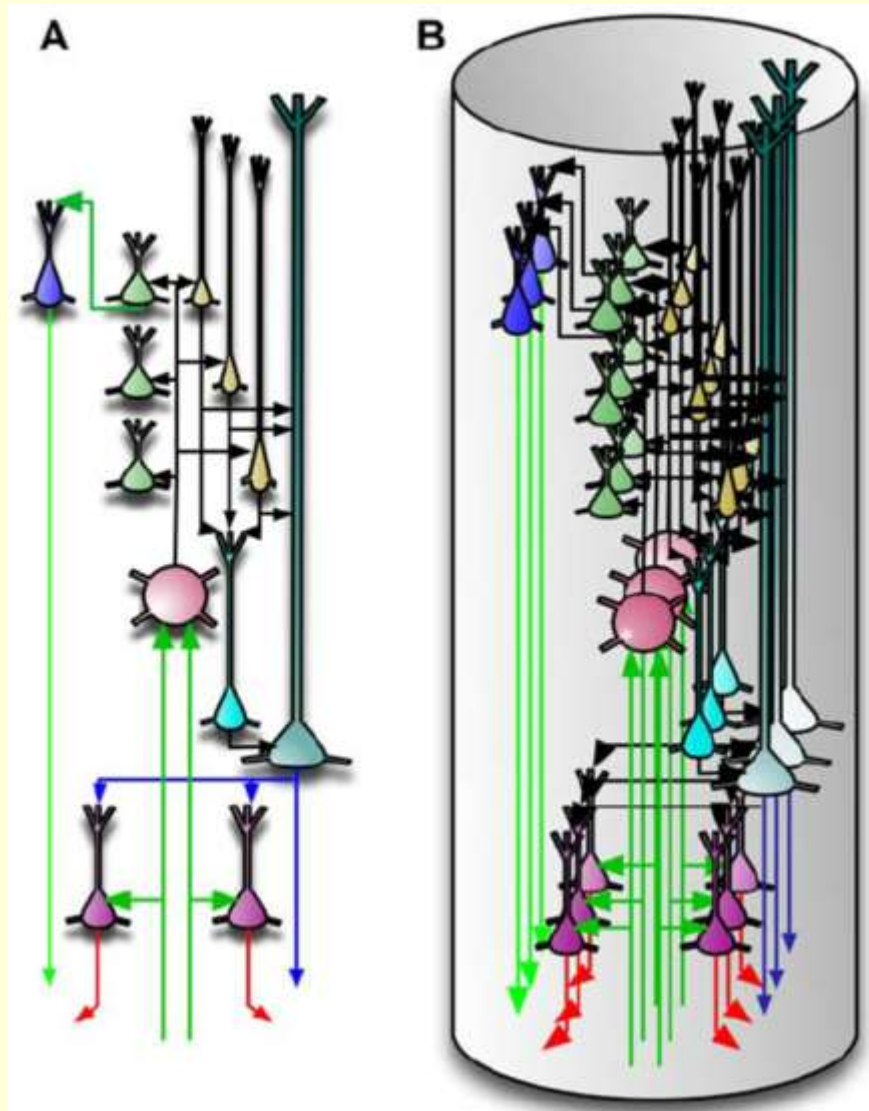
Les neurones ont des connexions préférentielles **à la verticale**.

Mais ces colonnes ne sont **pas visibles** par coloration comme les couches du cortex;

elles sont plus **fonctionnelles** qu'anatomiques.



Chaque colonne = plusieurs milliers de neurones



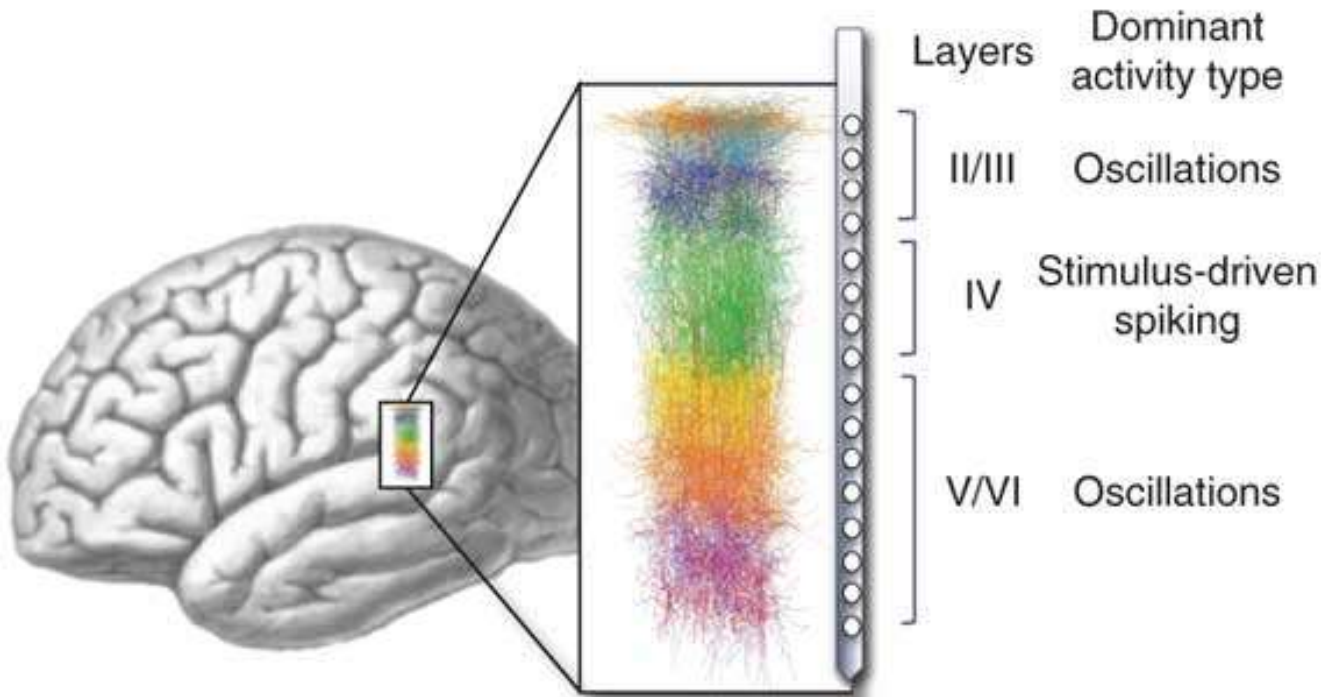
→ **Cortex** : grande diversité de fonctions, mais circuits remarquablement similaires

Le problème devient soudainement plus abordable:

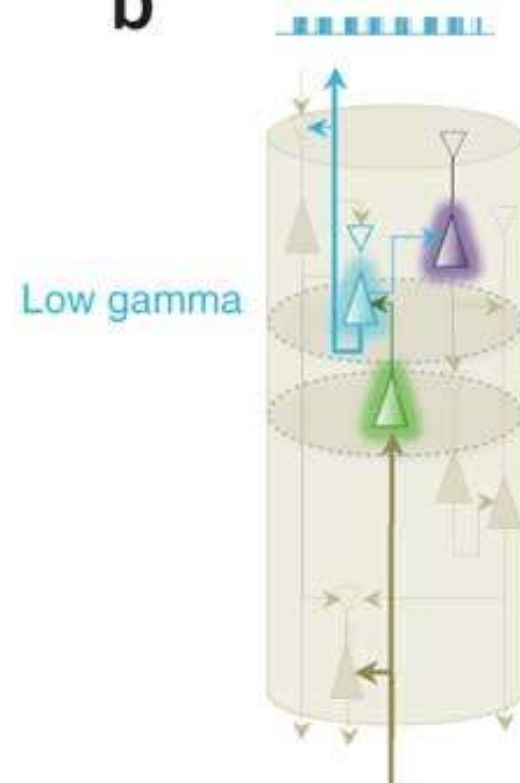
**comprenez une colonne, et vous les comprendrez toutes !**

Donc modèle très populaire, surtout auprès de ceux qui font des **simulations informatiques**, comme le **Human Brain Project**, par exemple.

a



b



Extrait du site de **Henry Markram**

au <http://markram-lab.epfl.ch/>

qui va tout à fait en ce sens :

« *The neocortex constitutes nearly 80% of the human brain and **is made of repeating stereotypical microcircuits** composed of different neuron subtypes. [...]*

*We believe that the neocortical microcircuits within such functional cortical columns represent **a fundamental unit of computation**, constituting the essence of neocortical computation.”*

**The Human Brain Project - Video Overview**

<https://www.youtube.com/watch?v=JqMpGrM5ECo>

(0 à 2 min., 4 à 6 min.)

**NEOCORTICAL COLUMN**

(10,000 neurons)



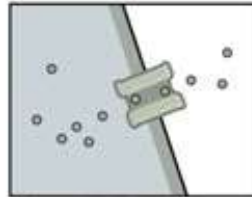
# Le “Human Brain Project”

(anciennement le « Blue Brain Project»), tente de modéliser jusqu’au niveau moléculaire une colonne corticale entière de cerveau de mammifère avec des unités de base proches des neurones (et non de simples points)

## BUILDING A BRAIN

The Blue Brain simulation — a prototype for the Human Brain Project — constructs simulated sections of cortex from the bottom up, starting from detailed models of individual neurons.

### → SIMULATED NEURON



#### Ion channels

In each model neuron, ~7,000 ion channels control membrane traffic.

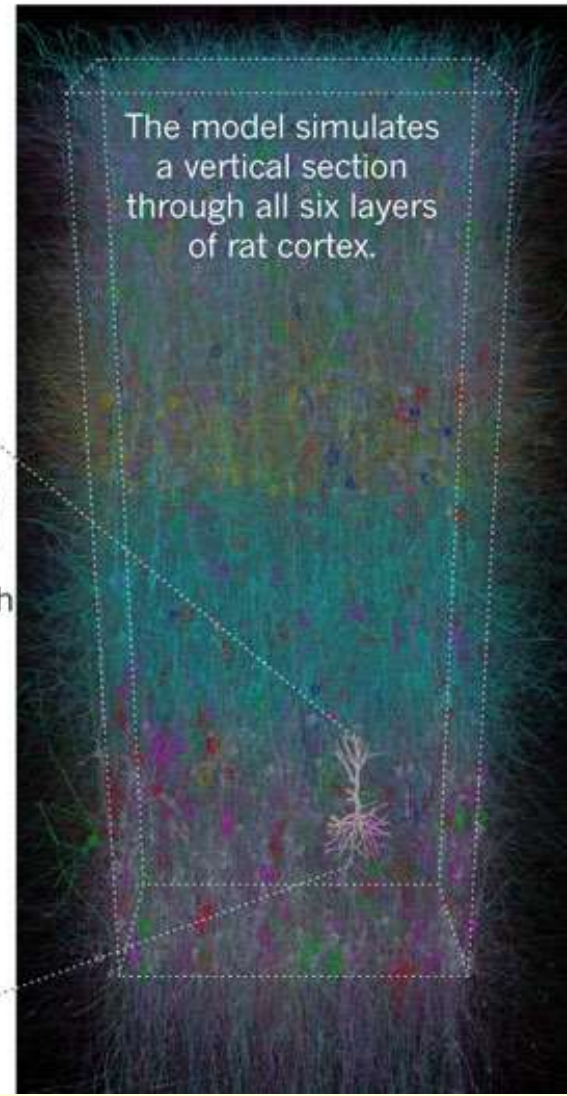
#### Synapses

~3,000 connections per neuron pass signals between cells.

#### Cellular units

~350 cylindrical elements model the axons and dendrites of each cell.

### SIMULATED NEOCORTICAL COLUMN (10,000 neurons)

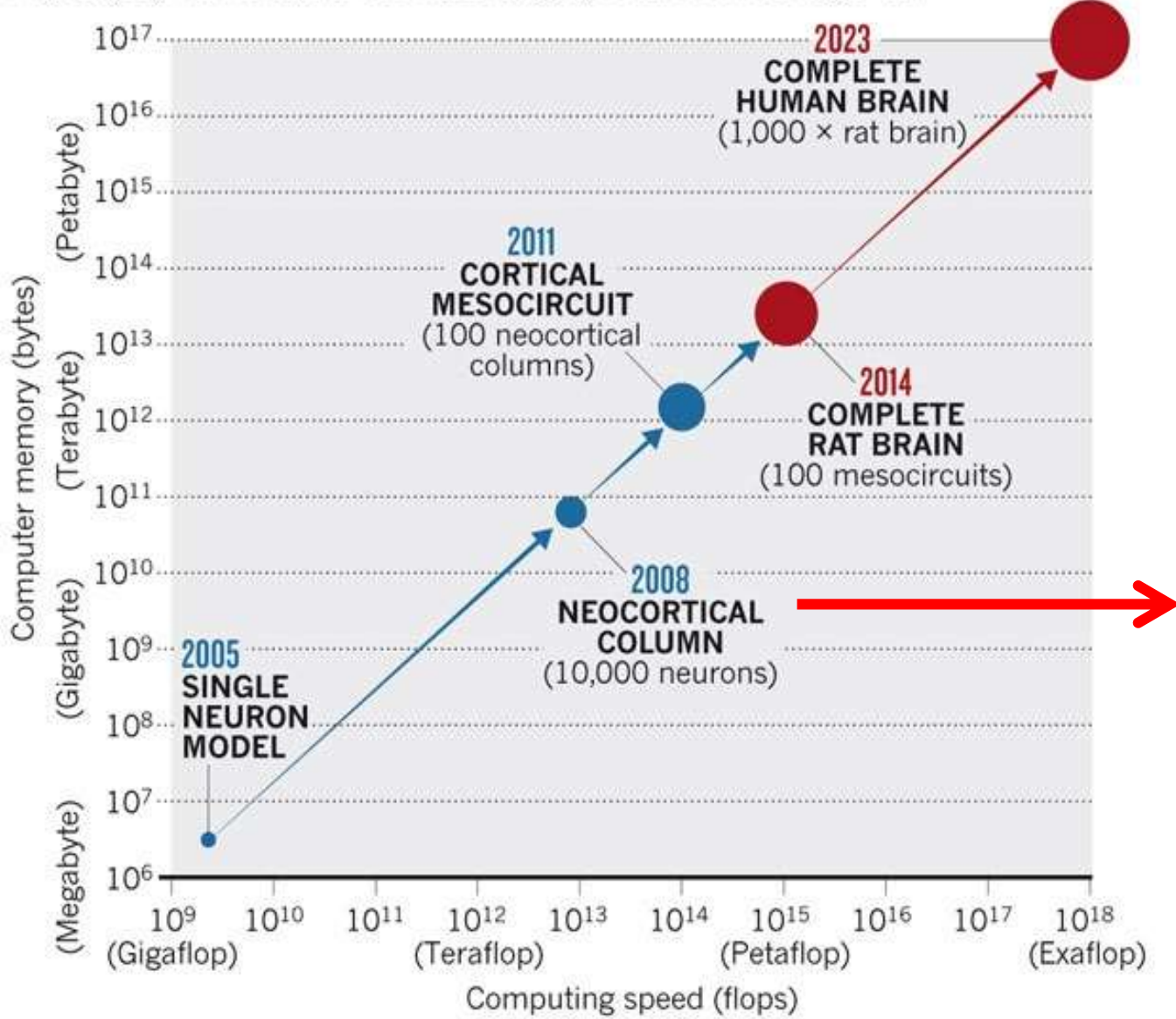


The model simulates a vertical section through all six layers of rat cortex.

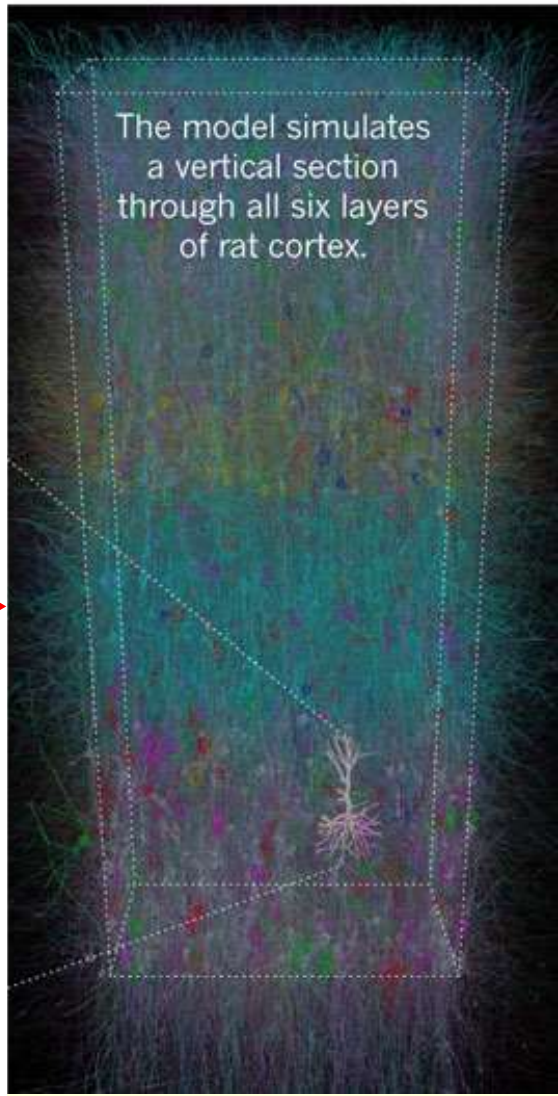


# FAR TO GO

The Blue Brain Project has steadily increased the scale of its cortical simulations through the use of cutting-edge supercomputers and ever-increasing memory resources. But the full-scale simulation called for in the proposed Human Brain Project (red) would require resources roughly 100,000 times larger still.

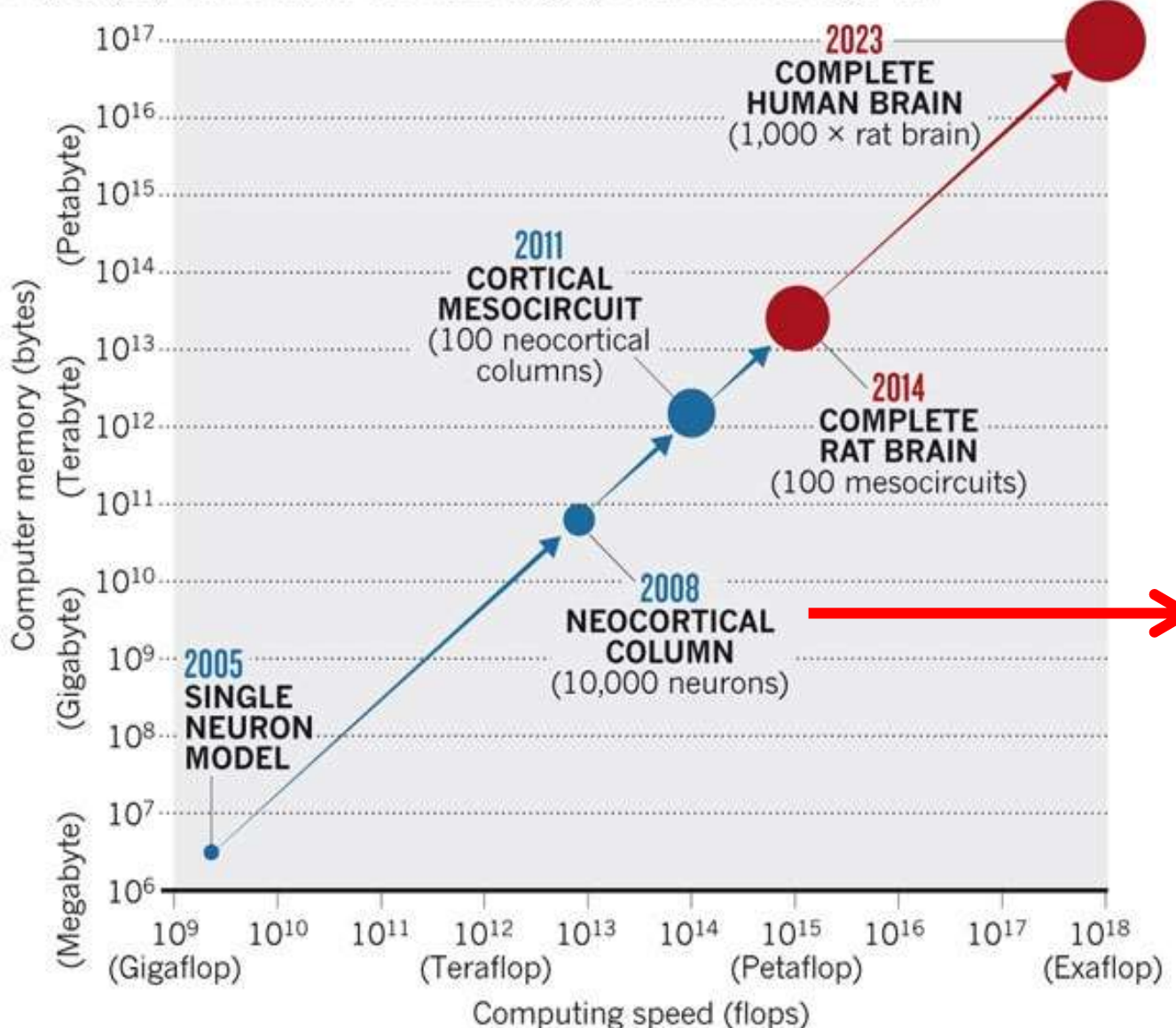


## NEOCORTICAL COLUMN (10,000 neurons)



# FAR TO GO

The Blue Brain Project has steadily increased the scale of its cortical simulations through the use of cutting-edge supercomputers and ever-increasing memory resources. But the full-scale simulation called for in the proposed Human Brain Project (red) would require resources roughly 100,000 times larger still.



**October 21, 2015**  
**Hoopla over a bit of rat brain...a complete brain simulation?**  
[http://mindblog.dericbownds.net/2015/10/hoopla-over-bit-of-rat-brain-complete.html?utm\\_source=feedburner&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29](http://mindblog.dericbownds.net/2015/10/hoopla-over-bit-of-rat-brain-complete.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29)

Cell,  
Volume 163, Issue 2,  
p456–492,

**8 October 2015**

**Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry**  
Henry Markram et al.  
(environ 70 auteurs...)

De la même façon, on peut tracer des cartes cérébrales à partir d'un ou de plusieurs aspects du cerveau (que l'on ne peut que survoler ici...) :

- **Cytoarchitecture** (types de neurones et leur répartition spatiale)
- **Structure** (tissu post-mortem, IRM)

# L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'avènement de l'IRM à la fin des années **1970** a eu l'effet d'une bombe dans le milieu médical.



Cette nouvelle technique n'utilisait ni les rayons X, ni les ultrasons, mais faisait plutôt appel aux **champs magnétiques** en exploitant des propriétés physiques de la matière au niveau sub-atomique,

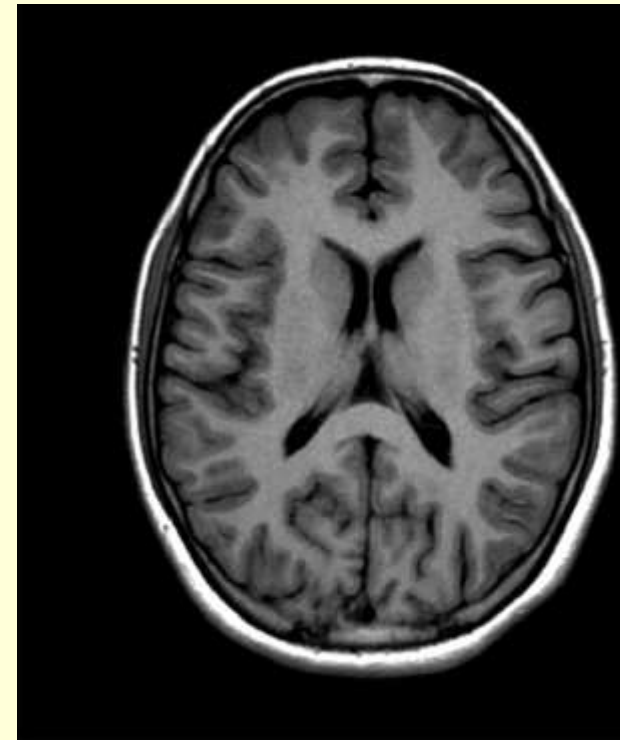
en particulier de l'eau qui constitue environ les trois quarts de la masse du corps humain.

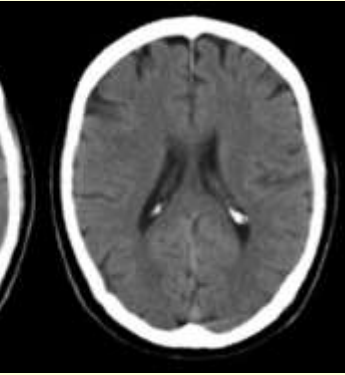
L'IRM, en plus d'une **définition supérieure au CT scan**  
(rayons X assistés par ordinateur),

CT  
scan

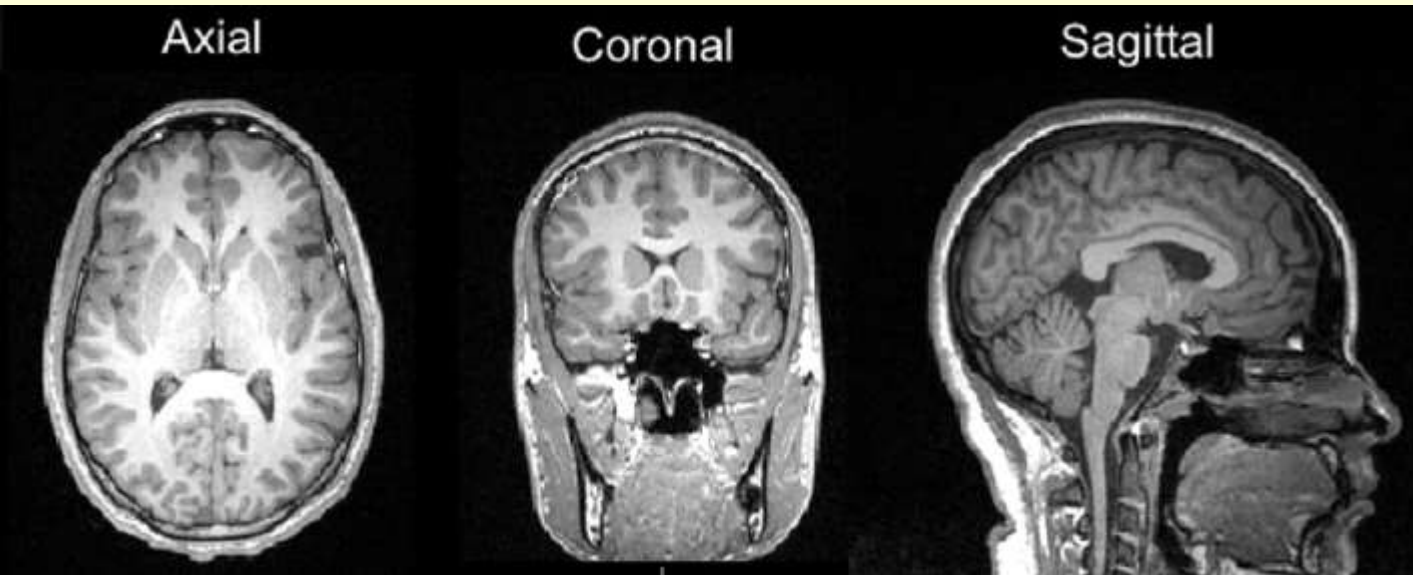


IRM





permet aussi d'obtenir non seulement des coupes axiales du cerveau (comme avec le CT scan), mais aussi des coupes coronales et sagittales.

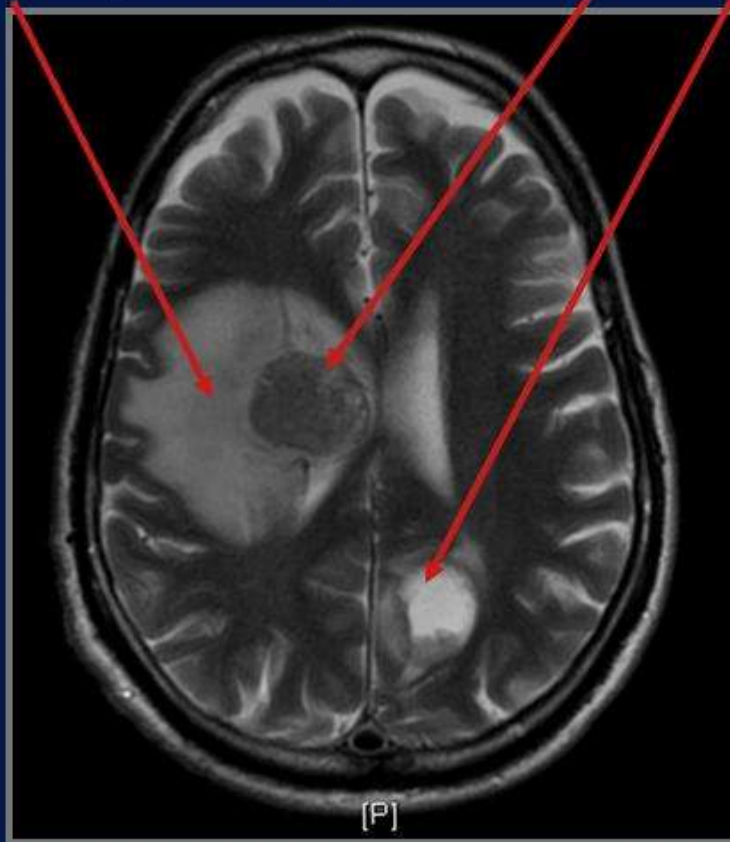


# Brain Metastases on MRI Images

---

Edema (swelling)

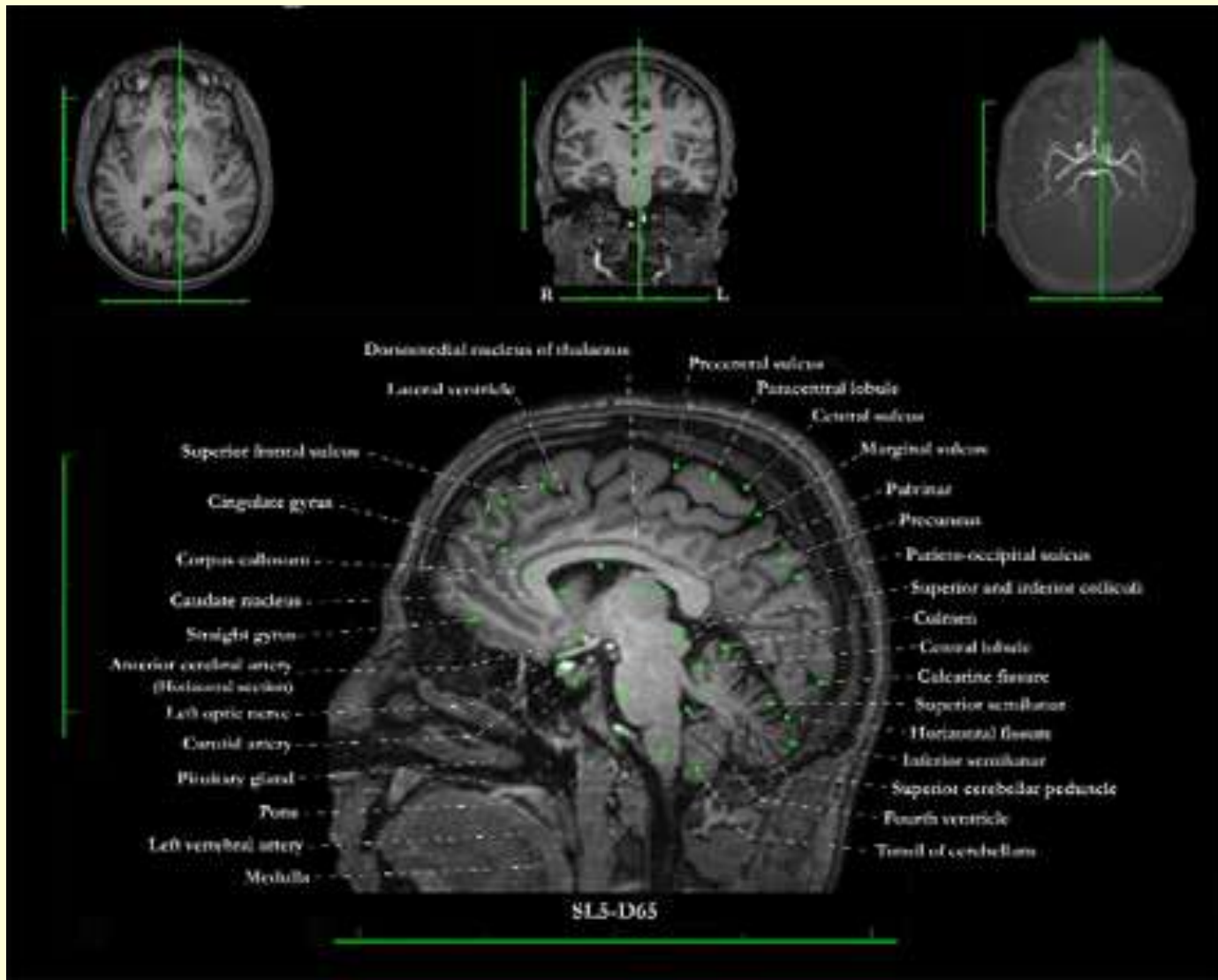
Brain metastases



5 février 2019

## Trois atlas de vrais cerveaux humains accessibles en ligne

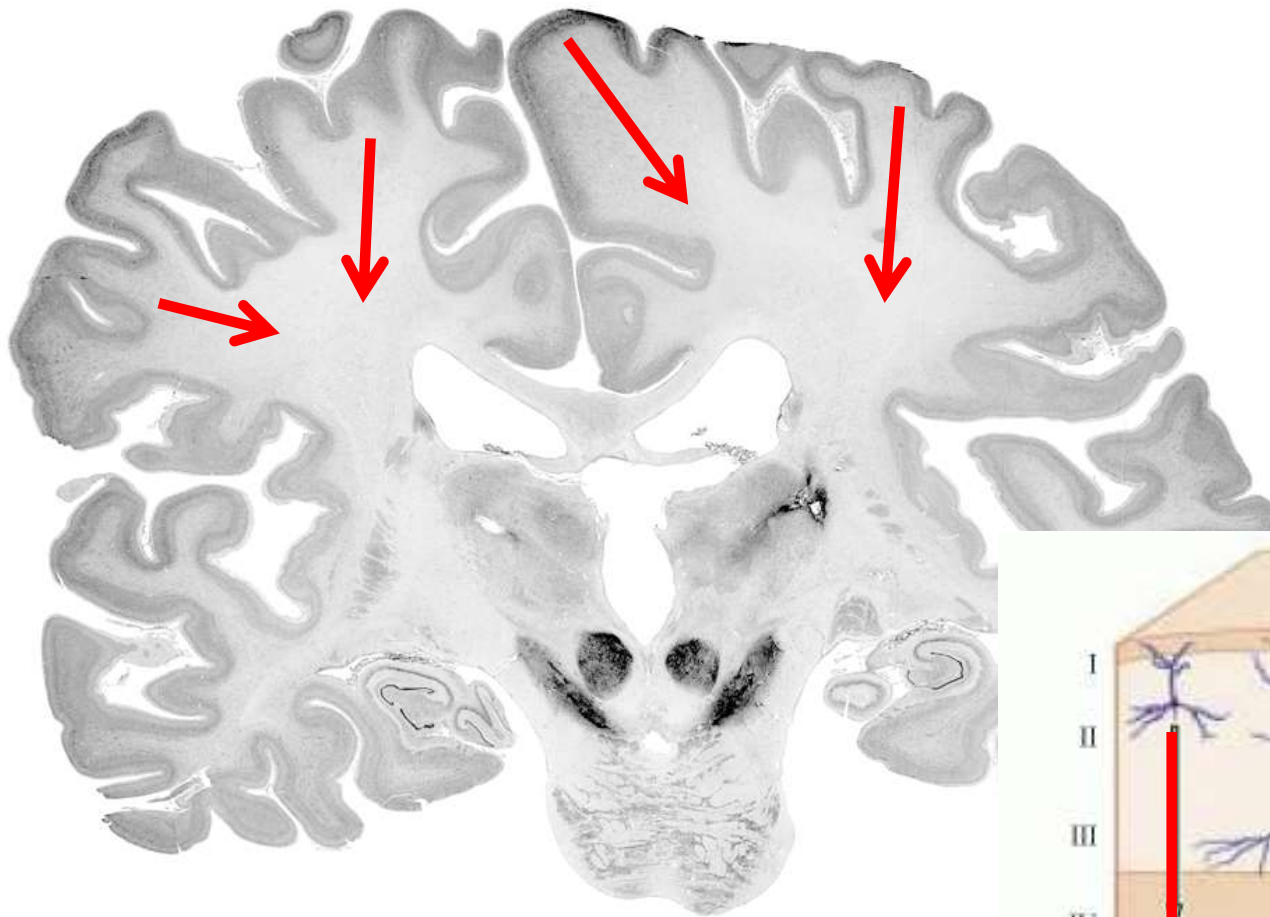
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2019/02/05/trois-atlas-de-vrais-cerveaux-humains-accessibles-en-ligne/>



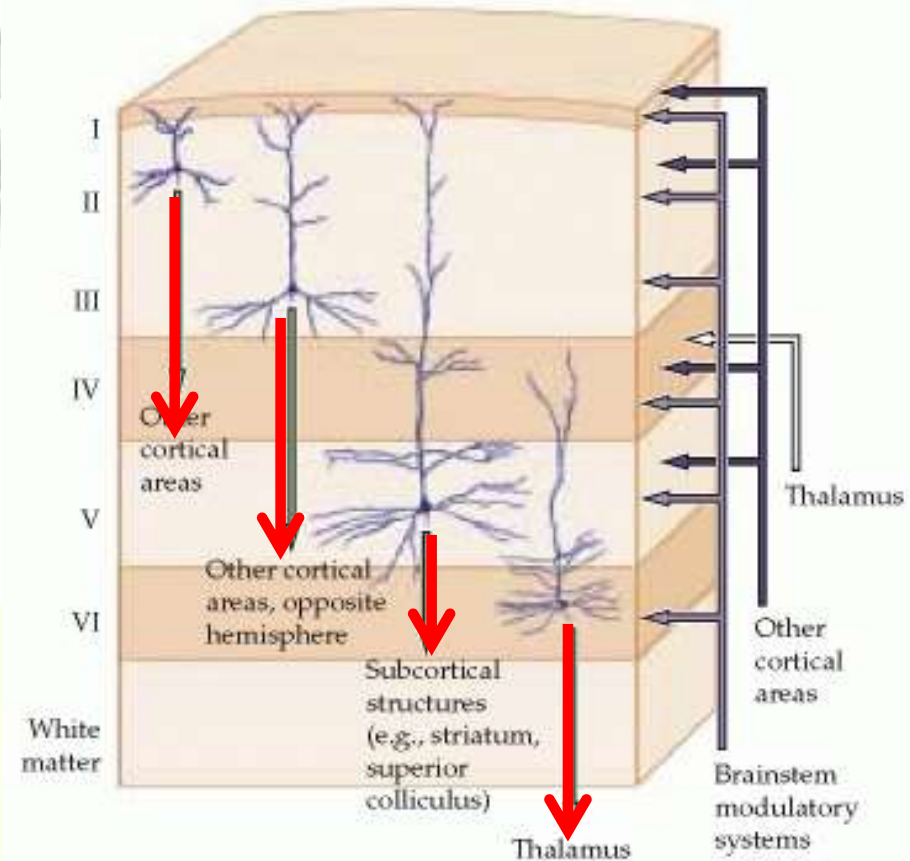


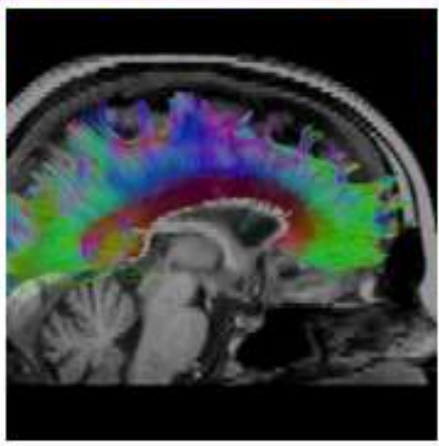
De la même façon, on peut tracer des cartes cérébrales à partir d'un ou de plusieurs aspects du cerveau (que l'on ne peut que survoler ici...) :

- **Cytoarchitecture** (types de neurones et leur répartition spatiale)
- **Structure** (tissu post-mortem, IRM)
- **Connexions** (traçage classique, IRM diffusion, etc.)



Les **axones** des neurones du cortex se projettent vers l'intérieur du cerveau pour aller rejoindre diverses cibles.



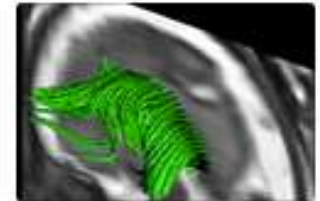


## Diffusion Imaging

13 likes

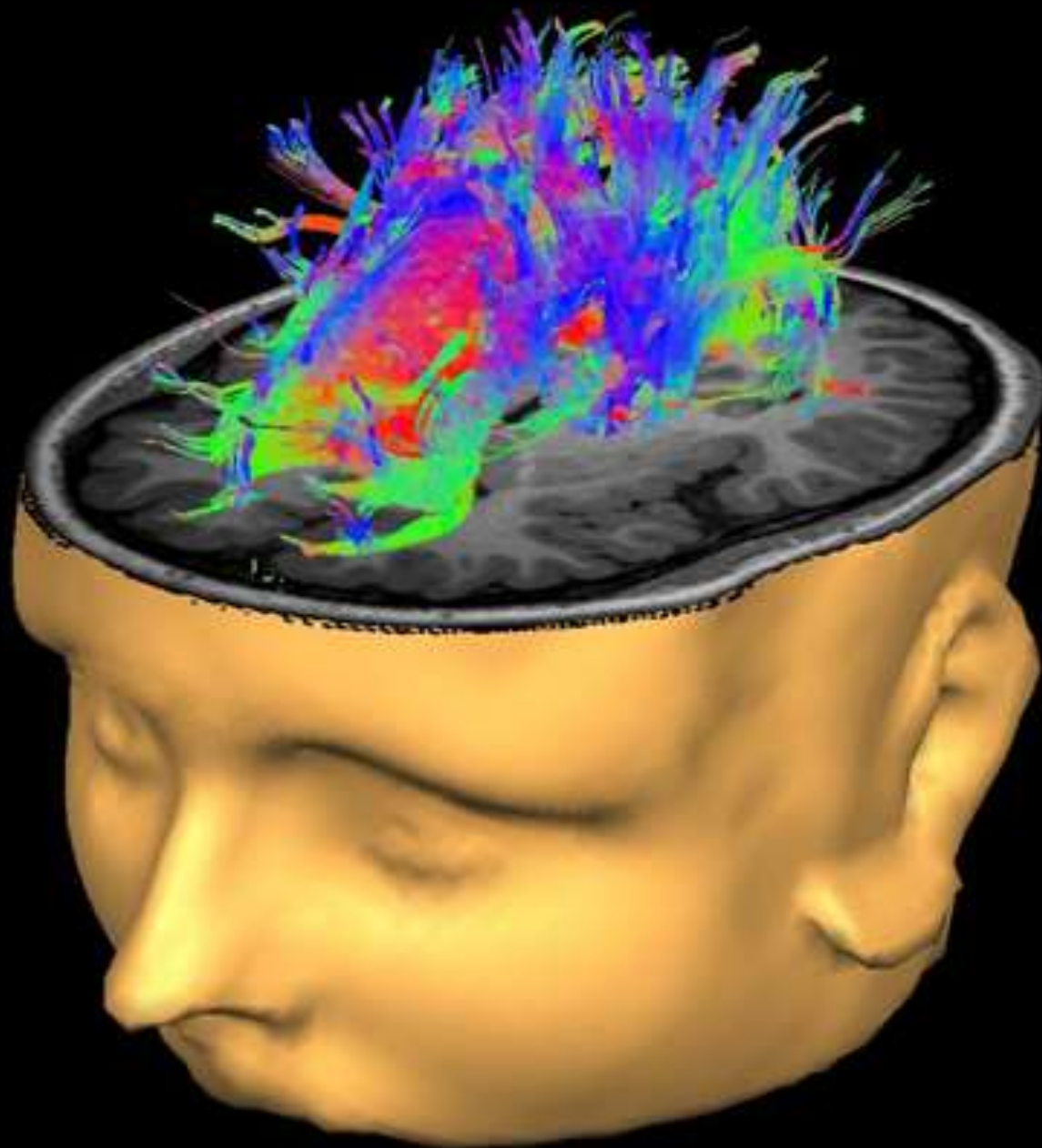
Community [?]

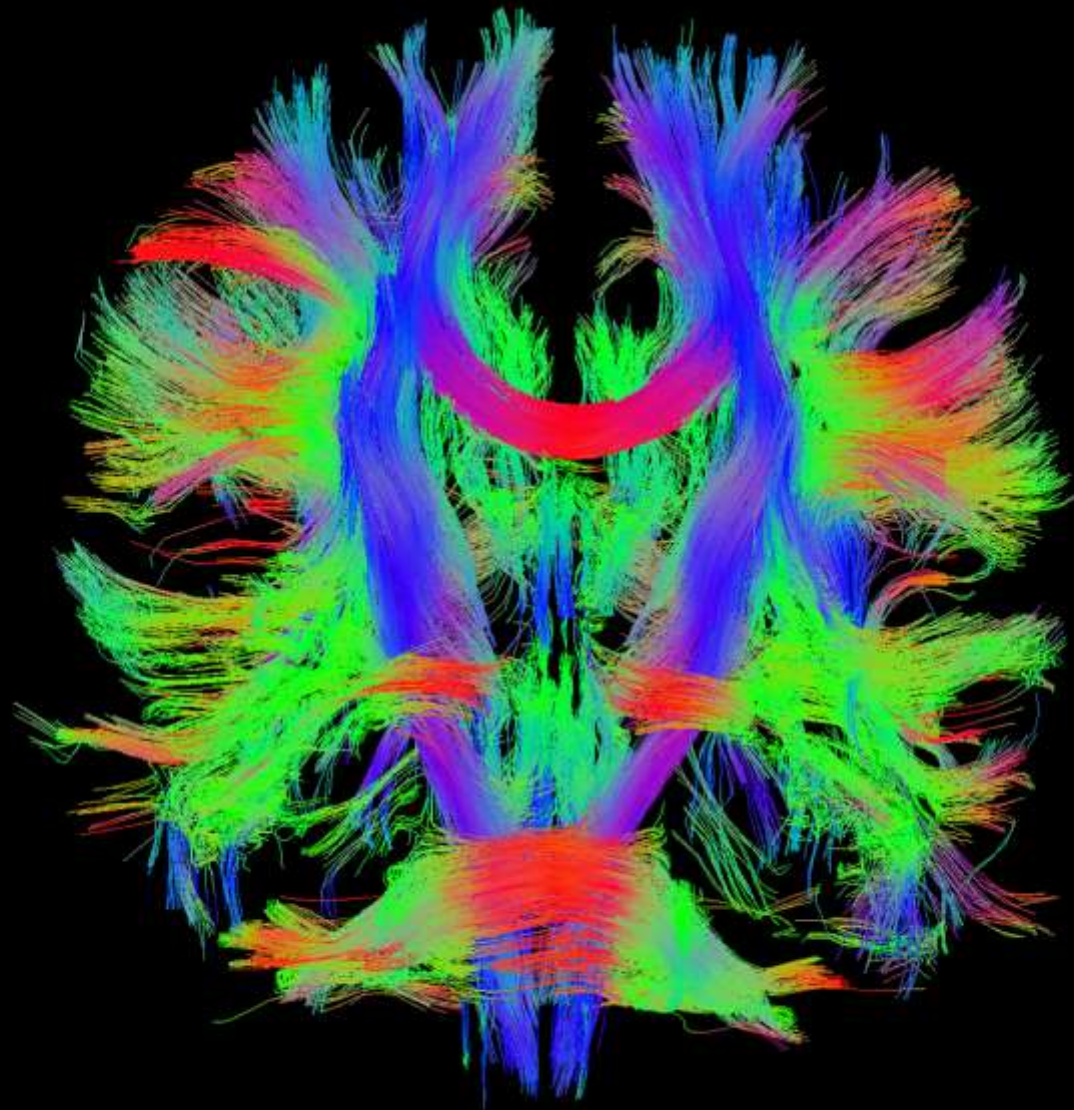
Diffusion Tensor Imaging is a cutting edge imaging technique that provides quantitative information with which to visualize and study connectivity and continuity of neural pathways in the central and peripheral nervous systems in vivo (Basser et al. 2000)

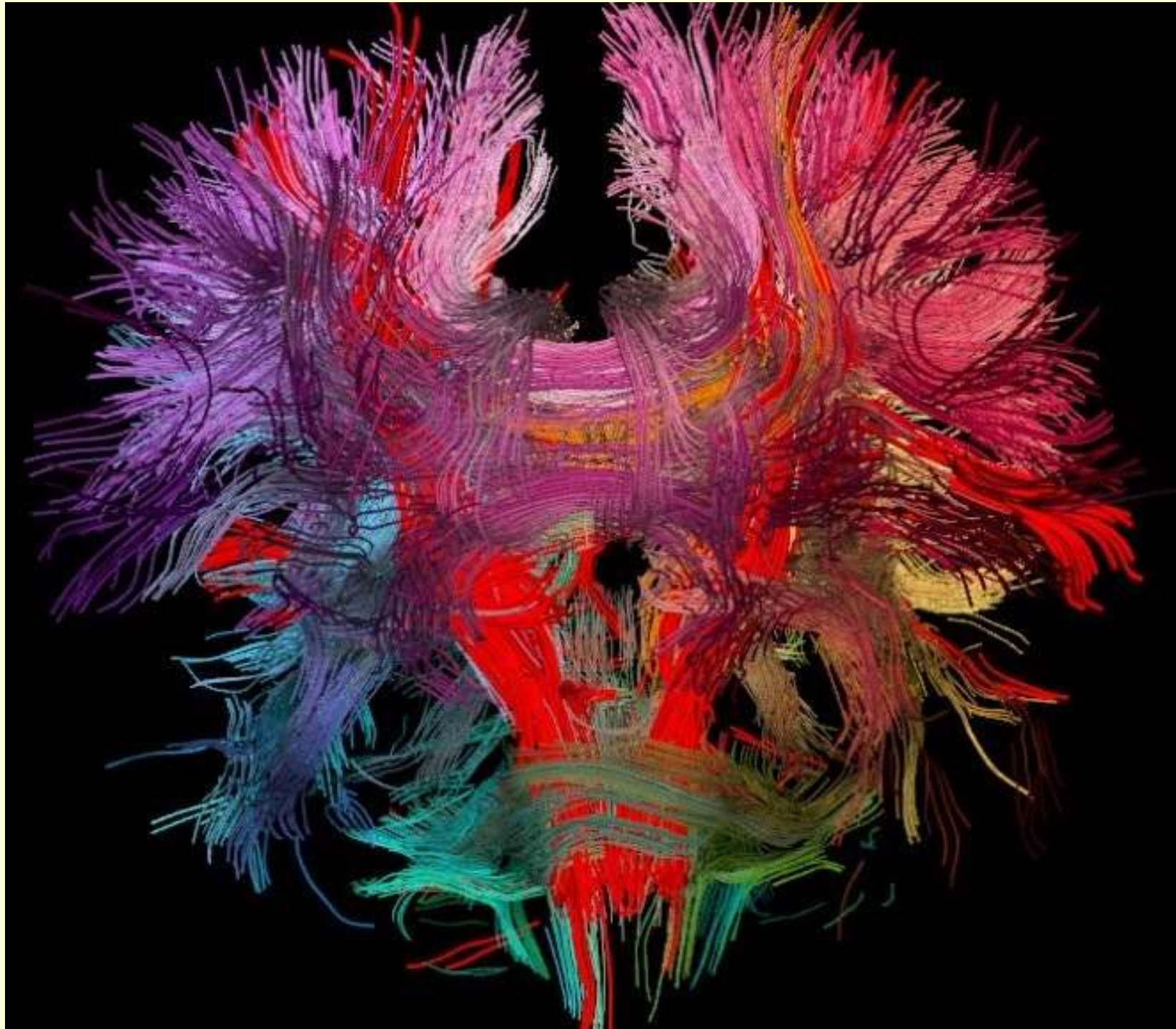


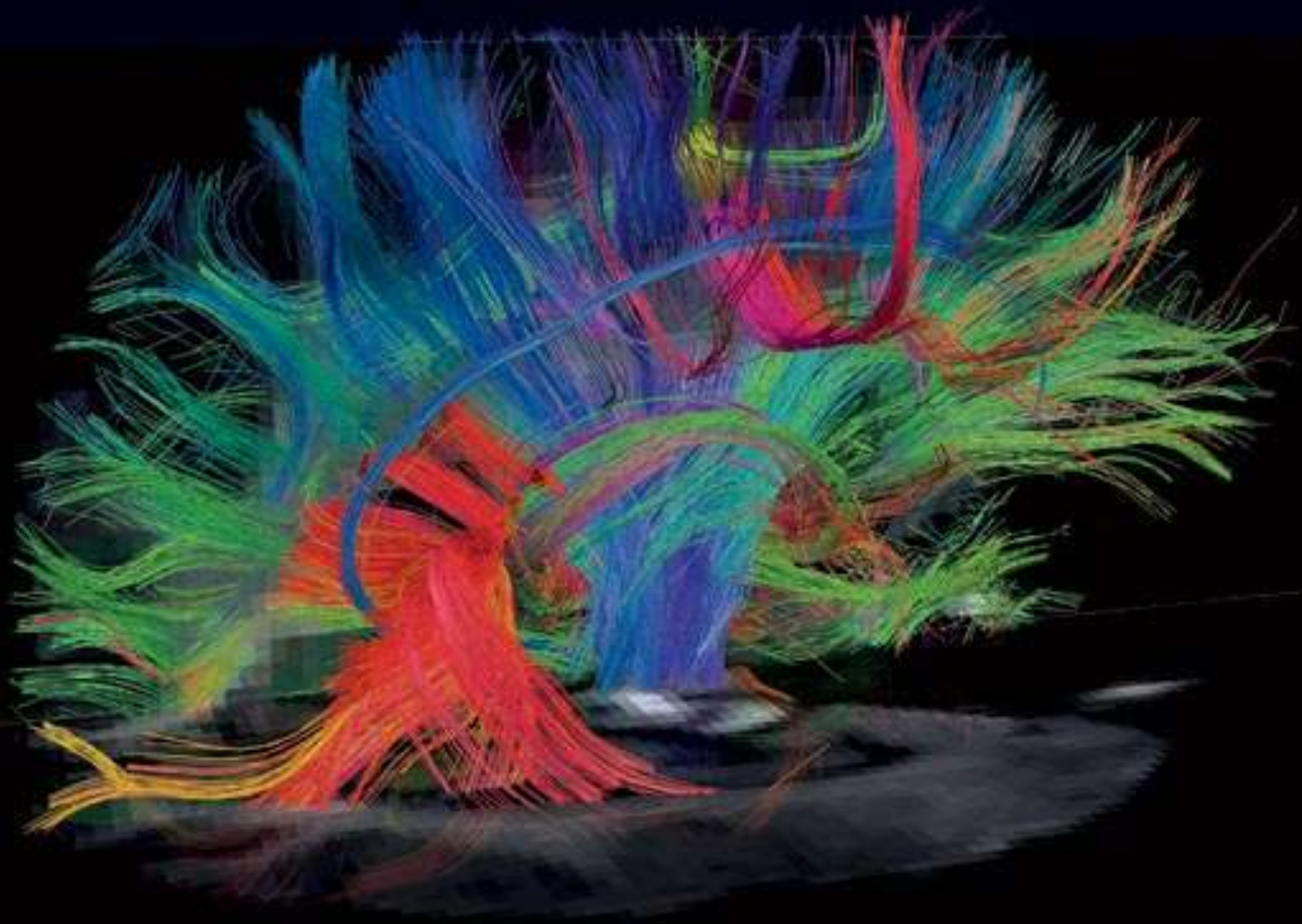
- Premières images : **1985**
- Méthode **non invasive** qui permet de visualiser les grandes connections entre différentes parties du cerveau sur une base individuelle

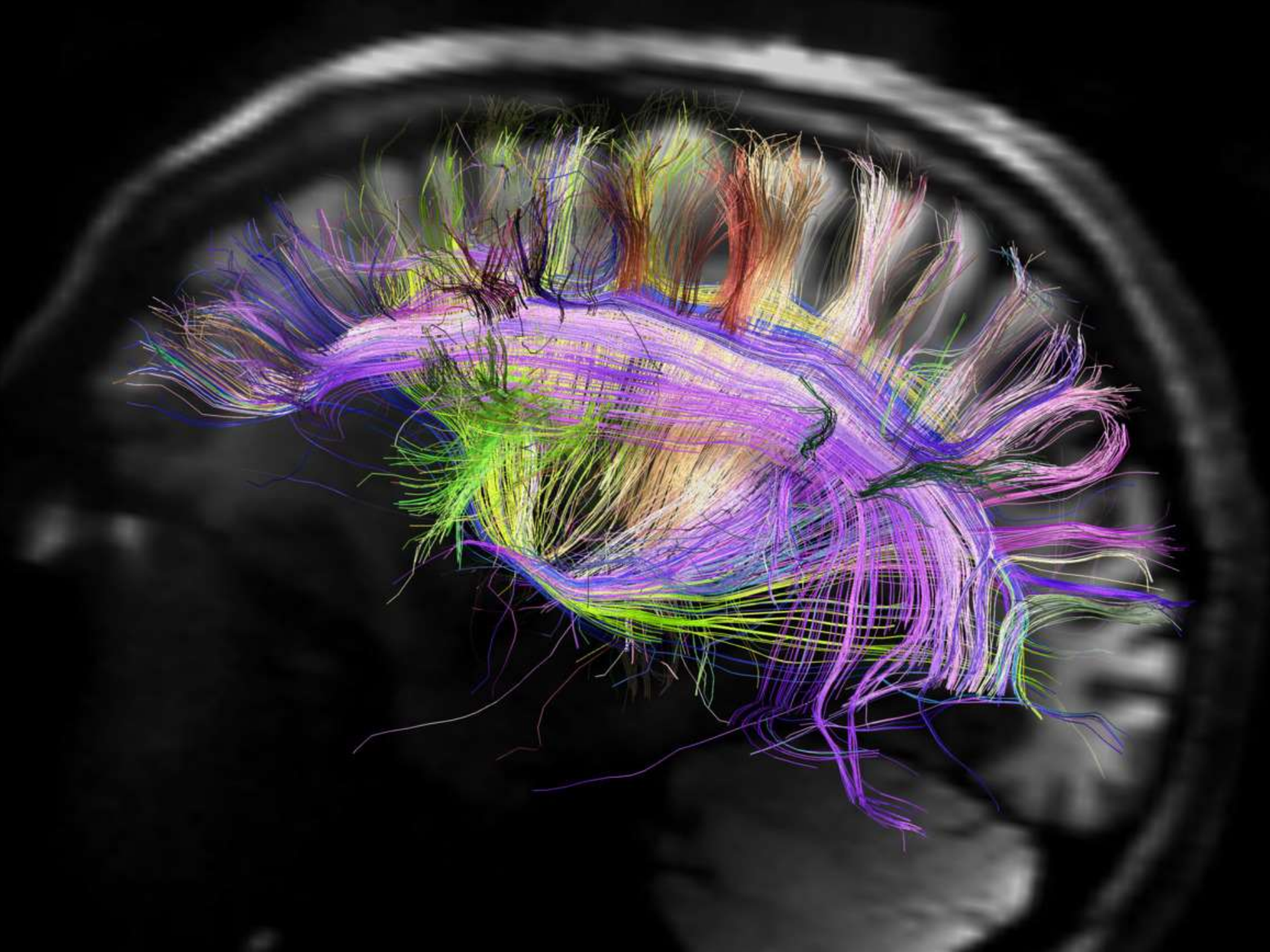
Avec la puissance de traitement des ordinateurs, la qualité des images s'est amélioré au fil des années.













# New Discoveries in Brain Structure and Connectivity

29 / Mar / 2012

“Think your brain is wired randomly like a bowl of spaghetti? Think again. Dr. Van Wedeen of the Martinos Center for Biomedical Imaging at Massachusetts General Hospital has found that brain connections are organized in a 3D grid structure and far simpler than previously thought.



Detail of diffusion spectrum MR image of **rhesus monkey** brain showing the fabric-like, three-dimensional structure of neural pathways.

# Application clinique de l'IRM de diffusion

27 janvier **2014**

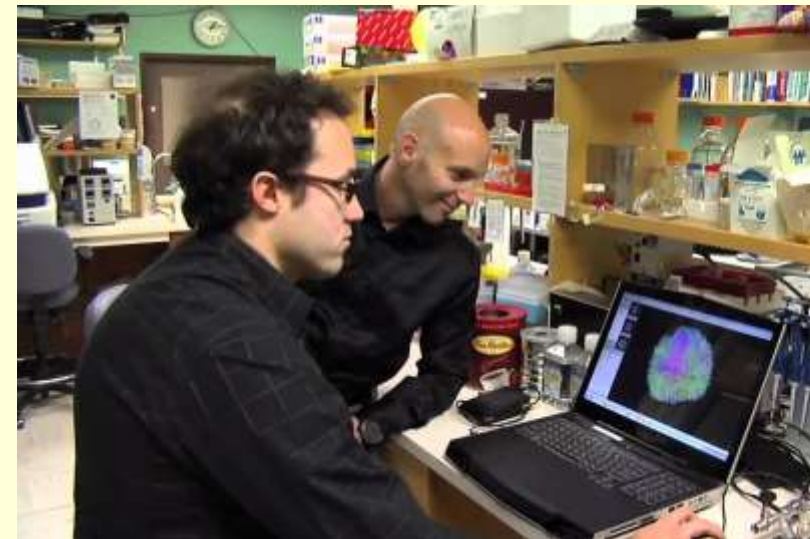
<http://tvanouvelles.ca/lcn/infos/regional/sherbrooke/archives/2014/01/20140127-192013.html>

Le prestigieux **National Geographic** s'est intéressé aux travaux d'un informaticien de l'Université de Sherbrooke et d'un neurochirurgien du Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke (CHUS).

«Mon travail, c'est d'enlever la tumeur sans abîmer l'état des connexions encore fonctionnelles. Ces images nous permettront d'être beaucoup plus précis lorsqu'on va essayer de limiter l'étendue de la tumeur qu'on va enlever», explique le **neurochirurgien, David Fortin**.

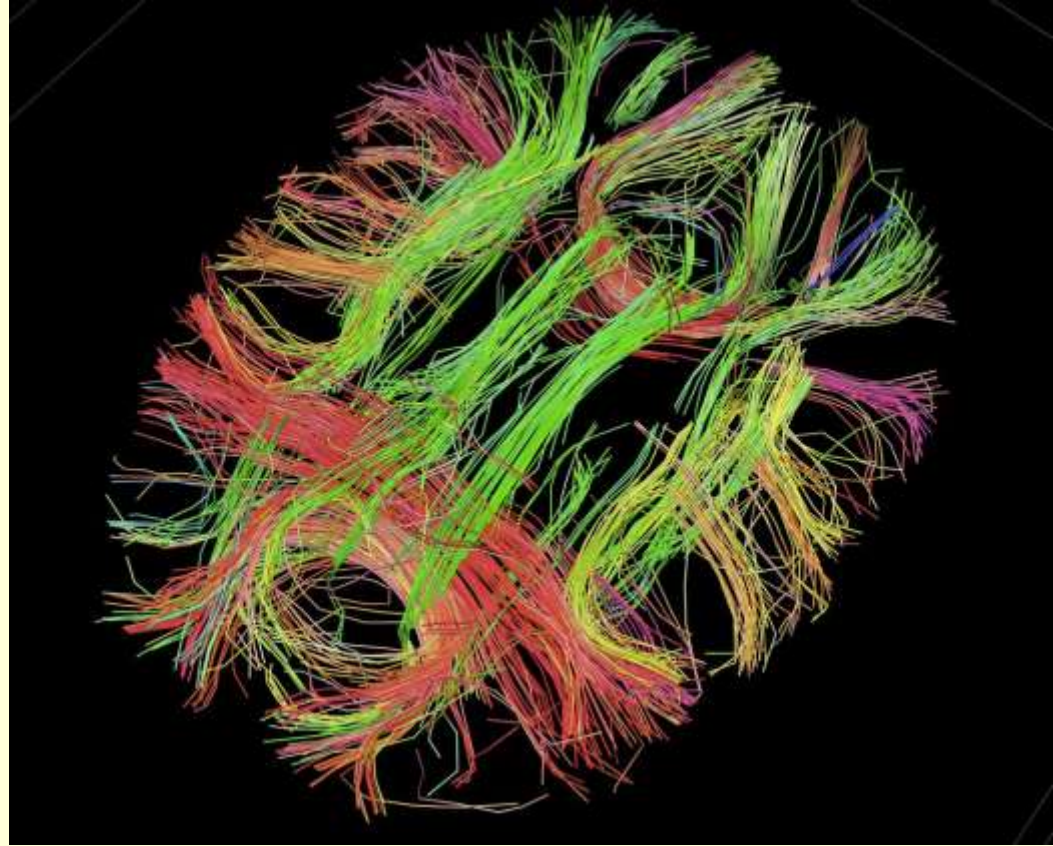
[qui travaille en collaboration avec **Maxime Descoteaux** et son équipe ]

**Sherbrooke Connectivity Imaging Lab > Videos**  
[http://scil.dinf.usherbrooke.ca/?page\\_id=468&lang=en](http://scil.dinf.usherbrooke.ca/?page_id=468&lang=en)



Maxime Descôteaux et David Fortin

**Limite / critique**  
à l'IRM de diffusion :



**Ne voit pas les nombreux embranchements** des axones (collatérales) que l'on observe sur les colorations traditionnelles à haute-résolution car avec l'IRM de diffusion chaque faisceau contient des milliers d'axons.

***« The brain is not made up of point-to-point connections, it's made up of trees. »***

De la même façon, on peut tracer des cartes cérébrales à partir d'un ou de plusieurs aspects du cerveau (que l'on ne peut que survoler ici...) :

- **Cytoarchitecture** (types de neurones et leur répartition spatiale)
- **Structure** (tissu post-mortem, IRM)
- **Connexions** (traçage classique, IRM diffusion, etc.)
- **Répartition** des neurotransmetteurs, de leurs récepteurs, etc. (PET scan)

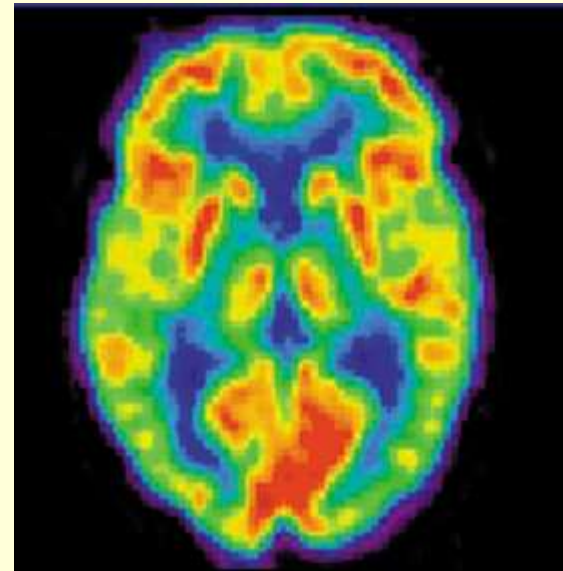
On regarde toujours des cerveaux **vivants**, le vôtre dans un scan par exemple...

Mais pendant que vous êtes dans le scan, vous effectuez une **tâche** et l'on enregistre des **changements d'activité** dans différentes régions cérébrales.



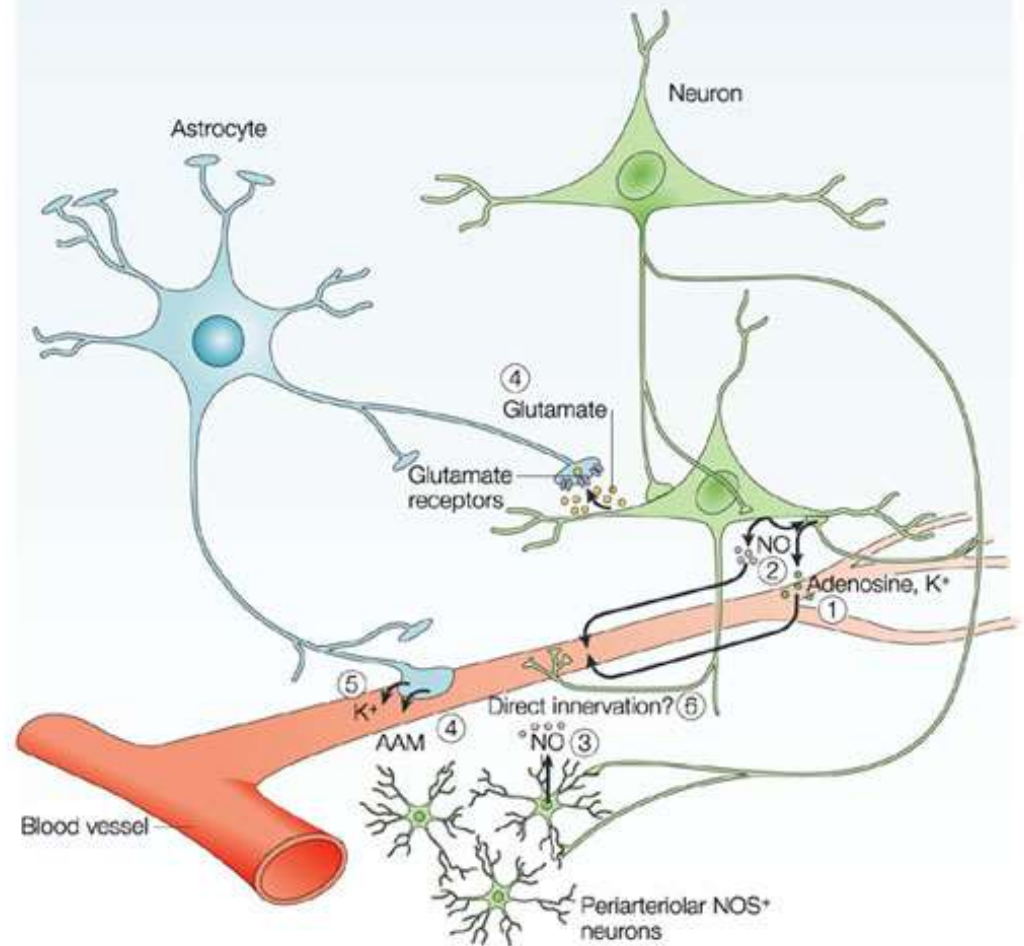
## La tomographie par émission de positons (TEP, ou « PET scan », en anglais)

La tomographie par émission de positons (TEP) fut la première technique d'imagerie cérébrale fonctionnelle à voir le jour au milieu des années **1970** et à devenir accessible dans les années **1980**.



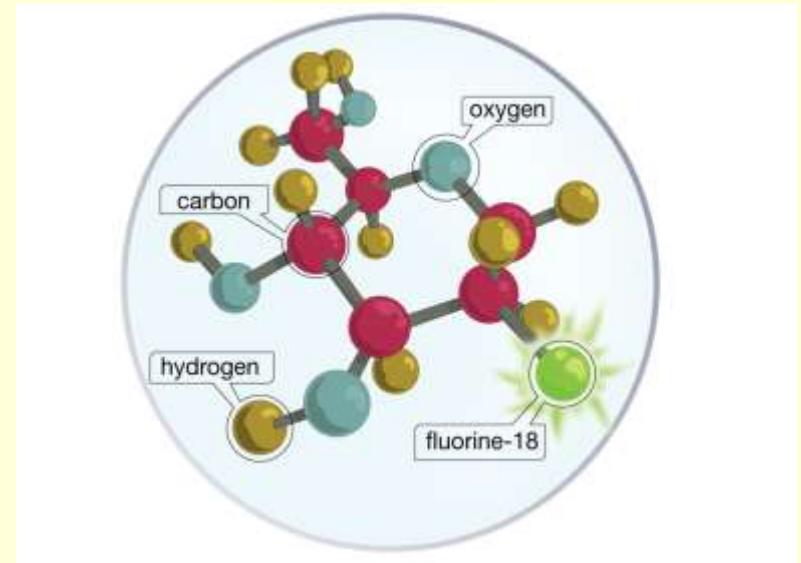
Comme pour comme  
**l'IRMf** [dont on va parler  
tantôt] la TEP va prendre  
partie du phénomène  
physiologique suivant :

lorsqu'un groupe de  
neurones devient **plus  
actif**, une vasodilatation  
locale des capillaires  
sanguins cérébraux se  
produit automatiquement  
pour amener davantage  
de sang, et donc  
d'oxygène, vers ces  
régions plus actives.

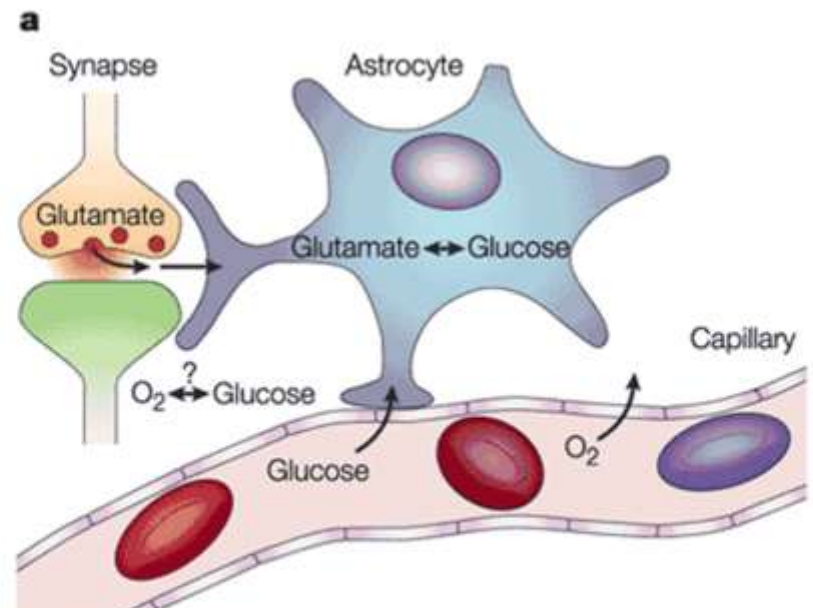


## Fluorodeoxyglucose (FDG), molécule de glucose radioactive

Lors d'une TEP, on doit injecter au sujet une solution contenant un **élément radioactif** qui peut être l'eau elle-même ou du glucose radioactif, par exemple.



Davantage de radioactivité sera donc émise des zones cérébrales les plus active à cause de cette **vasodilatation** qui amène plus de solution radioactive dans ces régions.

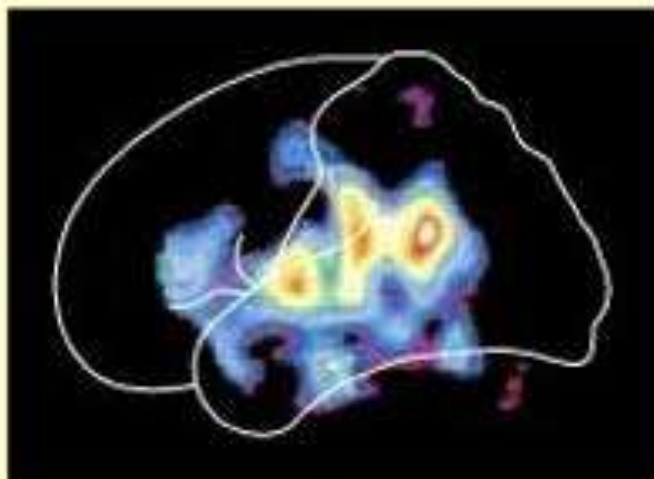


# PET scan

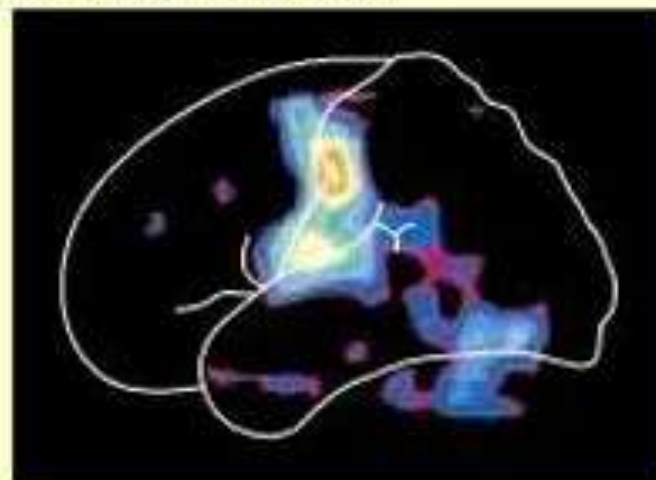
**Voir passivement des mots**



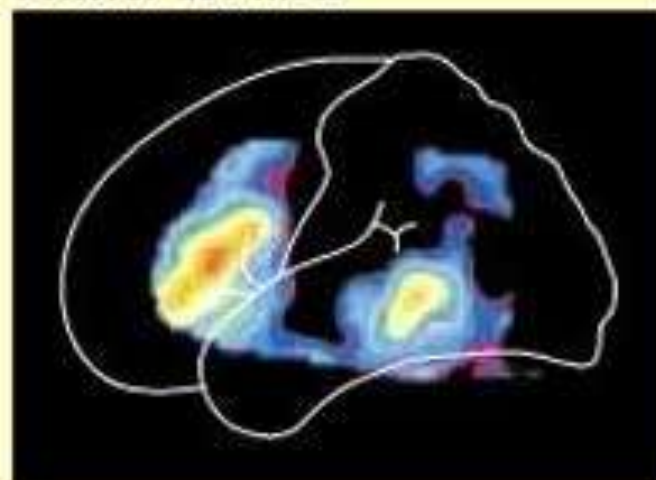
**Écouter des mots**



**Prononcer des mots**



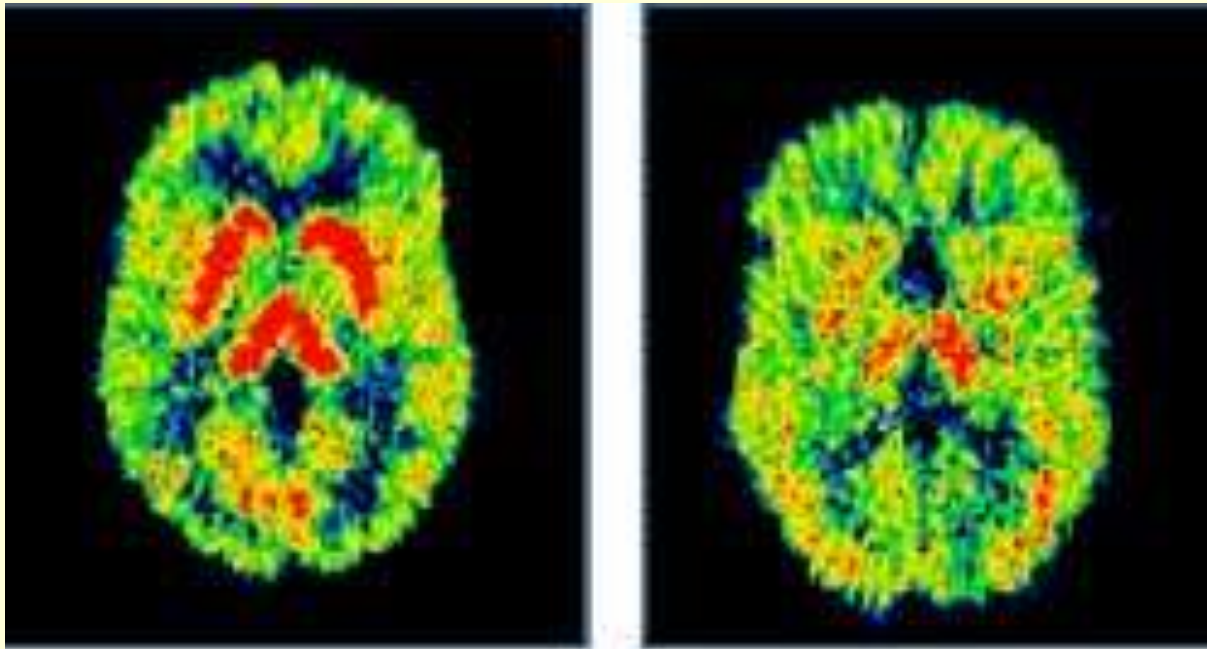
**Générer des mots**





La TEP permet aussi d'inclure l'isotope radioactif dans certaines substances dont on veut connaître l'utilisation métabolique par certaines régions cérébrales.

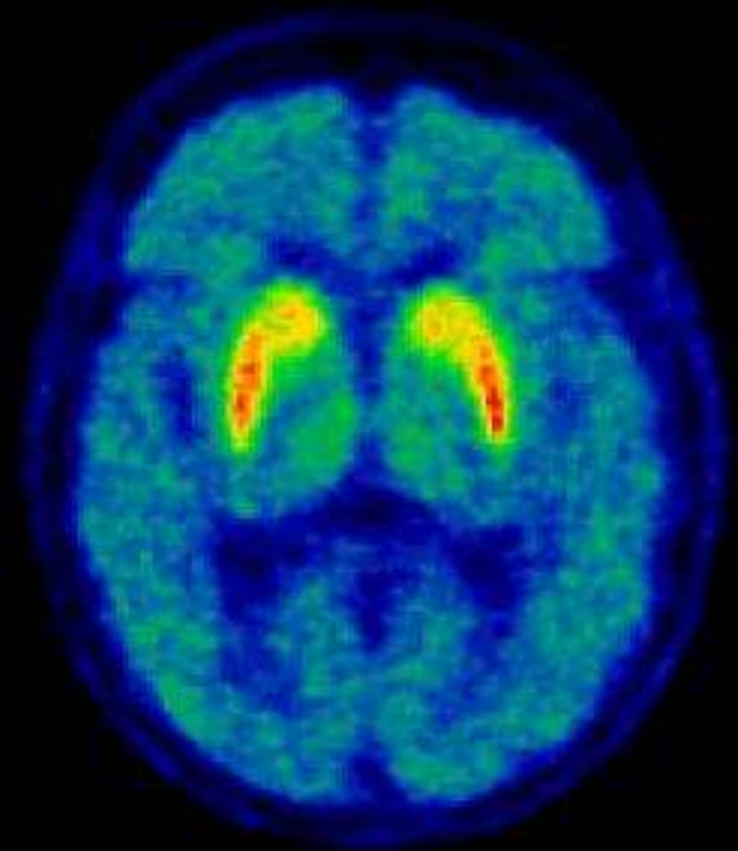
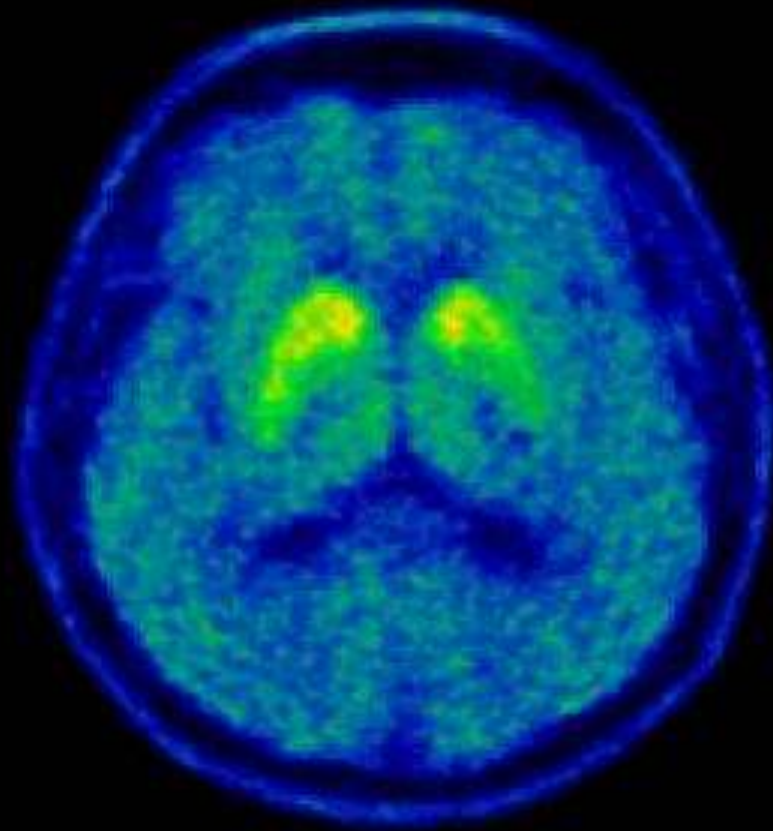
L'étude des neurotransmetteurs a bénéficié d'une façon importante de cette approche qui a permis de préciser la distribution de plusieurs d'entre eux.



L'image de gauche montre la TEP du cerveau d'un sujet normal.  
À droite, la TEP révèle un taux de sérotonine (un neurotransmetteur) plus faible chez un sujet atteint de dépression sévère.

**A: Parkinson's Disease Patient**

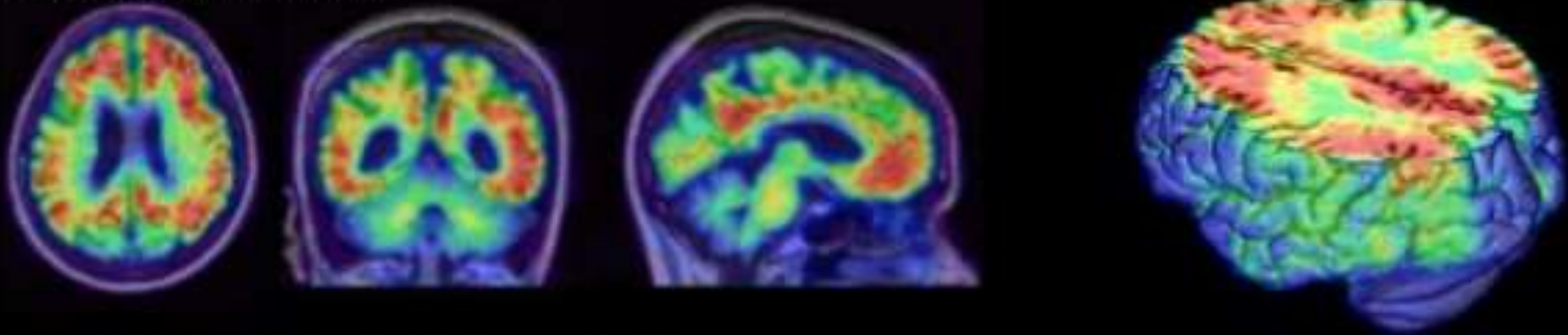
**B: PD Patient's Healthy Parent**



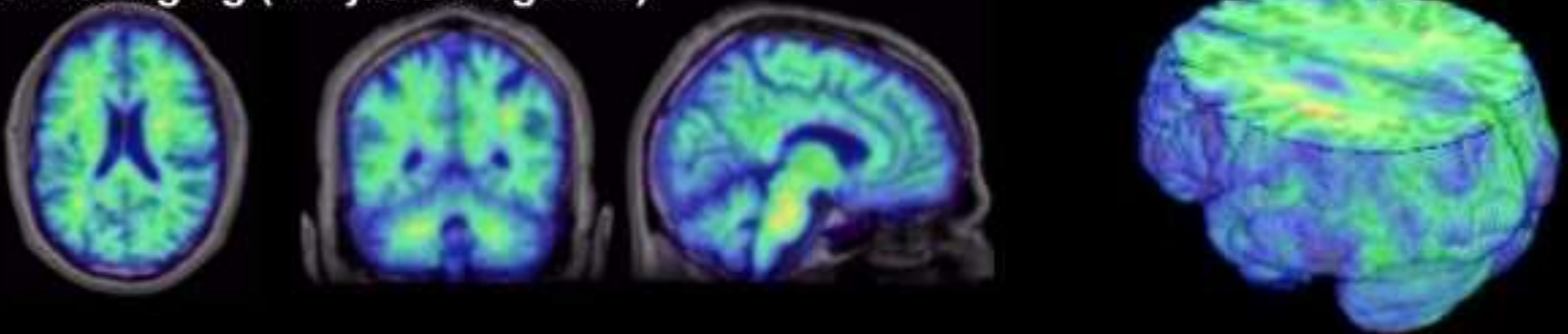
PET images of a subject with Parkinson's Disease (A) and their elderly parent who is unaffected by PD (B). In these images warmer colours indicate increased function of the neurons that produce the chemical **dopamine**. The loss of these neurons, evident in image A, leads to the symptoms of PD.

# Amyloid PET Imaging in Aging

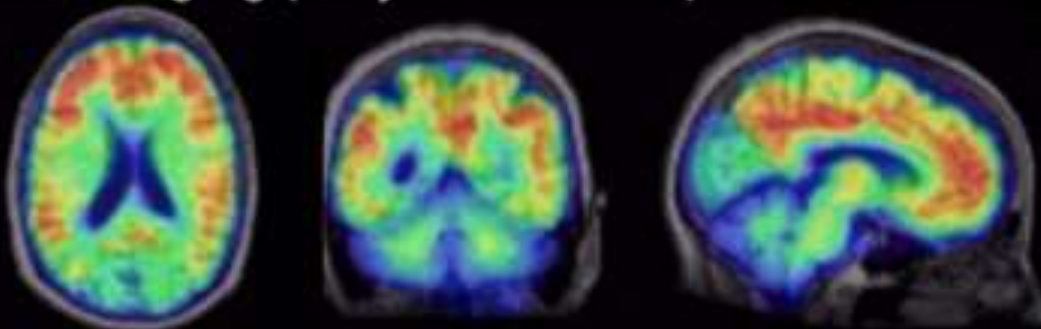
## Alzheimer's Disease



## Normal Aging (Amyloid Negative)



## Normal Aging (Amyloid Positive)



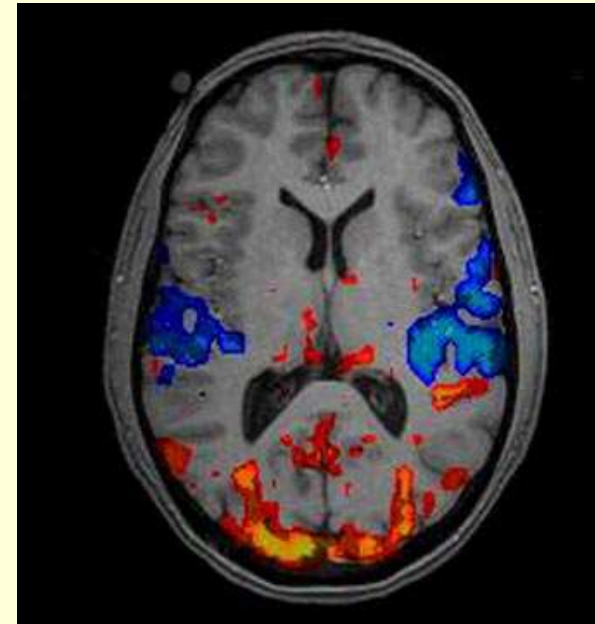
**30% of normal older people are amyloid positive**

De la même façon, on peut tracer des cartes cérébrales à partir d'un ou de plusieurs aspects du cerveau (que l'on ne peut que survoler ici...) :

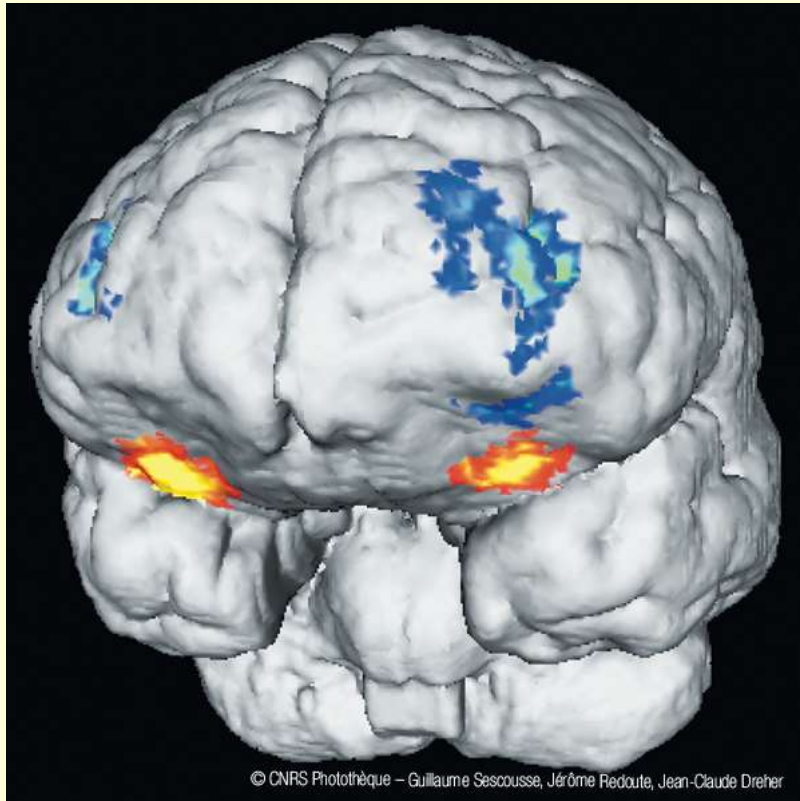
- **Cytoarchitecture** (types de neurones et leur répartition spatiale)
- **Structure** (tissu post-mortem, IRM)
- **Connexions** (traçage classique, IRM diffusion, etc.)
- **Répartition** des neurotransmetteurs, de leurs récepteurs, etc. (PET scan)
- **Fonction** (IRMf, rs-fcMRI, etc.)

# Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

- À partir des années **1990**
- nous renseigne sur l'**activité nerveuse** des différentes régions cérébrales
- L'appareillage qui entoure le sujet et le fonctionnement de base est sensiblement le même qu'avec l'IRM, mais les **ordinateurs** qui analysent le signal **diffèrent**.

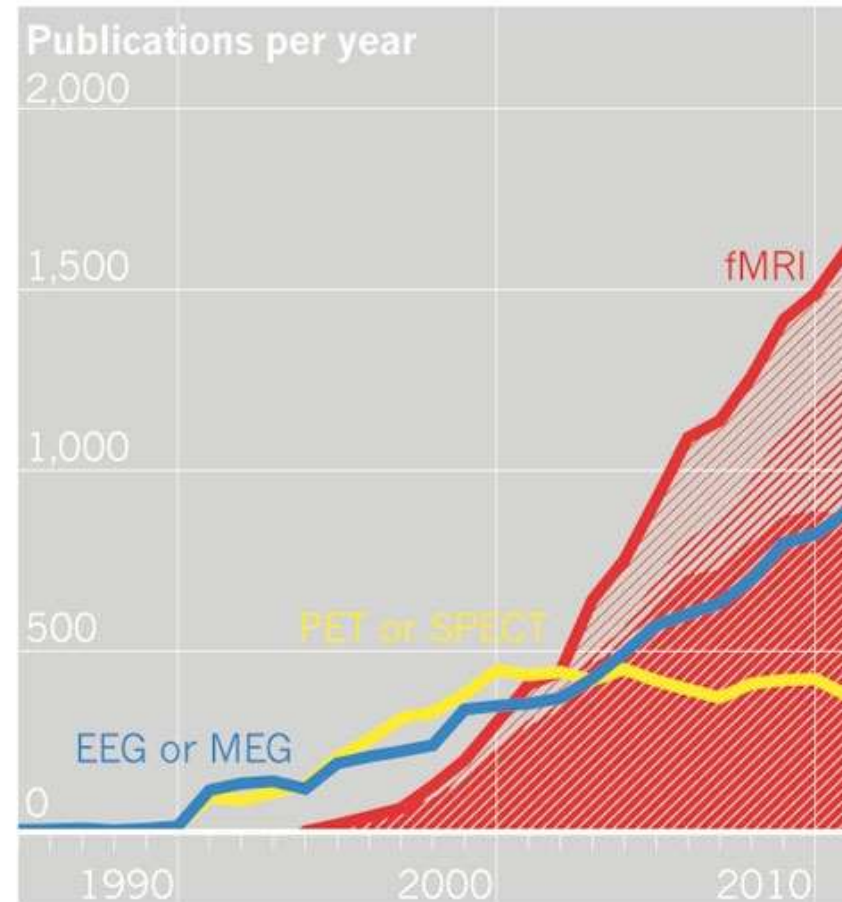


# L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)



## THE RISE OF fMRI

Use of fMRI has rocketed, and now more studies are looking at connectivity between regions.



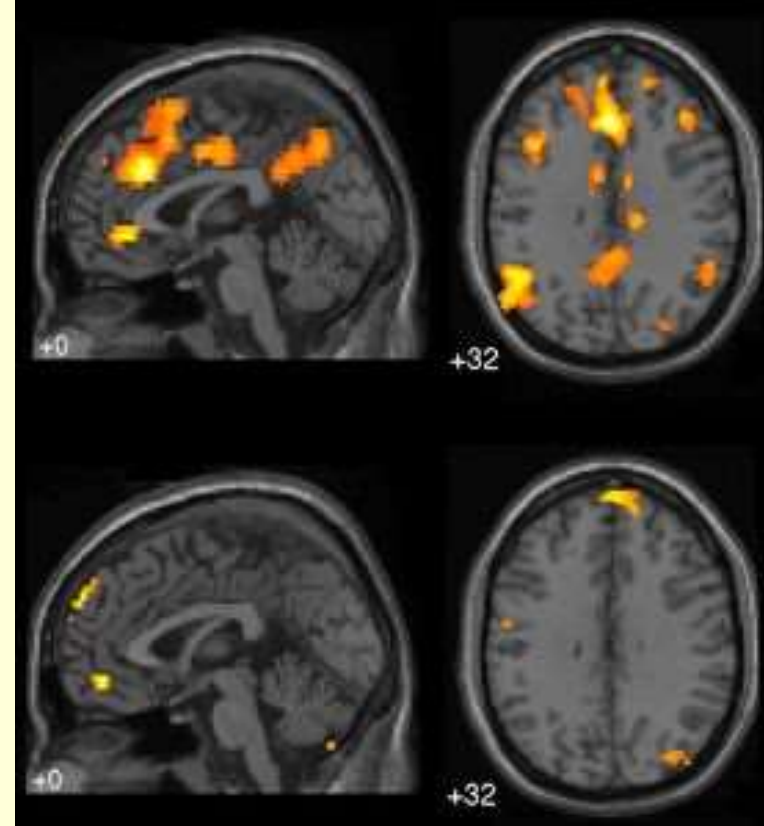
### fMRI publications by subject:

Activation  Connectivity  Other 

fMRI, functional magnetic resonance imaging; PET, positron emission tomography; SPECT, single-photon emission computed tomography; EEG, electroencephalography; MEG; magnetoencephalography  
Data from ISI Web of Knowledge.

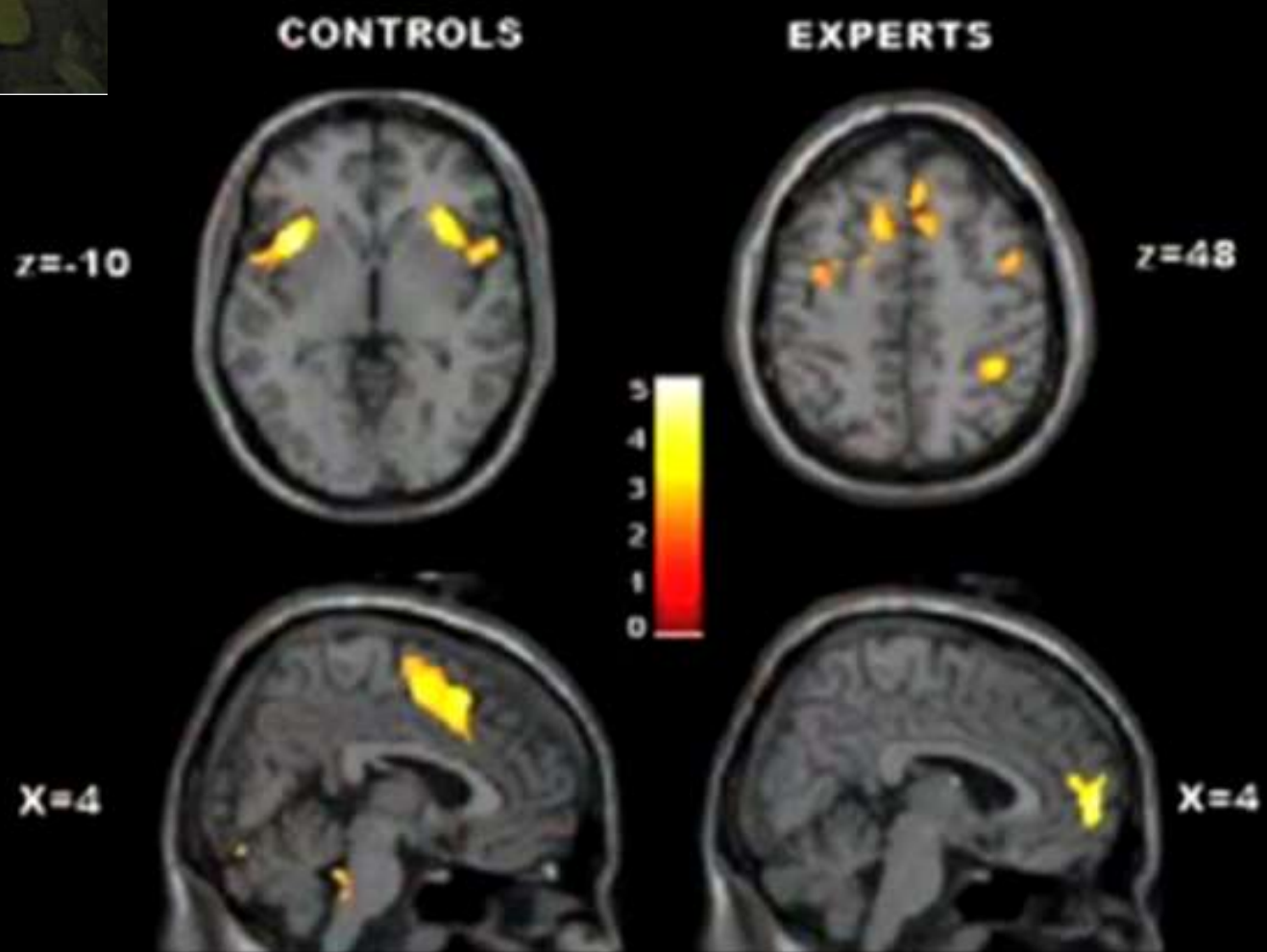
Peut être utilisée sans l'injection de substance dans l'organisme du sujet

Peut fournir une image **structurelle** et **fonctionnelle** du même cerveau, facilitant ainsi les correspondances anatomo-fonctionnelles.



La **résolution spatiale** est de l'ordre du millimètre (de **3 - 4 mm** pour les machines à 3 Tesla à **1 - 0,5 mm** pour celles à 7 Tesla) (  $\geq 5 - 10$  mm pour le PET scan )

La **résolution temporelle** est limitée par la relative lenteur du flux sanguin dont l'IRMf dépend (donc pas à l'échelle des millisecondes comme l'activité neuronale)

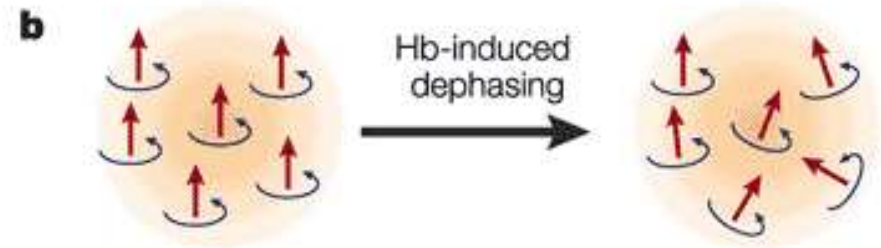
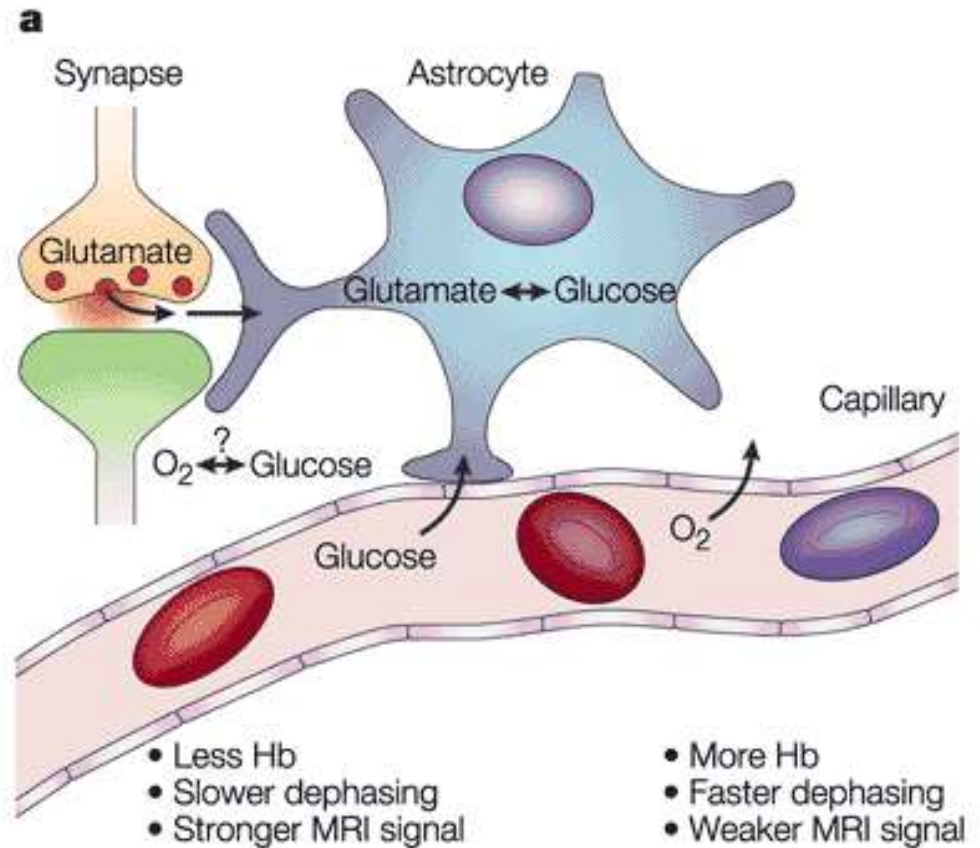


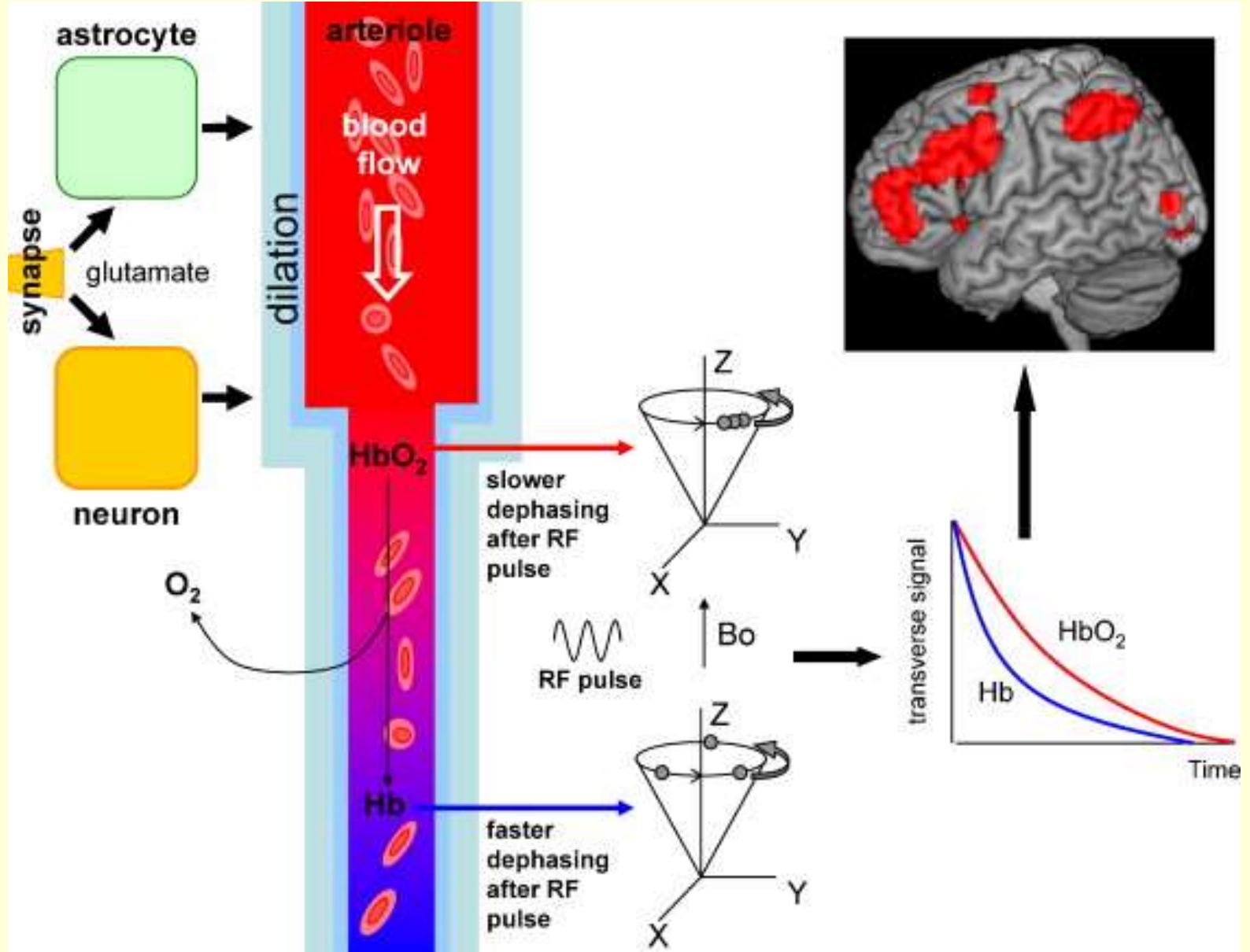


Le principe sur lequel s'appuie l'IRMf part du fait que les globules rouges du sang transportent l'oxygène fixée par l'**hémoglobine**, une protéine possédant un atome de fer.

En libérant l'oxygène, celle-ci devient de la **désoxy-hémoglobine**.

Or l'**hémoglobine** et la **désoxy-hémoglobine** ont des **propriétés magnétiques différentes** que détecte l'appareil d'IRMf.





Mais l'appareil d'IRMf doit aussi pondérer sa réponse en fonction de la **dilatation** des vaisseaux produite par les **astrocytes** qui « sentent » l'activité accrue des neurones.

Ce signal complexe a reçu le nom de **BOLD**  
(de l'anglais *blood-oxygen-level dependent*,  
« dépendant du niveau d'oxygène sanguin »)

## Neurophysiological and metabolic basis of the BOLD signal

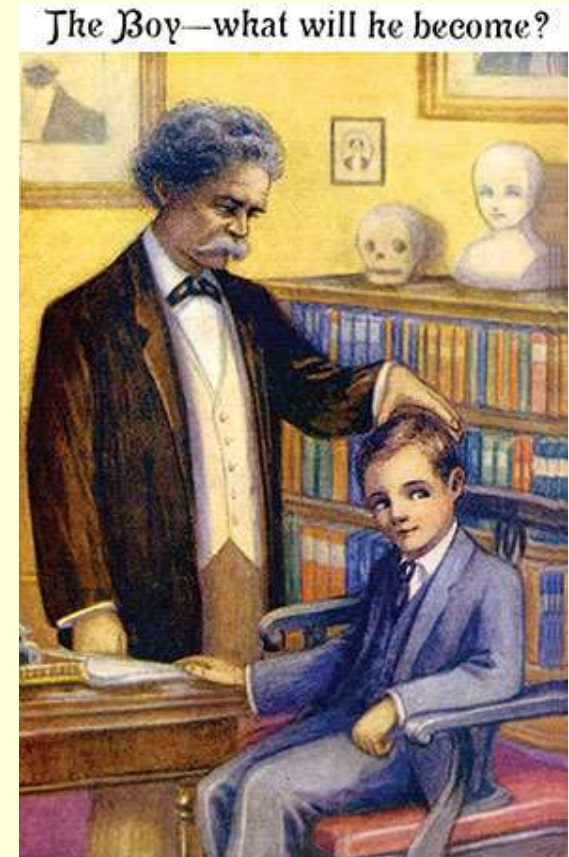
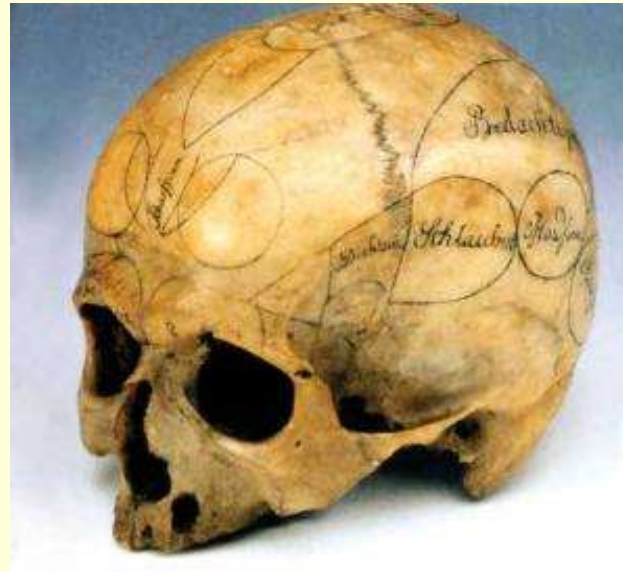
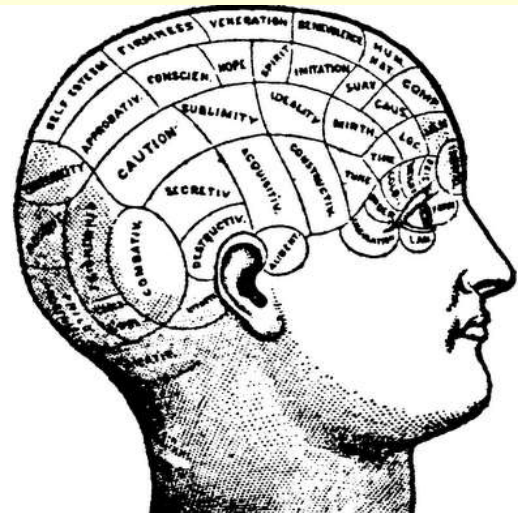


*How to interpret fMRI and compare it to other methods*

**S.F.W. Neggers**

*Rudolf Magnus Institute for Neuroscience, Division of Brain Research  
University Medical Center Utrecht  
([b.neggers@umcutrecht.nl](mailto:b.neggers@umcutrecht.nl))*

Mais l'IRMf ne serait en train de nous ramener à une forme moderne de la **phrénologie** ?

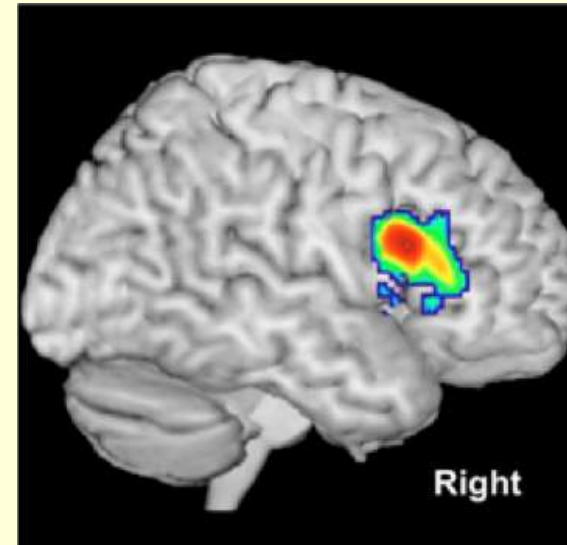


« Not this ridiculous fMRI phrenology shit again ! »

« La question du « **où dans le cerveau** » n'est sans doute pas la bonne question, car presque tout le cerveau est impliqué dans presque tous les comportements. »

- William Uttal

(auteur de *The New Phrenology: The Limits of Localizing Cognitive Processes in the Brain* (2001))



La “mauvaise” imagerie  
cérébrale serait celle qui ne  
prend pas en considération  
la **nature fondamentalement  
distribuée et réseauté** du  
cerveau humain,

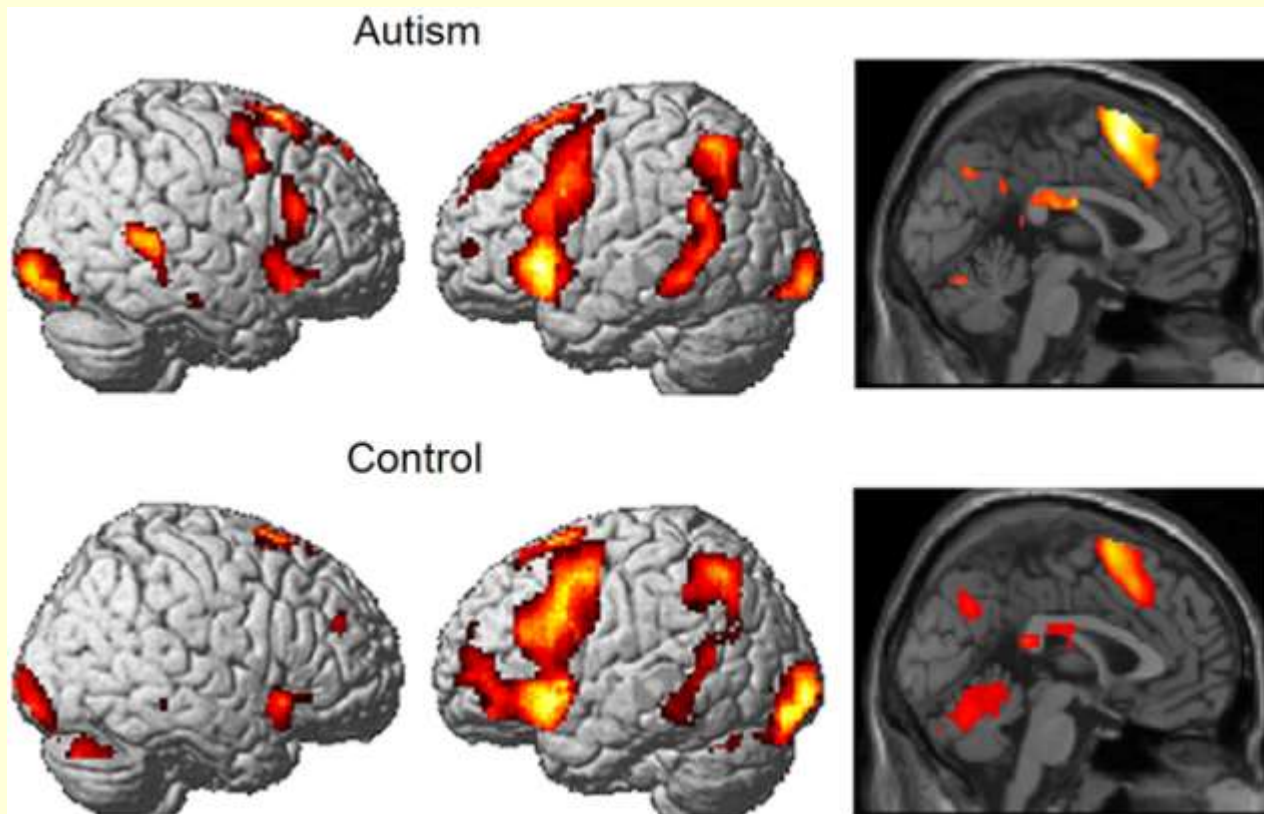
mettant l’emphase sur la  
localisation de l’activité  
neuronale alors que c’est la  
**communication entre les  
régions** qui est fondamentale  
pour nos fonctions cognitives.



Certain.e.s se portent donc à la défense de l'IRMf en disant qu'il s'agit là d'un mauvais usage d'un bon outil.

Et soulignent que beaucoup d'expériences en IRMf ne cherchent pas à localiser des fonctions cérébrales

mais justement à **cartographier les régions d'un système qui s'activent en différentes combinaisons pour différentes tâches.**



Diagnostiquer l'autisme de haut niveau & le syndrome d'Asperger à partir d'images cérébrales liées aux **pensées sociales** (PsychoMedia, décembre 2014)

<http://les-tribulations-dune-aspergirl.com/2014/12/04/diagnostiquer-lautisme-de-haut-niveau-le-syndrome-dasperger-a-partir-dimages-cerebrales-liees-aux-pensees-sociales-psycho-media-decembre-2014/>

Cela nous amène à parler de la tentation  
**des étiquettes fonctionnelles**



“Strict localization” :

**Nancy Kanwisher**

<http://nancysbraintalks.mit.edu/>



- ?
- The human mind and brain contains a set of highly specialized components, each solving a different, specific problem.

In that sense, yes we are glorified insects, cognitively.

- But at the same time:

we may have more of these specialized components

we may have a few extra fancy ones unique to humans

we *also* have general-purpose machinery enabling us to go beyond these narrow domains

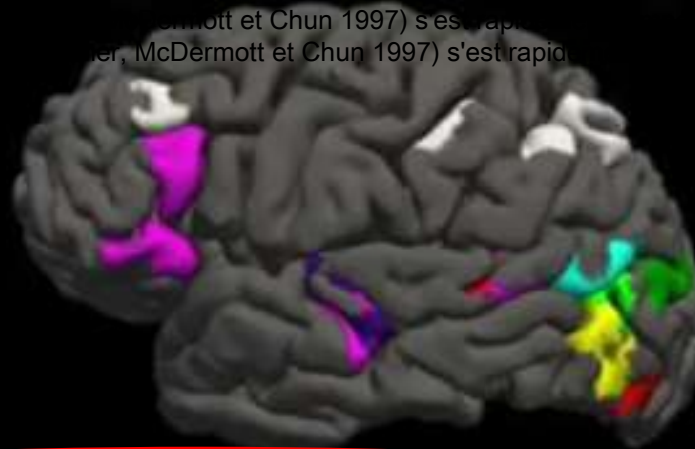
Plusieurs données remettent en question une conception très **spécialisée** des aires cérébrales héritée en grande partie de l'idée de **module spécialisé** (cognitivisme, Fodor...).

L'excitation suscitée par  
L'excitation suscitée p

“Strict localization” :

**Nancy Kanwisher**

<http://nancysbraintalks.mit.edu/>



- The human mind and brain contains a set of highly specialized components, each solving a different, specific problem.

In that sense, yes we are glorified insects, cognitively.

- But at the same time:

we may have more of these specialized components

we may have a few extra fancy ones unique to humans

we *also* have general-purpose machinery enabling us to go beyond these narrow domains

L'excitation suscitée par la découverte de « l'aire fusiforme de reconnaissance des visage » (Kanwisher, McDermott et Chun 1997) **s'est calmée rapidement** quand on a découvert que cette région **répond également aux voitures, aux oiseaux et à d'autres stimuli.**

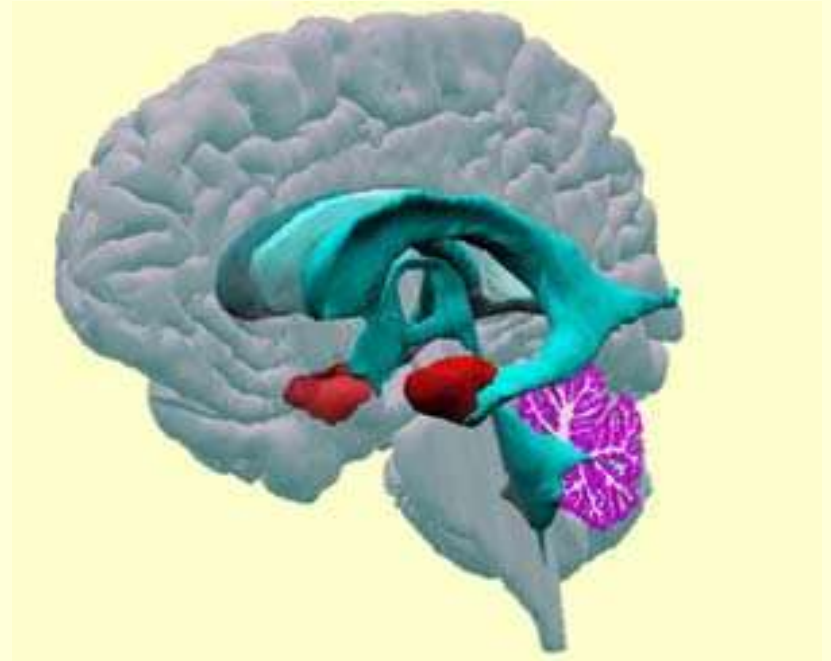
→ The “**expertise hypothesis**”

[https://en.wikipedia.org/wiki/Fusiform\\_face\\_area](https://en.wikipedia.org/wiki/Fusiform_face_area)

(Gauthier et al. 2000; Grill-Spector, Sayres, & Ress 2006; Hanson & Schmidt 2011; Rhodes et al. 2004).

Cela nous amène à parler de la tentation  
**des étiquettes fonctionnelles** avec quelques exemples :

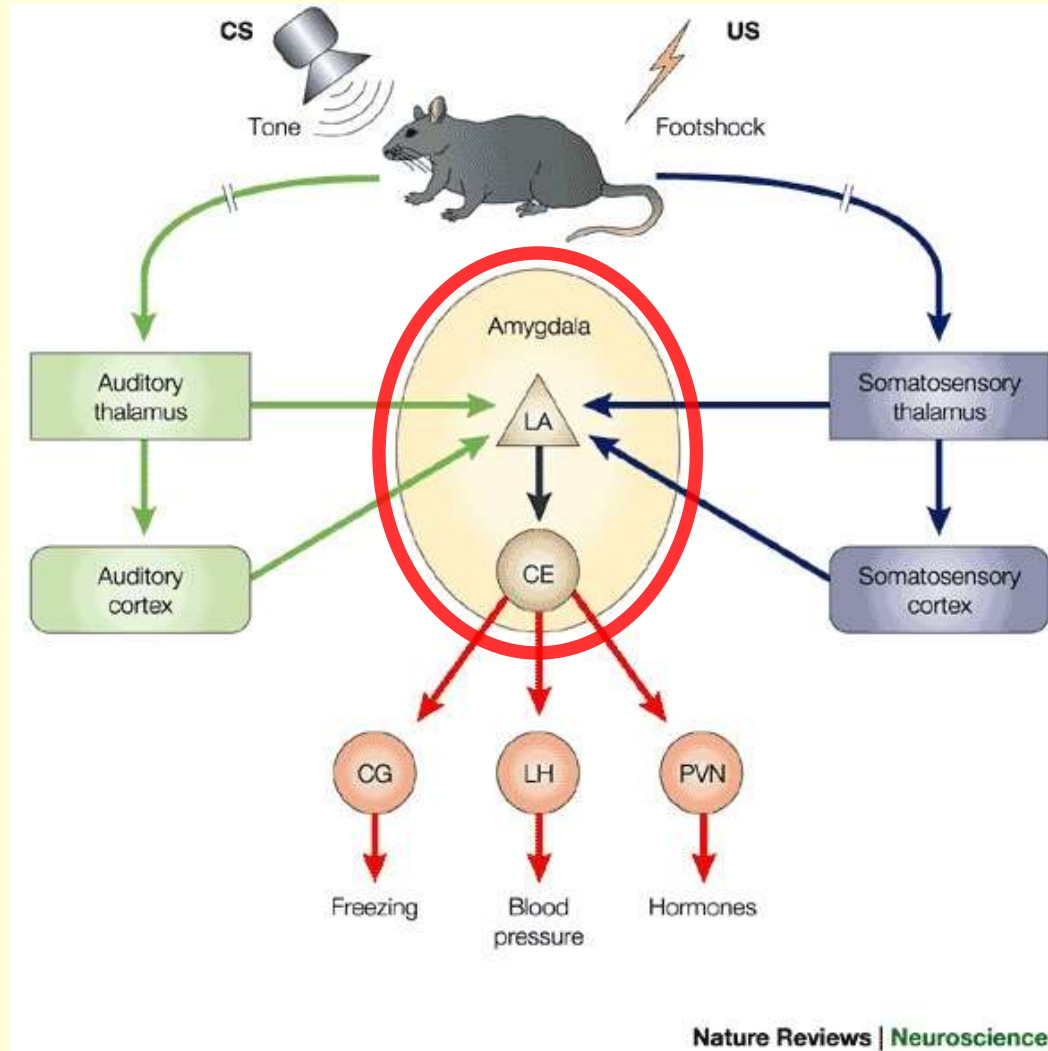
- l'amygdale
- l'insula
- l'aire de Broca
- le « cas » du cervelet



**Amygdale = peur ?**



Amygdala = peur ?



Nature Reviews | Neuroscience

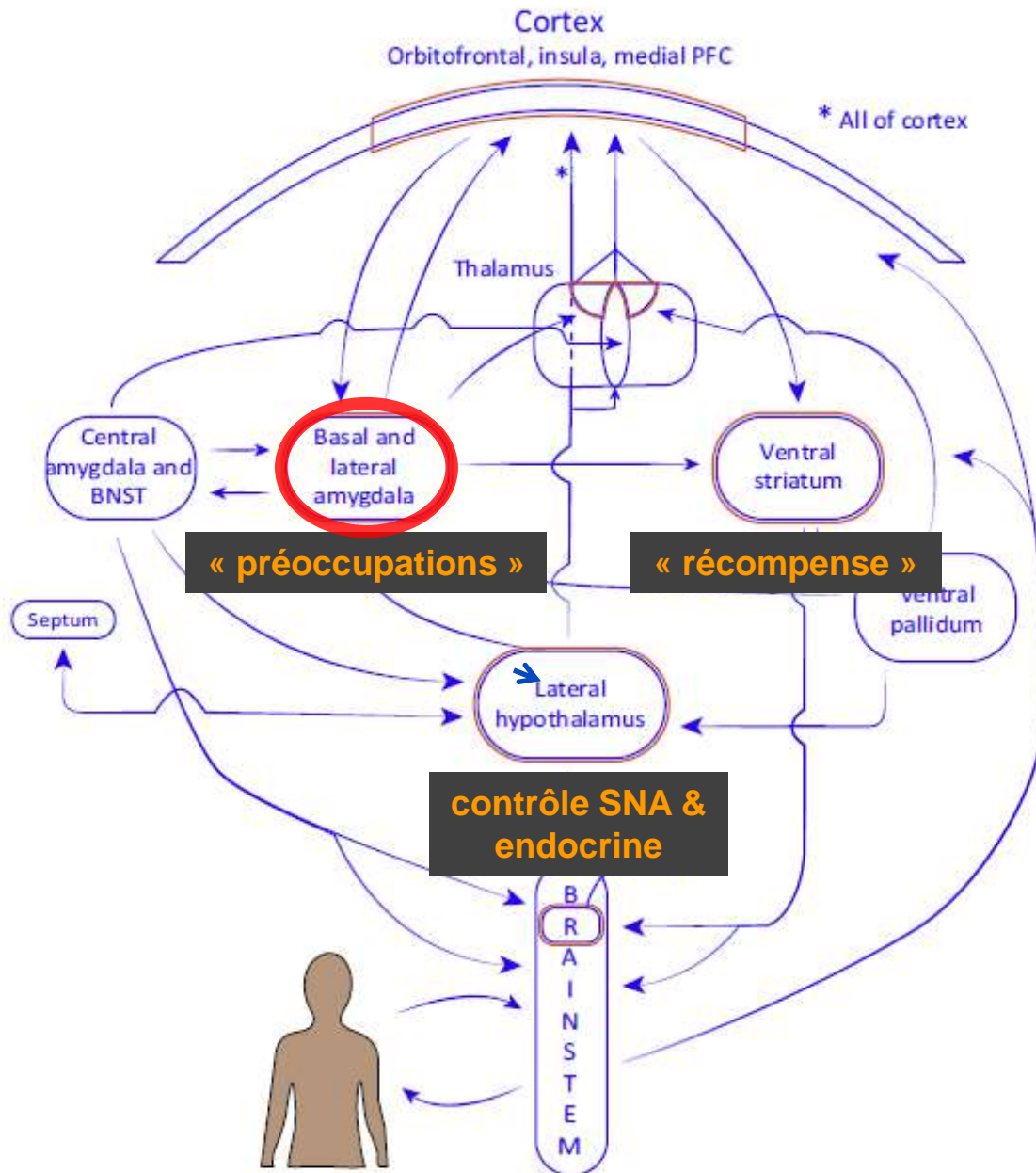
[https://www.researchgate.net/publication/11523425\\_Parallels\\_between\\_cerebellum\\_and\\_amygdala-dependent\\_conditioning](https://www.researchgate.net/publication/11523425_Parallels_between_cerebellum_and_amygdala-dependent_conditioning)



Amygdale ~~X~~ peur ?

**Non. Amène une composante de « préoccupation » qui, en collaboration avec d'autres régions, va correspondre à différents états affectifs.**





Autrement dit,  
**l'amygdale n'agit pas seule :**

**elle s'intègre dans différents circuits cérébraux impliquant plusieurs structures,**

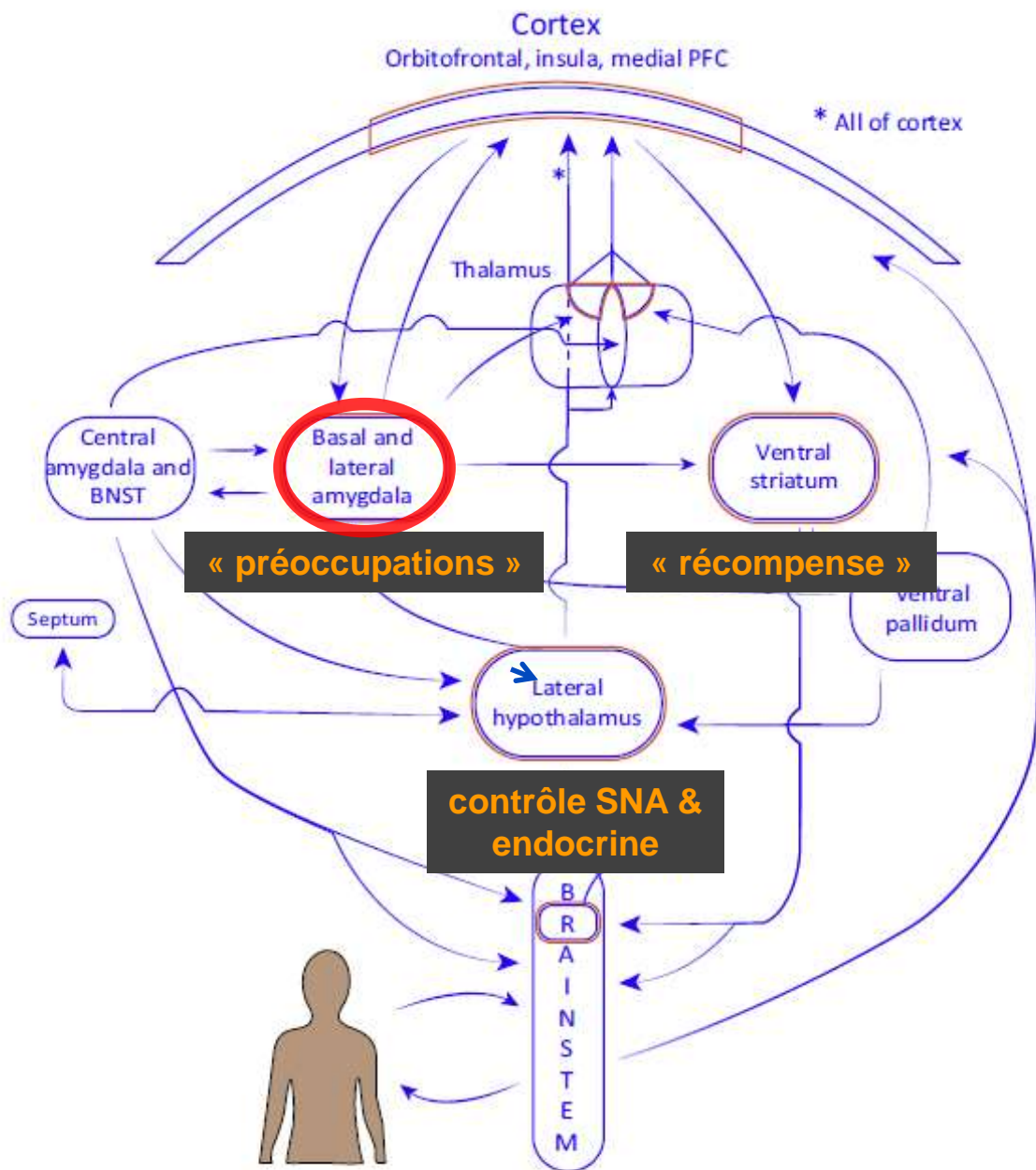
ici dans un réseau relié aux **émotions.**

### **A Network Model of the Emotional Brain**

Luiz Pessoa

Trends Cogn Sci. **2017** May; 21(5): 357–371

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5534266/>



a 'functional diversity profile'

For example, in the case of the **amygdala** mentioned above, it would involve **arousal, vigilance, novelty, attention, value determination, and decision making, among others.**

**A Network Model of the Emotional Brain**

Luiz Pessoa

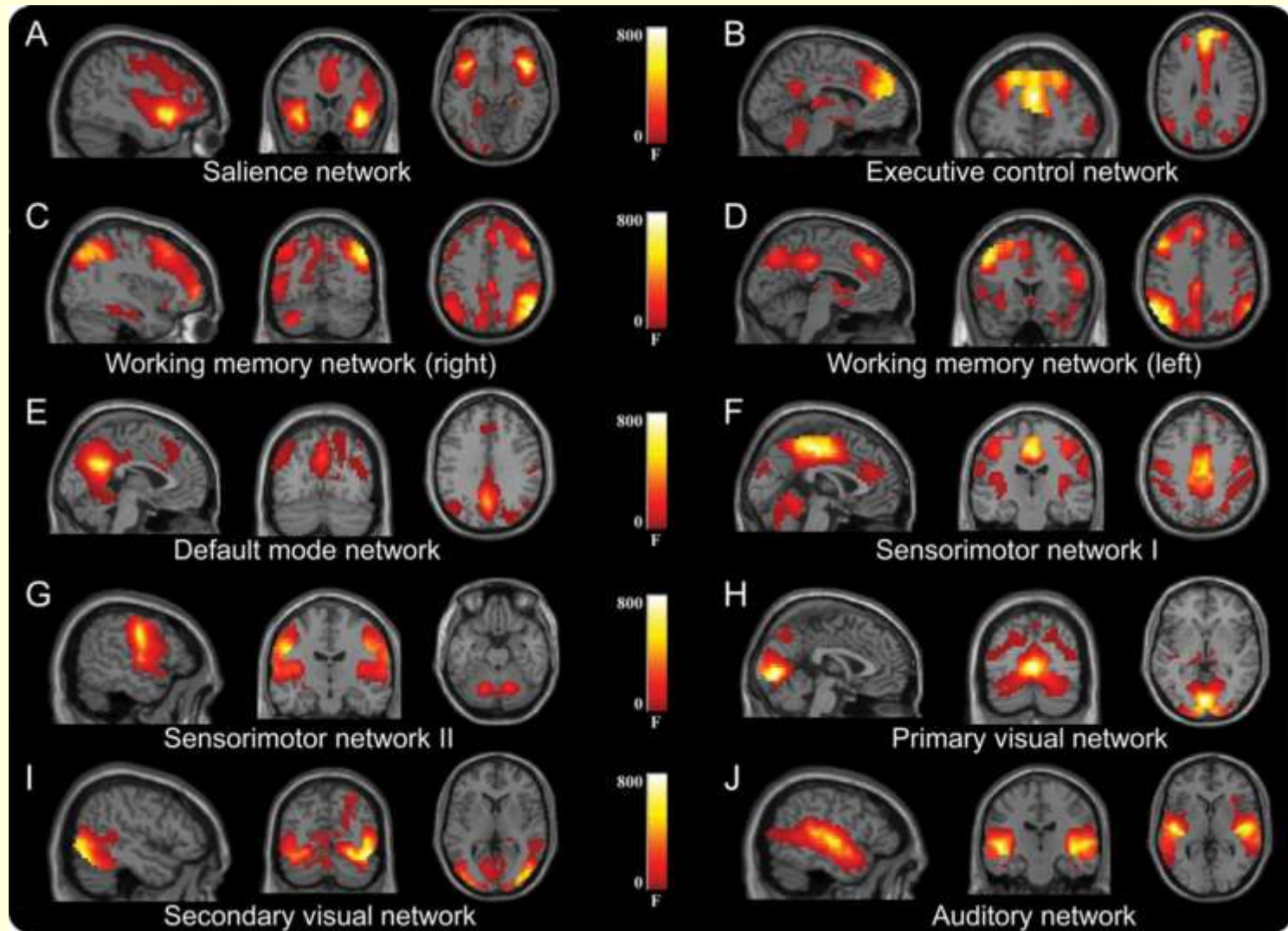
Trends Cogn Sci. **2017** May; 21(5): 357–371

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5534266/>



Si, comme on l'a vu, une structure cérébrale donnée (amygdale, insula, etc.) peut être active dans des situations très différentes, **c'est qu'elle n'agit pas seule.**

Elle s'intègre dans différents circuits cérébraux impliquant d'autres structures.



large. Given that every brain region is getting projections from and sending projections to a zillion other places, it is rare that an individual brain region is “the center for” anything. Instead it’s all networks where, far more often, a particular region “plays a key role in,” “helps mediate,” or “influences” a behavior. The function of a particular brain region is embedded in the context of its connections.

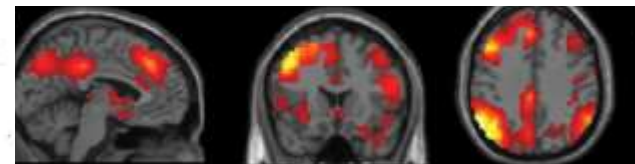


# BEHAVE

THE BIOLOGY  
of HUMANS at OUR  
BEST and WORST



ROBERT M.  
SAPOLSKY



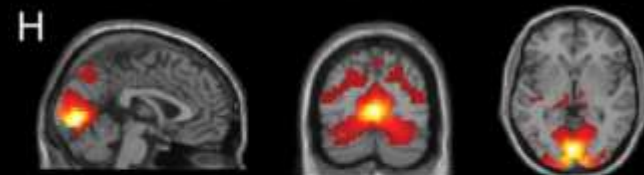
Working memory network (left)



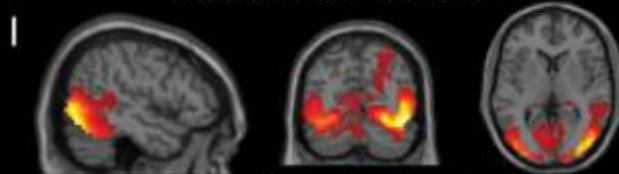
Sensorimotor network I



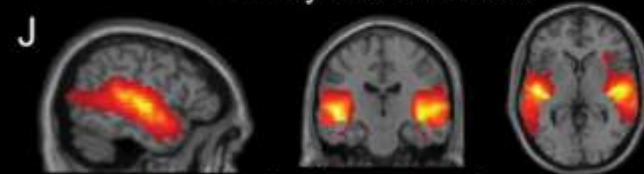
Sensorimotor network II



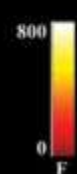
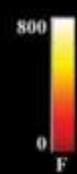
Primary visual network



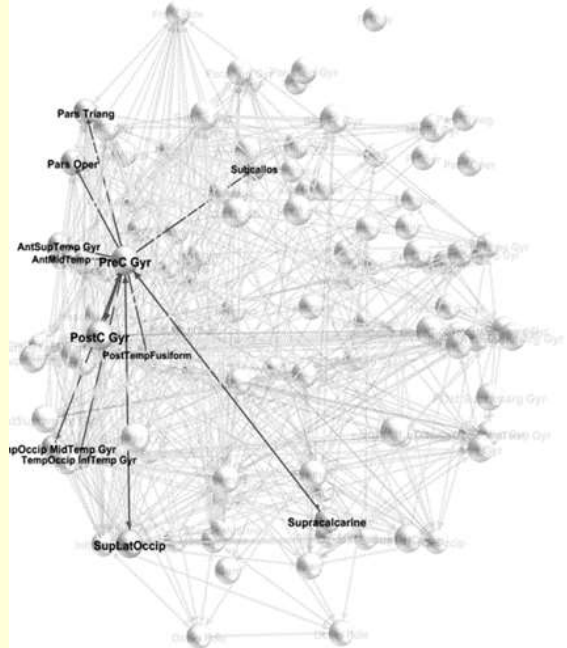
Secondary visual network



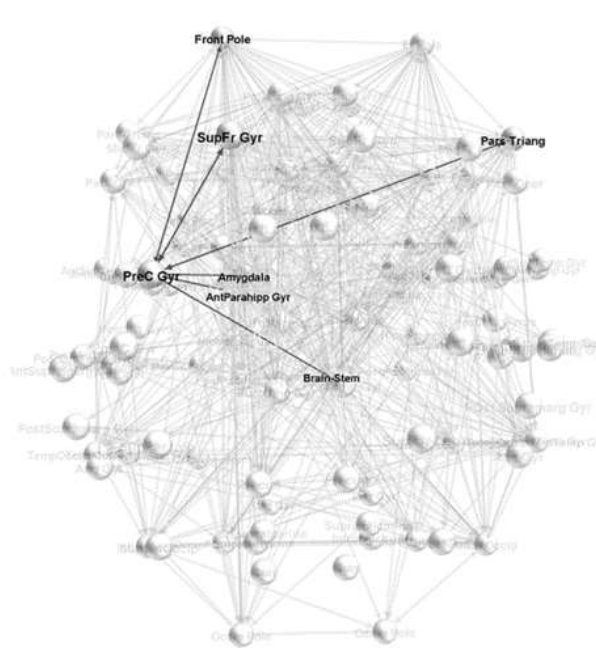
Auditory network



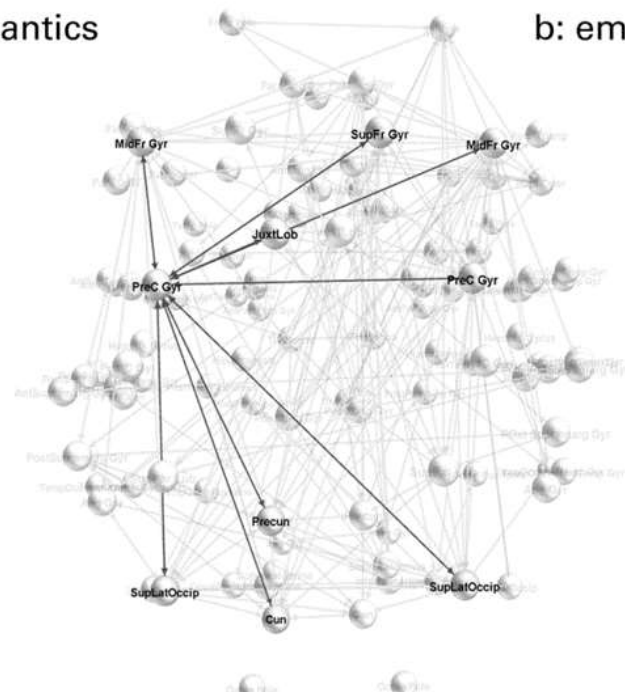
Exemple d'une **même structure** cérébrale impliquée dans **différents réseaux** dans **différentes situations**.



a: semantics



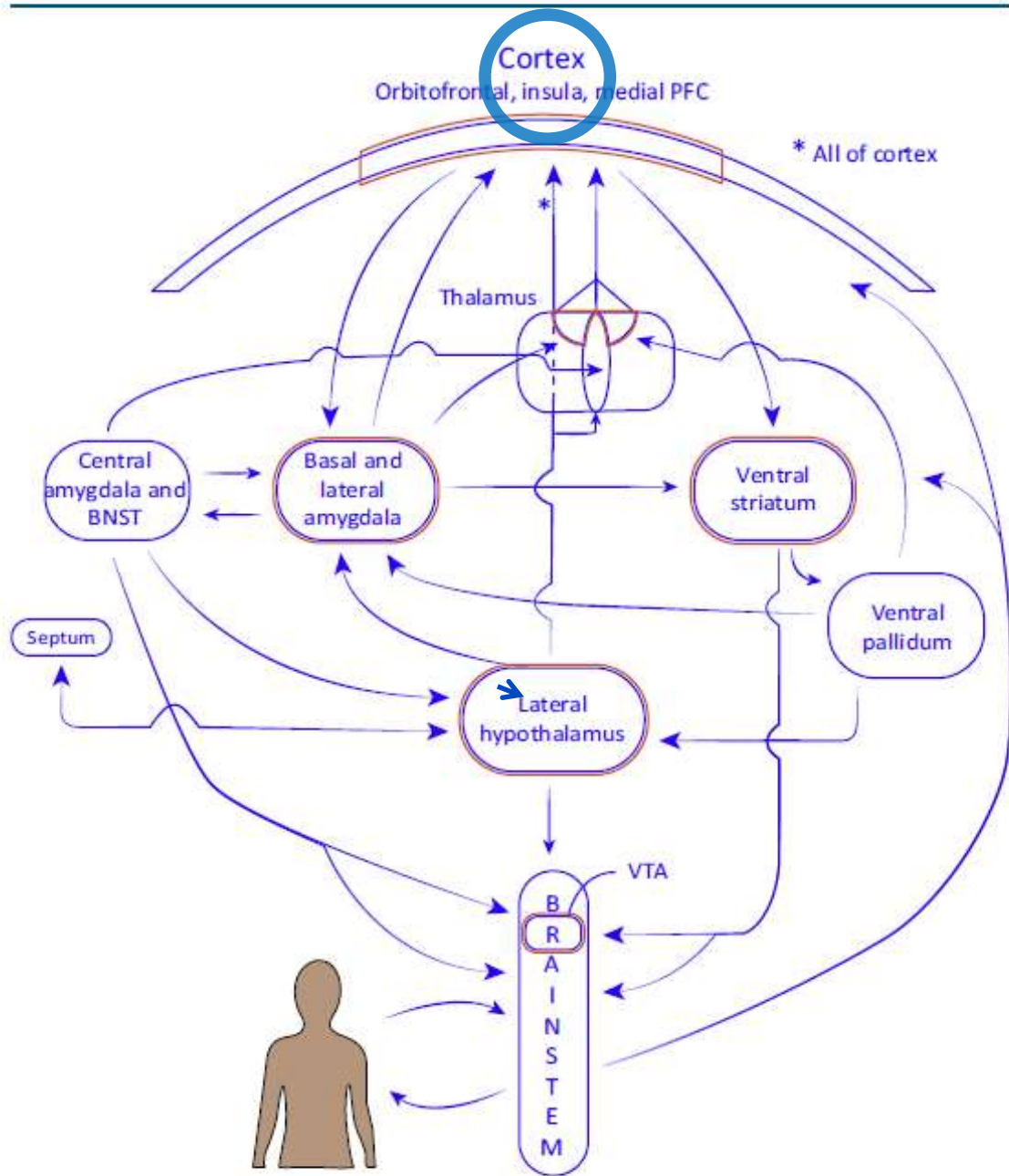
b: emotion



c: attention

Cela nous amène à parler de la tentation  
**des étiquettes fonctionnelles** avec quelques exemples :

- l'amygdale
- **l'insula**
- l'aire de Broca
- le « cas » du cervelet



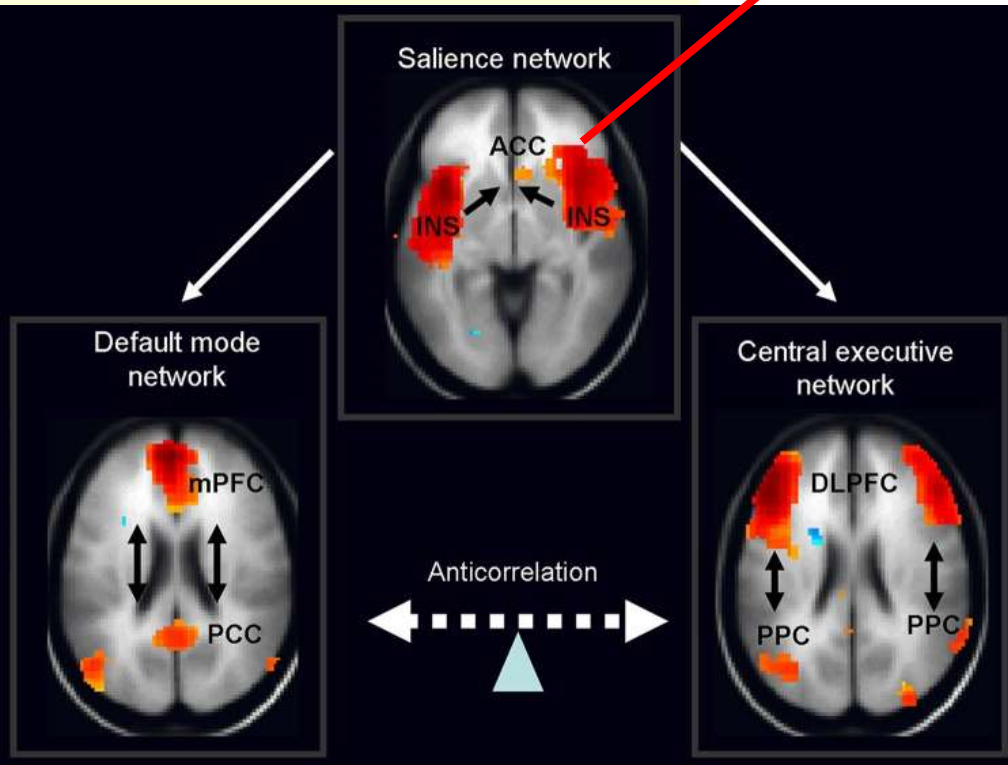
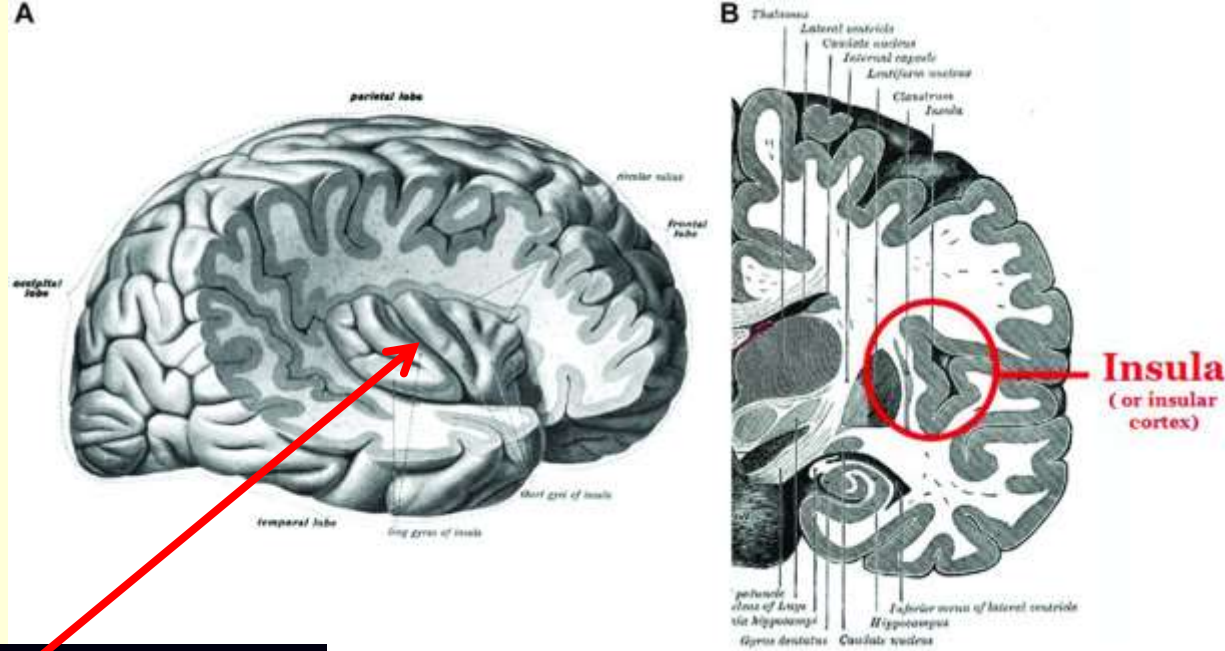
The **insula** is a brain structure implicated in **disparate** cognitive, affective, and regulatory functions, including **interoceptive** awareness, **emotional** responses, and **empathic** processes.

In task-based functional imaging, it has been **difficult to isolate insula responses** because it is often **coactivated** with the ACC, the DLPFC and ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC), and the PPC.

→ activée par un **dégoût** alimentaire

→ aussi en présence de caractéristiques propres au « **out group** » (i.e. « Eux »).

Un exemple de **recyclage neuronale** (3<sup>e</sup> bloc)



Et il ne faut jamais oublier que **l'insula** fait partie, comme toute structure cérébrale, de **différents grands réseaux** comme ici le « réseaux de la saillance »

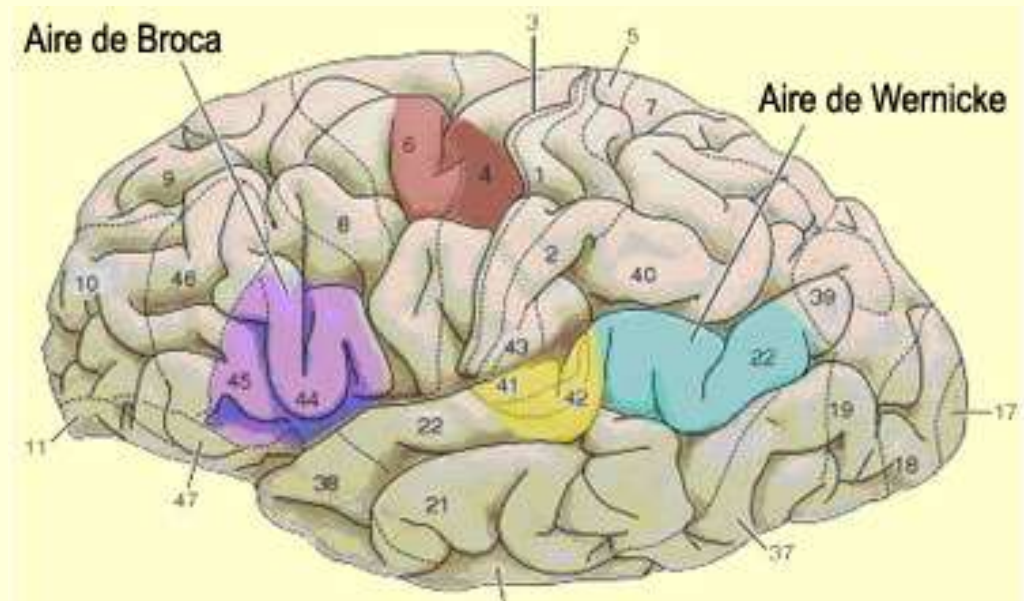
Cela nous amène à parler de la tentation  
**des étiquettes fonctionnelles** avec quelques exemples :

- l'amygdale
- l'insula
- **l'aire de Broca**
- le « cas » du cervelet

Pour illustrer comment il semble y avoir, en réalité, très peu de régions cérébrales dédiées à une fonction cognitive unique, prenons une méta-analyse de 3 222 études d'imagerie cérébrale effectuée par Russell Poldrack en 2006.

L'**aire de Broca**, typiquement associée au langage, s'activait effectivement lors d'une tâche langagière.

Mais elle était **plus fréquemment** activée dans des tâches **non langagières** que dans des tâches reliées au langage !



**Le BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

[Après « L'erreur de Descartes », voici « L'erreur de Broca »](#)

[Parler sans aire de Broca](#)

[Repenser la contribution de l'aire de Broca au langage](#)

L'aire de Broca a probablement déjà rempli certaines fonctions sensorimotrices qui se sont par la suite avérées utiles pour l'émergence du langage (et **ces fonctions premières sont conservées !**).

Et de la même façon, il semblerait que la plupart des régions du cerveau, et même des régions très petites, peuvent être activées par **de multiples tâches**.



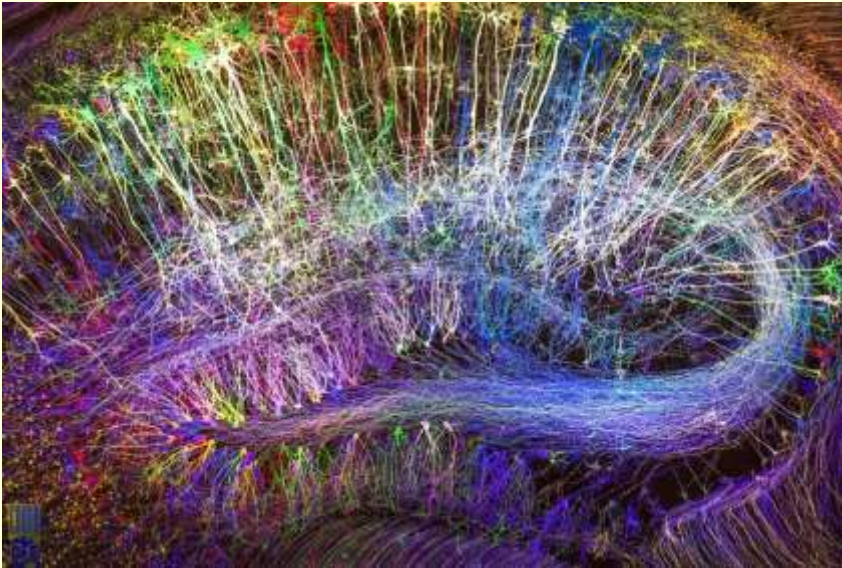


Cela dit, ce n'est pas parce qu'il y a très peu de chance de trouver des « centre de » quoi que ce soit dans le cerveau que l'on ne peut pas y trouver des structures cérébrales bien **différenciées** avec circuits neuronaux aux **capacités computationnelles particulières** comme :

**l'hippocampe**

ou

**le cervelet.**



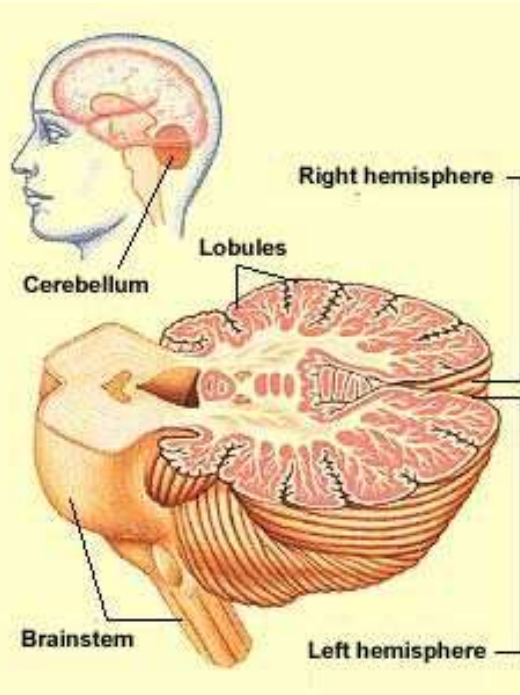
**Mais on ne peut leur accoler une étiquette fonctionnelle unique.**

Cela nous amène à parler de la tentation  
**des étiquettes fonctionnelles** avec quelques exemples :

- l'amygdale
- l'insula
- l'aire de Broca
- le « cas » du cervelet

À mesure que le corps des animaux s'est complexifié durant l'évolution, Il a reçu une pression adaptative pour être plus efficace.

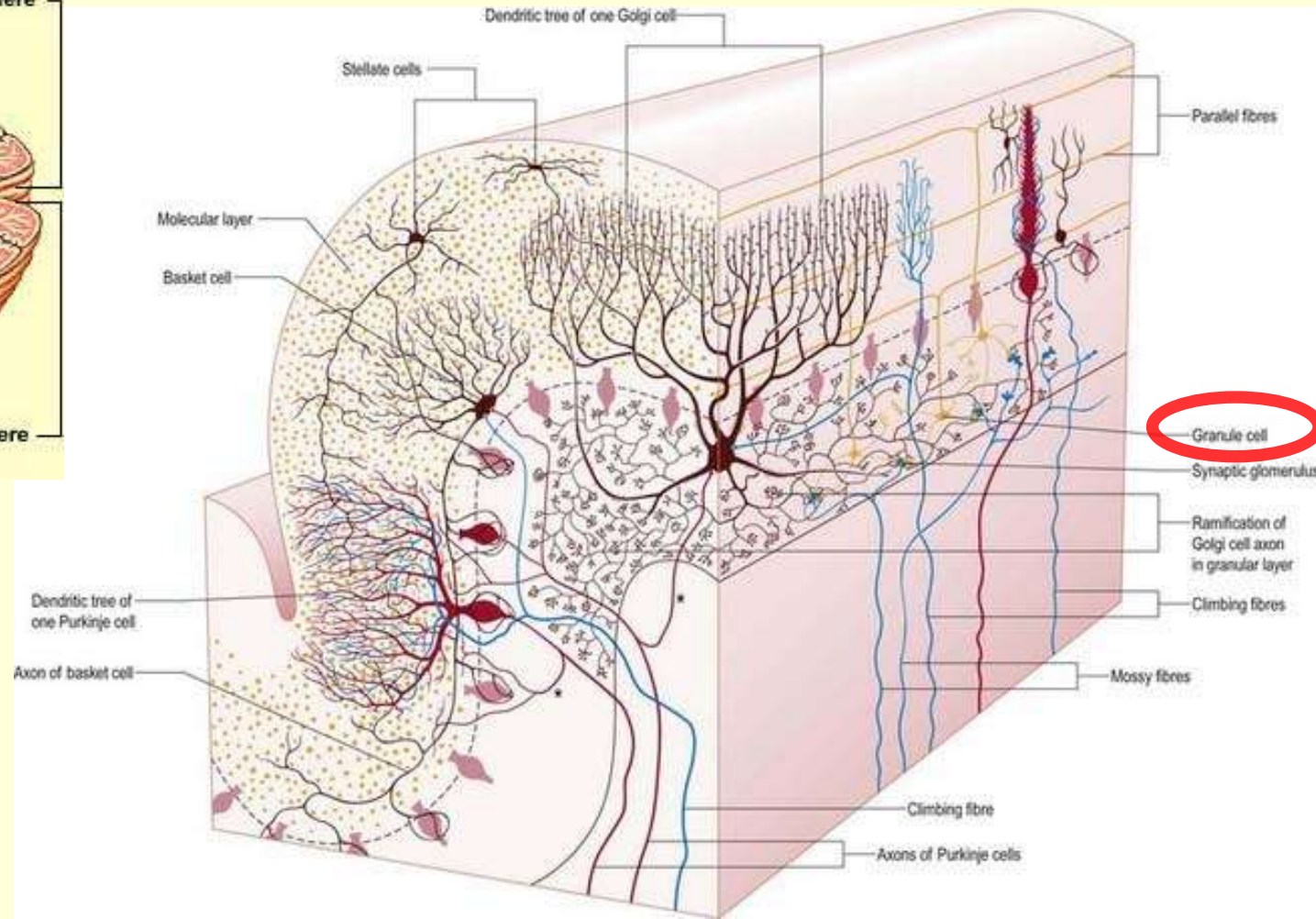
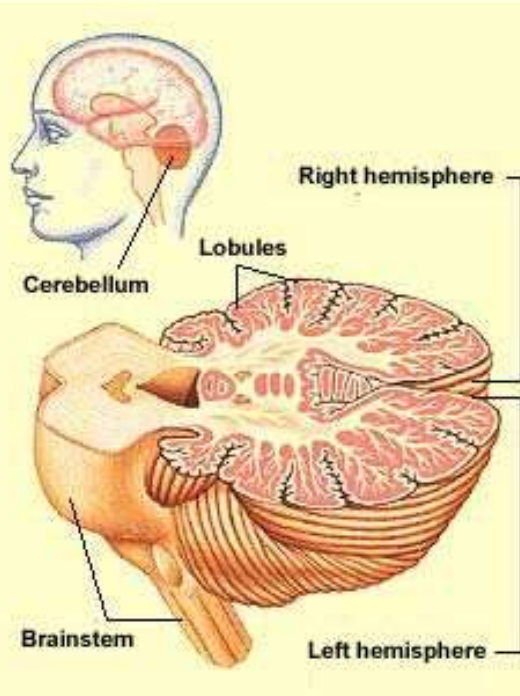
Et une structure cérébrale qui a été très impliquée dans ce processus : le **cervelet**.



- Il y a environ **86 milliards** de neurones dans le cerveau humain.
- Le **cortex** représente environ **80%** du poids du cerveau et comprend environ **16 milliards** de neurones.
- Le **cervelet** représente environ **10%** du poids du cerveau et comprend environ **69 milliards** de neurones.

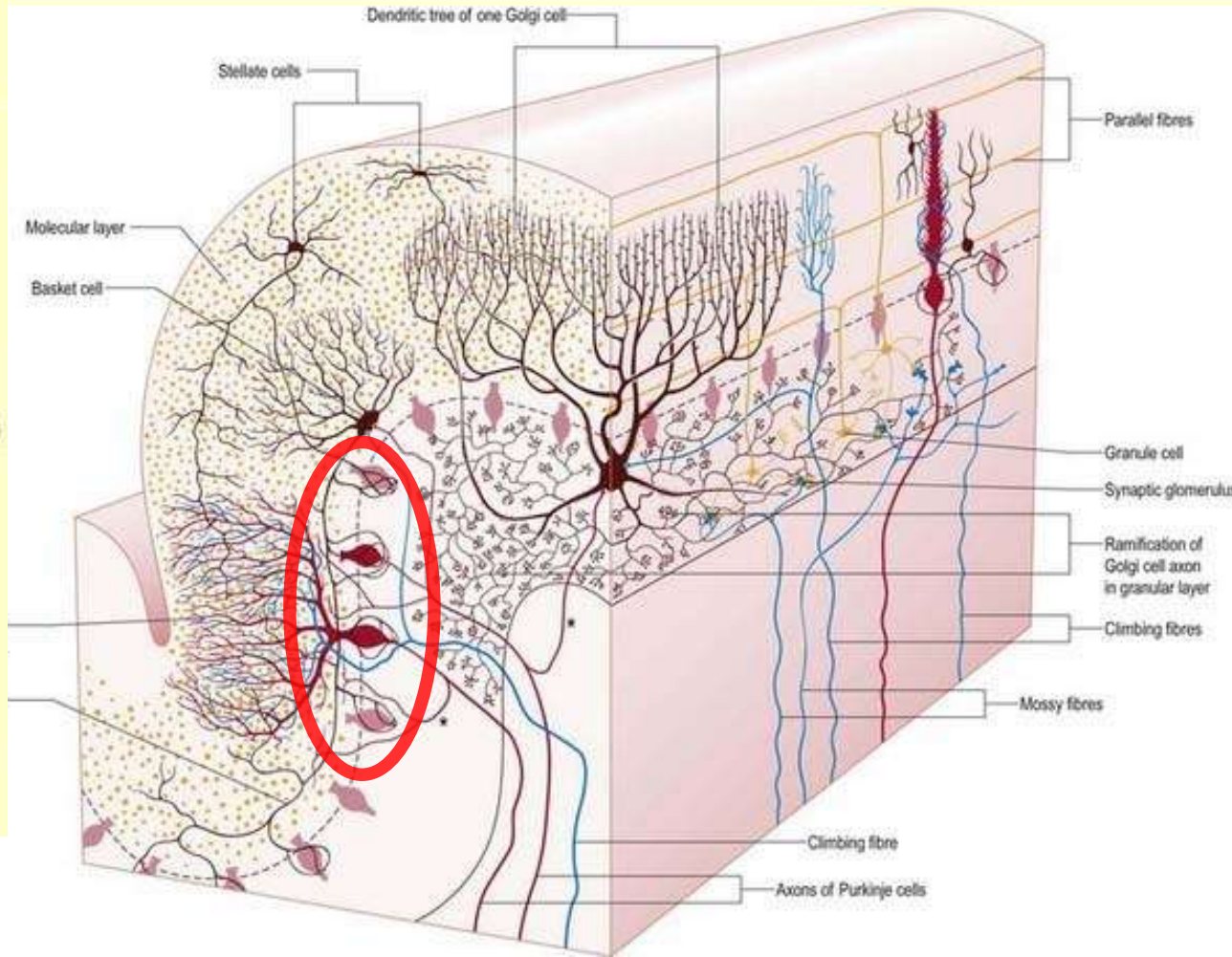
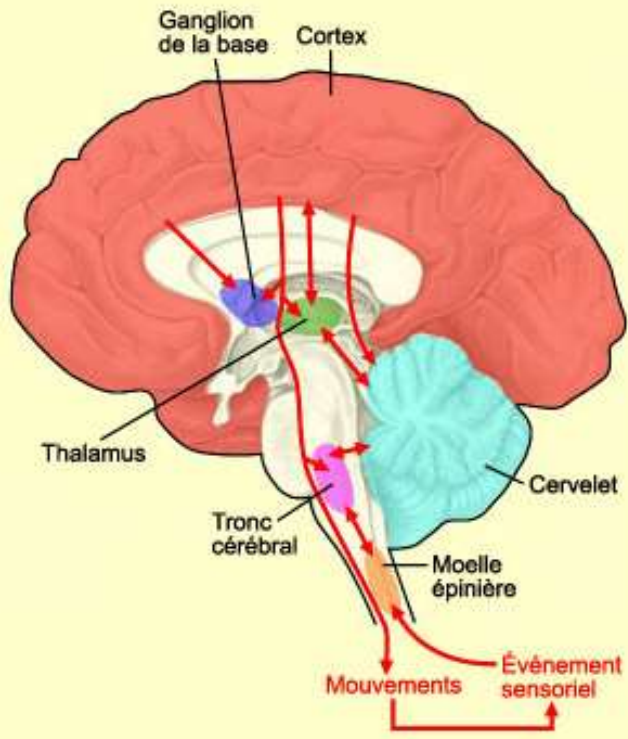
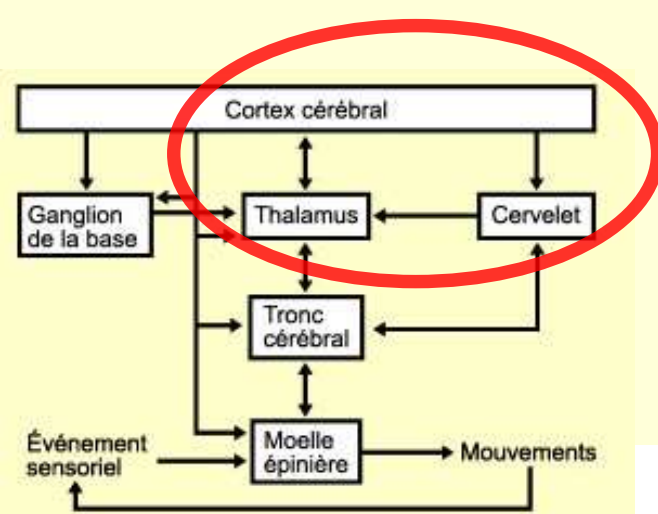
→ Donc plus des trois quart des neurones de notre cerveau sont dans le **cervelet** !

→ Et ce sont des **cellules granulaires**.



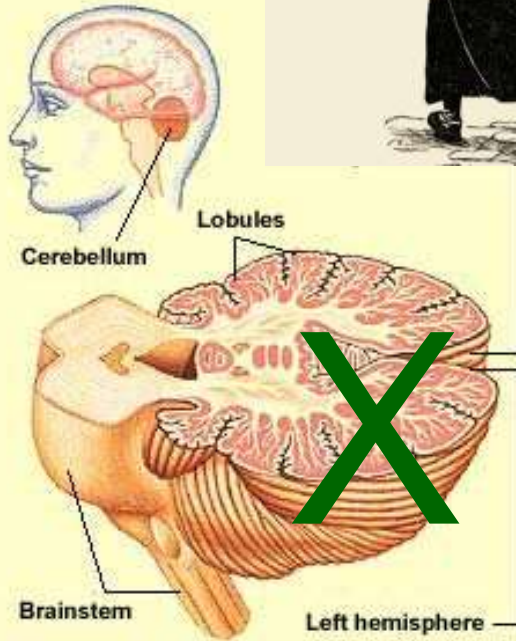
Chaque signal cérébral est traité par environ 10 000 **cellules granulaires** du cervelet qui comptent parmi les plus petits neurones du cerveau.

Puis, le calcul est simplifié : environ 200 000 cellules granulaires sont reliées à une seule **cellule de Purkinje** qui envoie un signal en retour au reste du cerveau.





Les patients atteints de lésions cérébelleuses ont des difficultés à se déplacer ou présentent des troubles de la motricité fine.  
(ce qui est le plus handicapants pour les patients qui s'en plaignent)



**Le cervelet semblait donc essentiellement impliqué dans la coordination et la synchronisation des mouvements.**

Sauf que...

« Si vous regardez l'activité du cervelet en imagerie cérébrale, vous constatez qu'environ 70 % de ses neurones n'ont apparemment presque rien à voir avec le contrôle moteur.

**Seuls 30 % s'activent vraiment quand on réalise des mouvements.**

Il est maintenant clair que cette structure est impliquée dans tous les processus pour lesquels nous utilisons également le reste de notre cerveau : **les pensées, les émotions, le langage et même la mémoire** » - Jörn Diedrichsen, neuropsychologue .

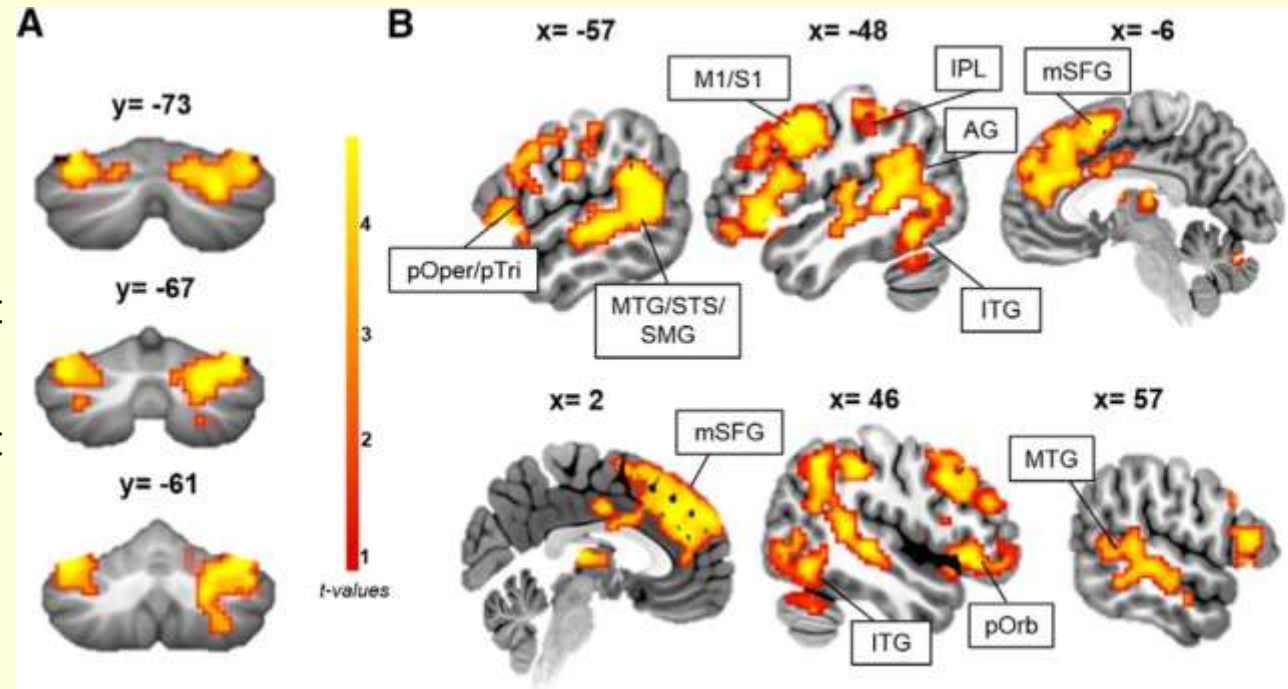
## Exemple : **Sentence completion activates the reading and language network.**

Par conséquent, le cervelet :

- « s'allume » dans presque toutes les tâches en imagerie cérébrale
- son activation est souvent moins analysée au profit du cortex, mieux connu et plus « valorisé »

### Anecdote révélatrice :

Diedrichsen reçoit souvent des emails de collègues qui lui demandent pourquoi le cervelet s'active lors de telle ou telle tâche et s'ils n'ont pas fait une erreur lors de la collecte des données...



A, **Cerebellar** results of conjunction analysis across the three task conditions (predictive, nonpredictive, and scrambled) show **activation** of left VI/Crus I and right lobules VI/Crus I/Crus II.

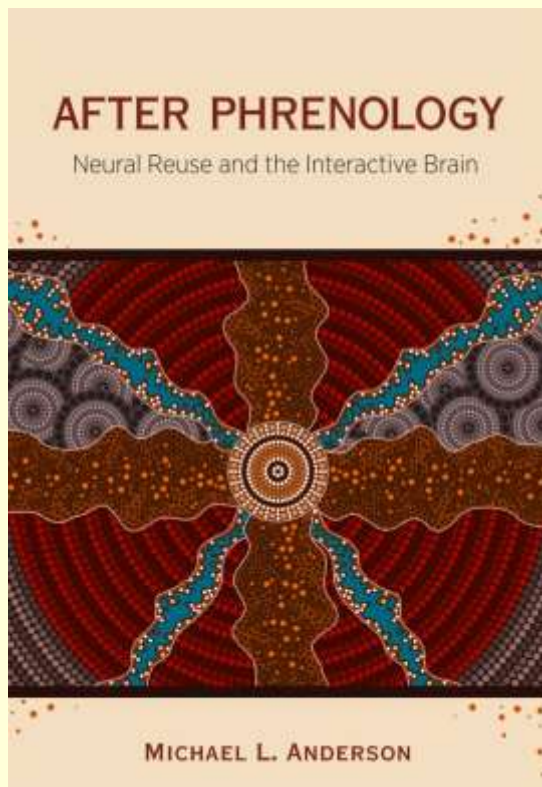
B, **Cerebellar activation** during **sentence processing** is concurrent with supratentorial activation in the **reading and language network**.



Le **BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Lundi, 9 mars 2015

## La « réutilisation neuronale » pour enfin sortir de la phrénologie ?



Dans son livre *After Phrenology :  
Neural Reuse and the Interactive Brain,*

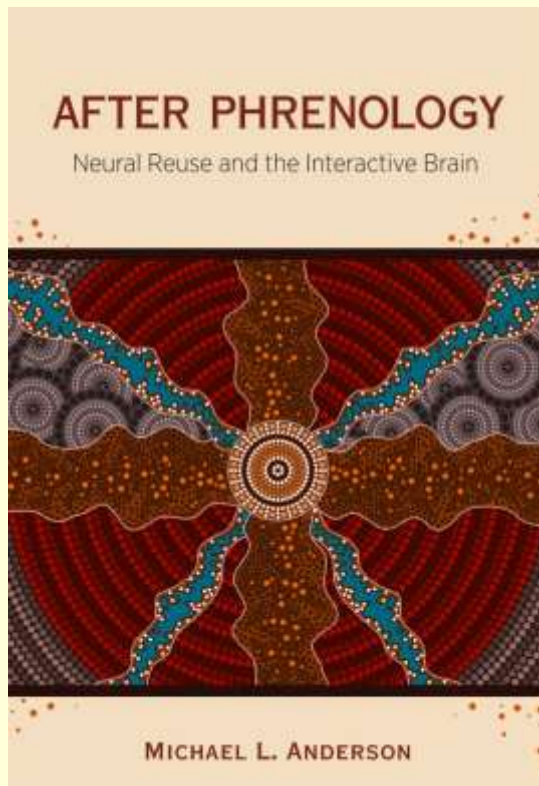
**Michael Anderson** nous propose  
d'aller au-delà de la phrénologie

avec une approche alternative  
fondée sur ce qu'il appelle  
la « **réutilisation neuronale** »

(« neural reuse », en anglais,  
un cas de recyclage neuronal).







avec une approche alternative fondée sur ce qu'il appelle la « **réutilisation neuronale** »

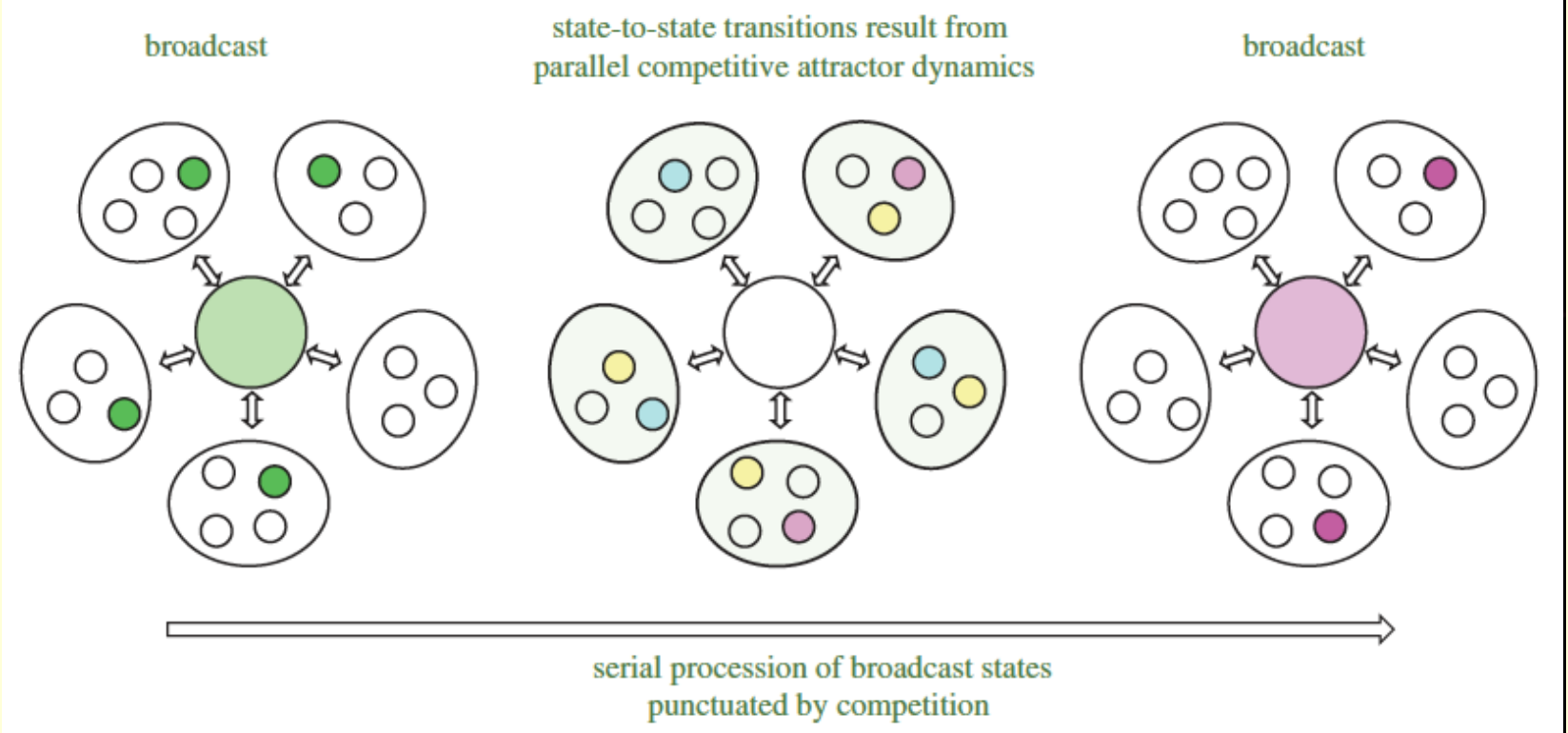
(« neural reuse », en anglais, un cas de recyclage neuronal).





On se rend compte que le cerveau est anatomiquement « surconnecté » et doit trouver une façon de **mettre en relation** (de « synchroniser » ?) à tout moment les meilleures « assemblées de neurones » pour faire face à une situation.

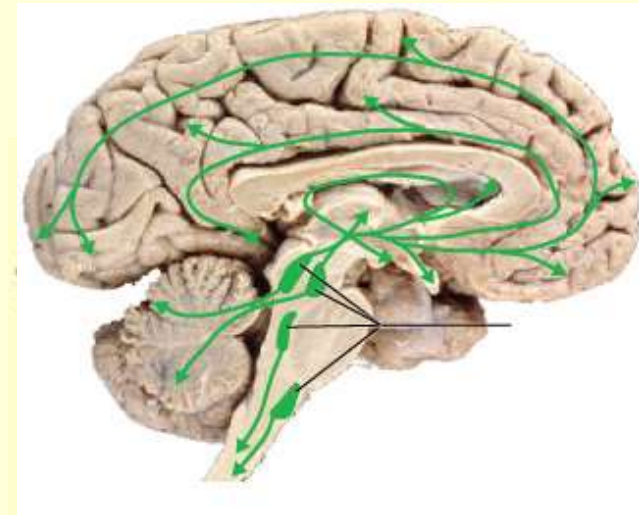




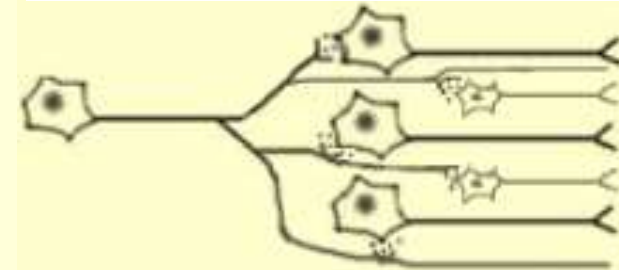
On se rend compte que le cerveau est anatomiquement « surconnecté » et doit trouver une façon de **mettre en relation** (de « synchroniser » ?) à tout moment les meilleures « assemblées de neurones » pour faire face à une situation.



Il devient alors nécessaire de postuler l'existence de mécanismes capables de faire en sorte que ces différentes régions différenciées **se trouvent** et puissent **collaborer ensemble** pour former des **réseaux** fonctionnels.

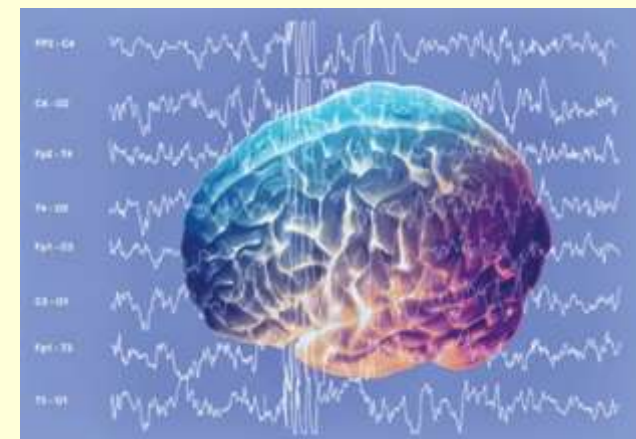


Parmi les mécanismes de recherche de coalitions, Anderson mentionne par exemple la sélection de circuits latents grâce à la **neuromodulation** qui vont permettre d'aller chercher le bon sous-ensemble de régions pour une situation donnée.



**Neuromodulation**

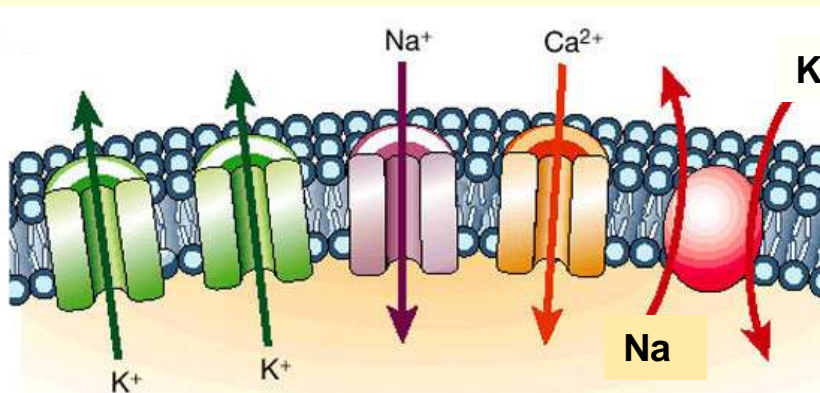
On pense aussi clairement ici à des phénomènes comme la **synchronisation d'activité oscillatoire** des neurones.



György Buzsáki : les phénomènes **fluctuants (ou cycliques)** comme les oscillations neuronales sont omniprésents dans la nature.

Il suffit que **deux forces s'opposent** pour que le calme plat soit rapidement **remplacé par un rythme**.

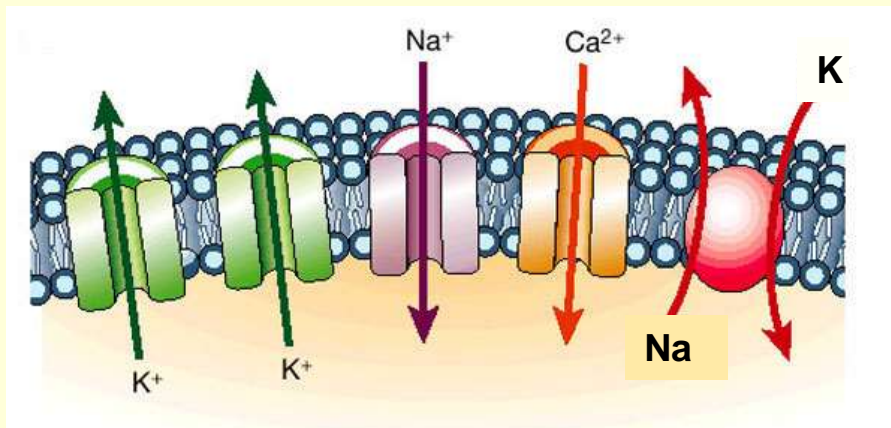
Et notre cerveau regorge de forces qui s'opposent, à commencer par les **canaux ioniques** qui **dépolarisent** ou **hyperpolarisent** les neurones.



György Buzsáki : les phénomènes **fluctuants (ou cycliques)** comme les oscillations neuronales sont omniprésents dans la nature.

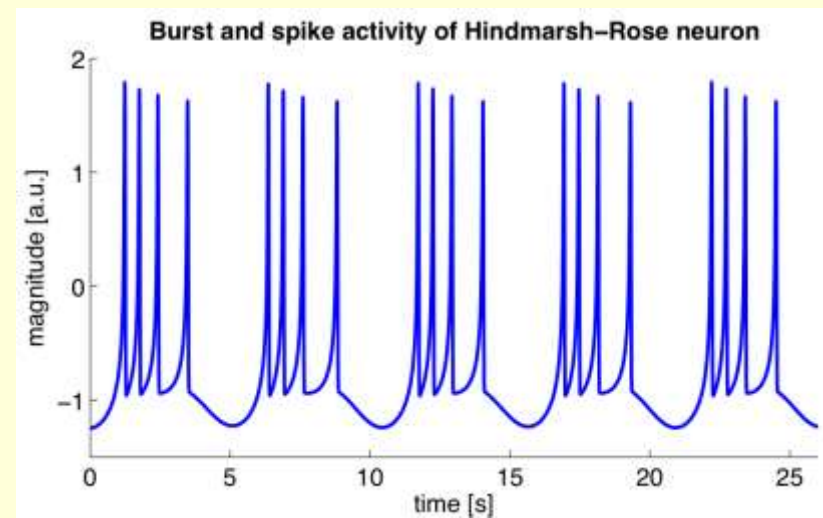
Il suffit que **deux forces s'opposent** pour que le calme plat soit rapidement **remplacé par un rythme**.

Et notre cerveau regorge de forces qui s'opposent, à commencer par les **canaux ioniques** qui **dépolarisent** ou **hyperpolarisent** les neurones.

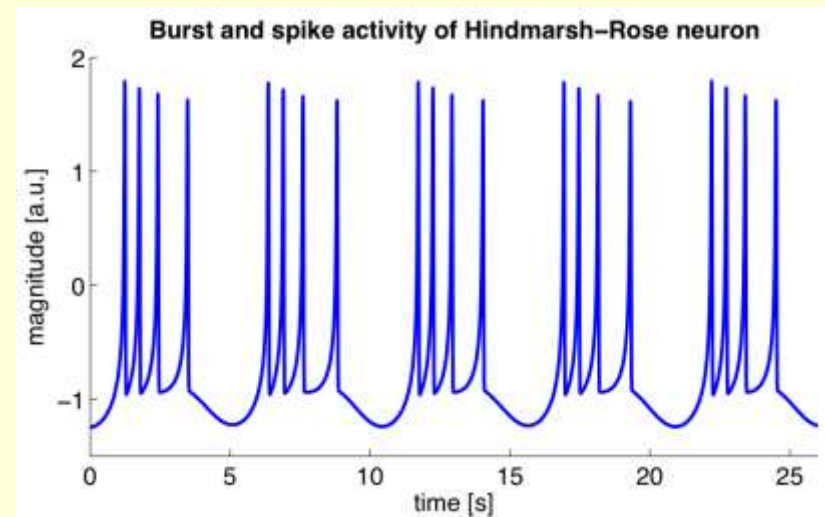
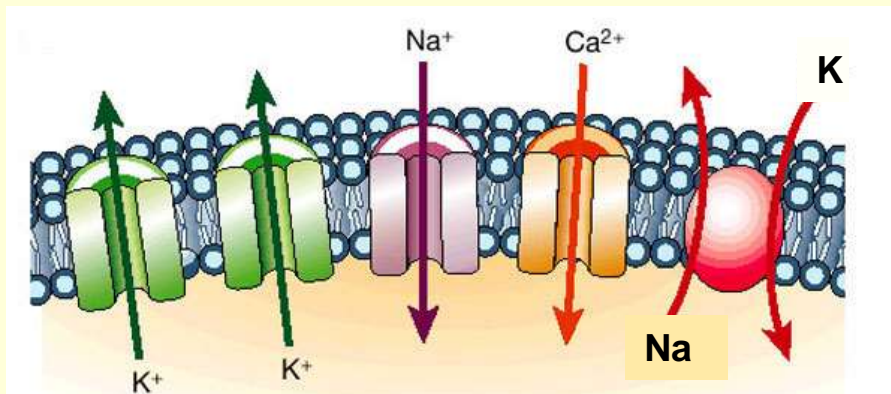
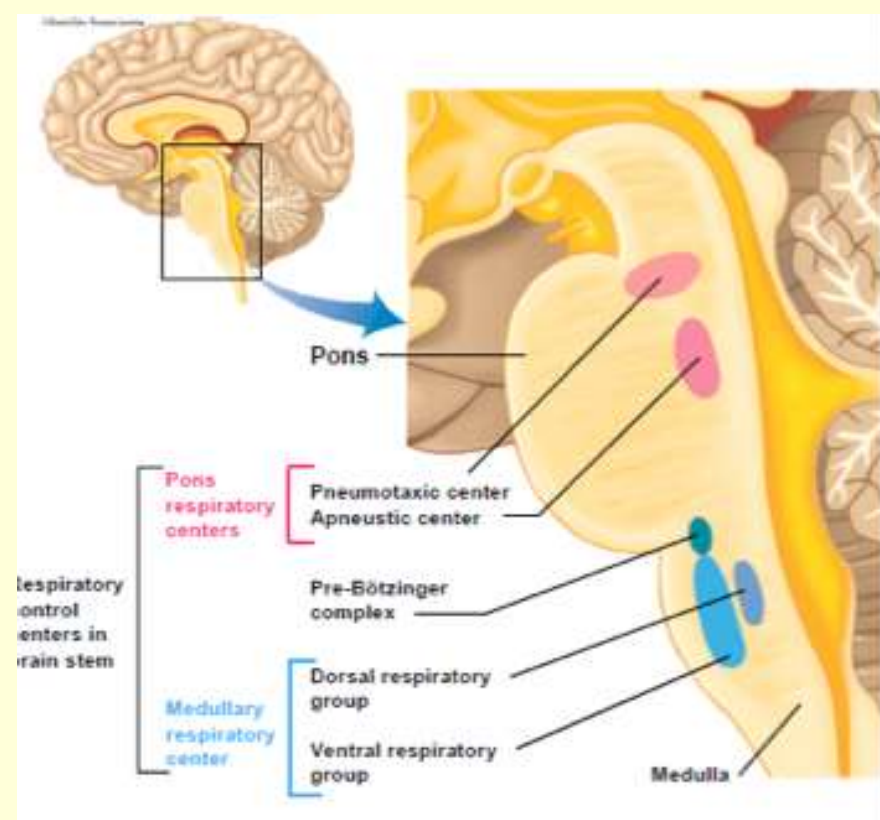


Et c'est ce qui va permettre à de nombreux neurones d'avoir une **activité spontanée**

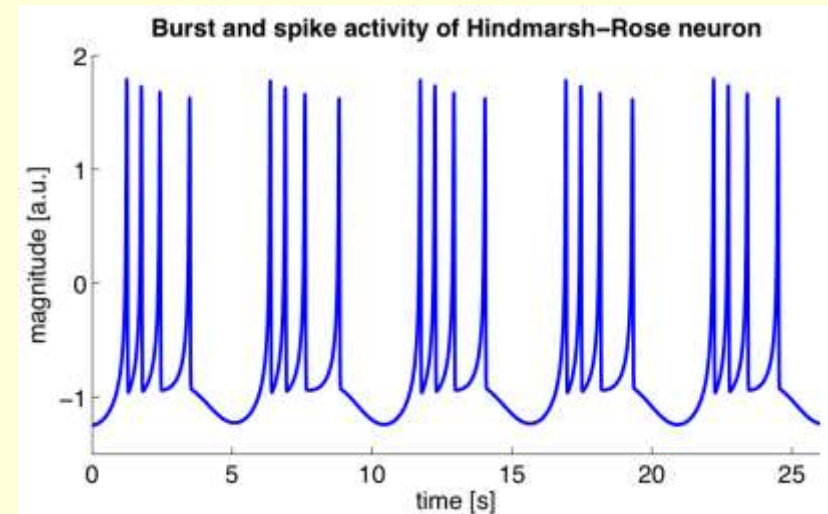
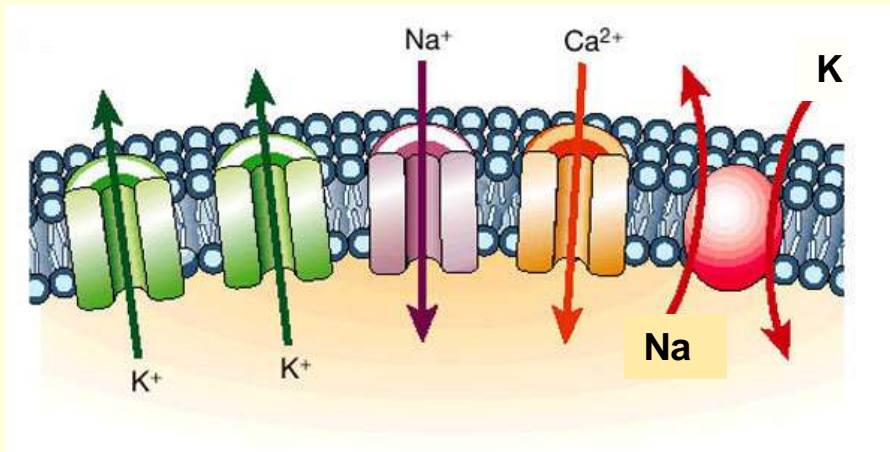
dont le rythme et la signature varie, mais qui peuvent faire des **bouffées rythmiques**, par exemple.



Exemple :  
**les centres respiratoires**  
du tronc cérébral



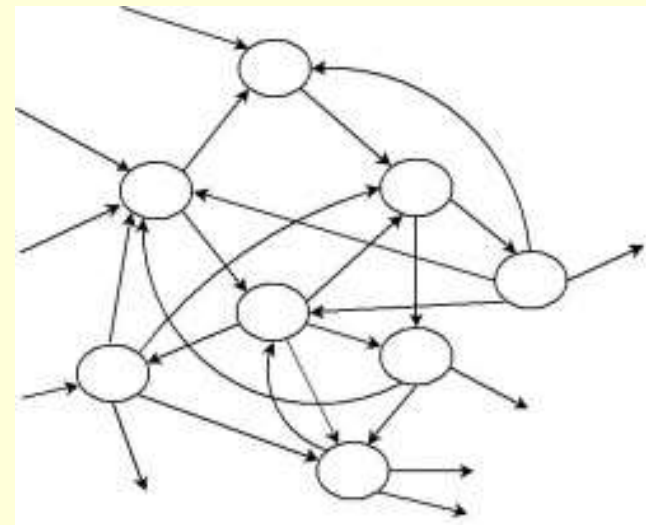
En plus de cette première façon de générer des rythmes par les propriétés **intrinsèque de la membrane** du neurone (« endogenous bursting cells »)



Des rythmes peuvent aussi être générés par les **propriétés du réseau**,

c'est-à-dire par des **boucles**

(excitation-inhibition  
ou inhibition-inhibition)

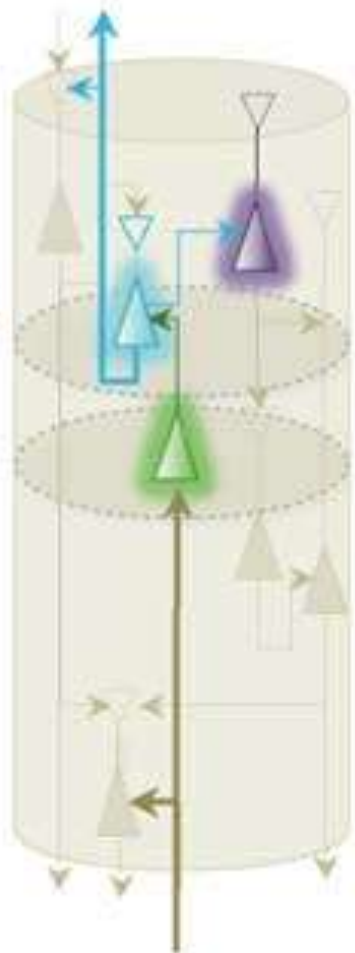




**b**



Temporally organized spike trains

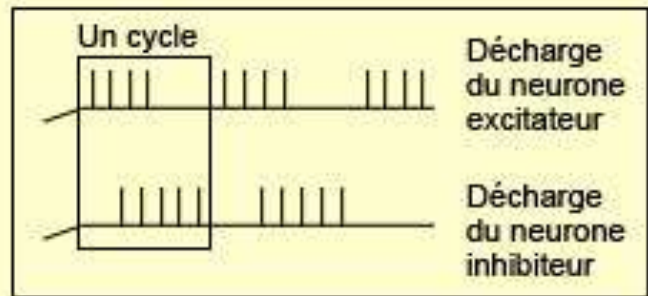
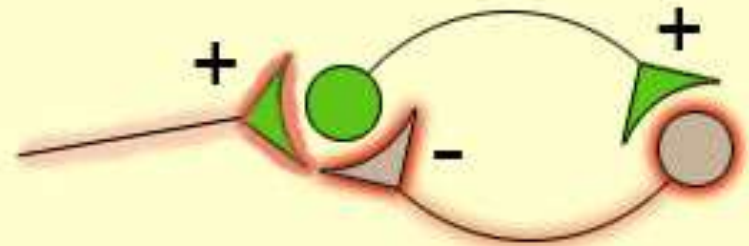
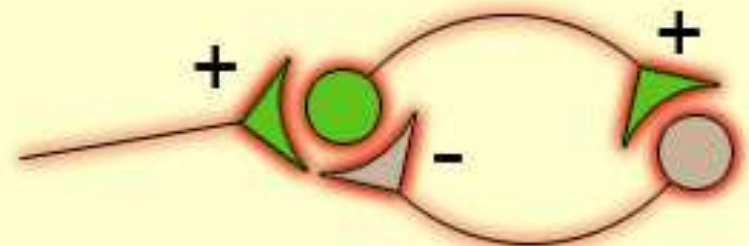
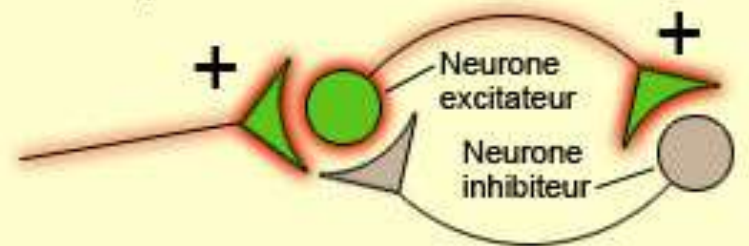


Theta (delta)

Layer IV

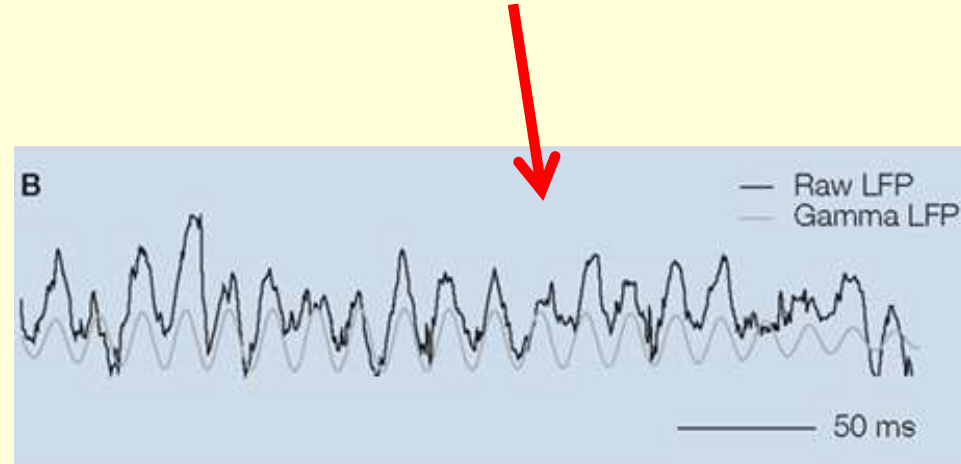
Continuous modulated stimulus-driven spike trains

Afférence excitatrice active en permanence

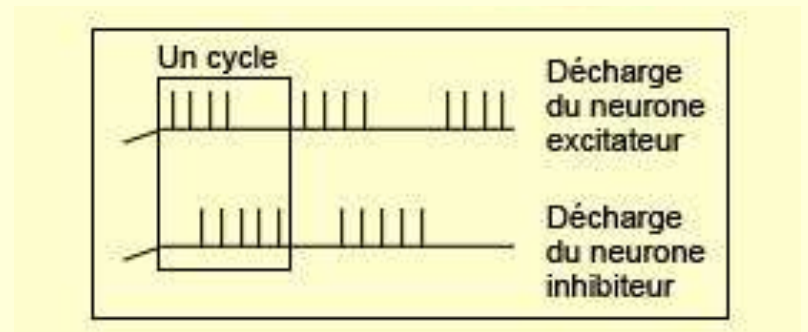


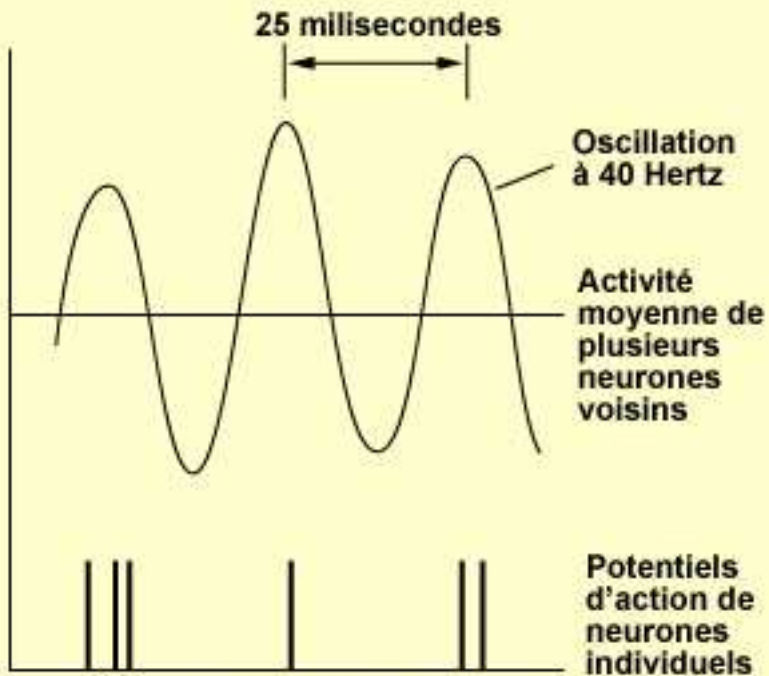
L'équilibre entre l'activité de neurones utilisant des neurotransmetteurs **excitateurs** et **inhibiteurs** est donc primordial pour nos fonctions cognitives car il permet de générer des **patterns d'activité complexes**.

Les deux neurotransmetteurs qui font en quelque sorte le "travail de base" dans le cerveau sont le **glutamate** (excitateur) et le **GABA** (inhibiteur).



Excitation and Inhibition: The Yin and Yang of the Brain  
[http://knowingneurons.com/2017/01/25/excitation-inhibition/?ct=t\(RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN\)](http://knowingneurons.com/2017/01/25/excitation-inhibition/?ct=t(RSS_EMAIL_CAMPAIGN))





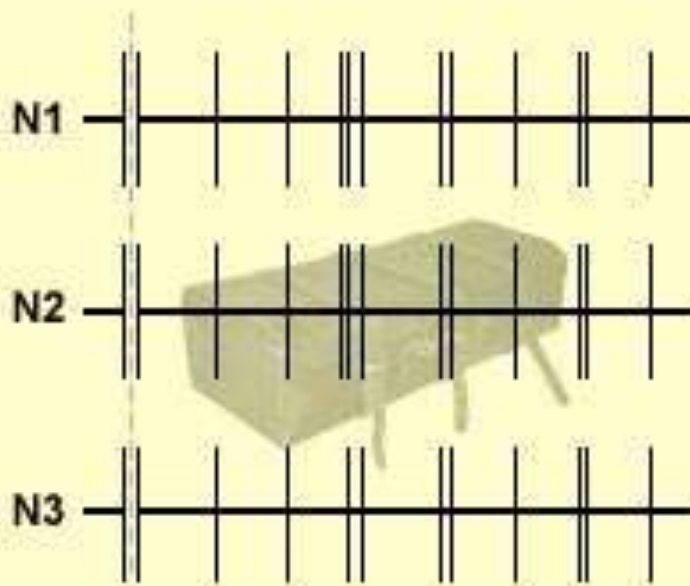
## Oscillations

(selon un certain rythme  
(en Hertz))

et

**Synchronisation**  
(activité simultanée)

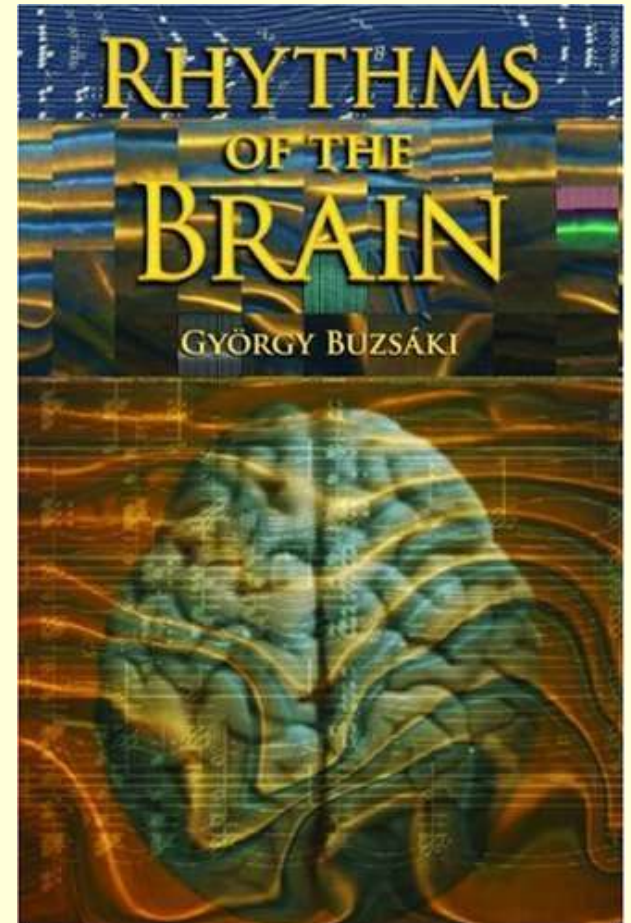
sont des phénomènes  
différents mais souvent  
liés !



Il fut un temps, pas si lointain dans l'histoire des neurosciences, où le caractère chaotique de l'ensemble de ces oscillations, **associé à du bruit de fond**, était peu considéré, voire ramené à un épiphénomène sans importance.

**Cette époque est toutefois bien révolue.**

En effet, la dimension temporelle de l'activité cérébrale qui se traduit par ces rythmes cérébraux est maintenant au cœur des travaux dans des champs de recherche complexes comme le sommeil ou la conscience.



**György Buzsáki - My work**

<https://www.youtube.com/watch?v=UOwCbtqVzNU>

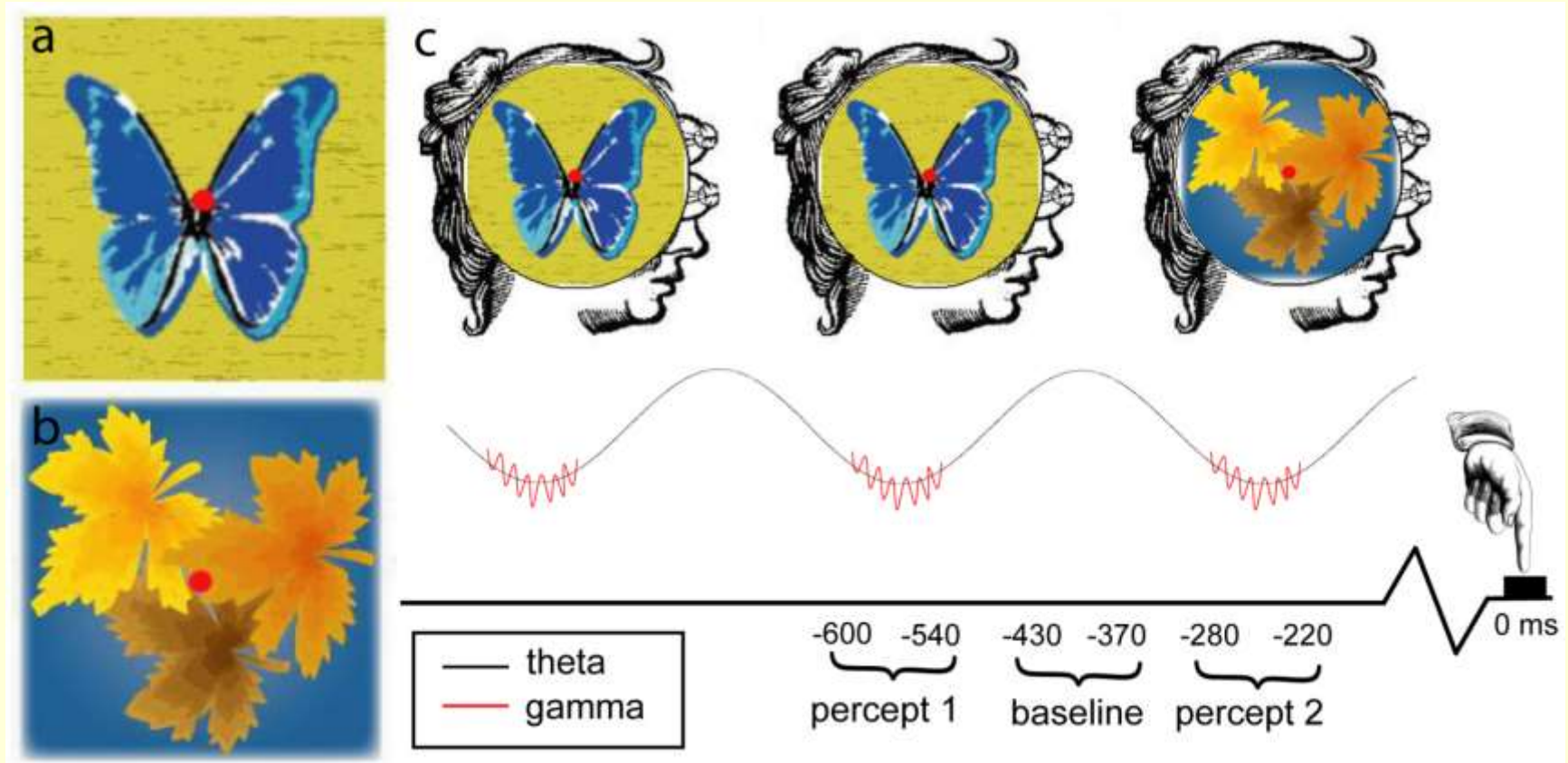
(2:00 à 4:30)

## Rôles fonctionnels possibles des oscillations:

- **lier** différentes propriétés d'un même objet ("binding problem")
- **contrôler** le flux d'information dans certaines régions



On peut créer une rivalité binoculaire en regardant dans des oculaires qui donnent à voir une **image différente pour chaque oeil**. Dans ces conditions, la perception subjective du sujet **va osciller entre deux états** : il verra tantôt le stimulus présenté à l'œil gauche, tantôt celui présenté à l'œil droit.



Si l'on fait cette expérience en enregistrant l'activité du cerveau des sujets auxquels on demande d'indiquer lequel des deux stimuli ils **perçoivent** à un moment donné, on observe une variation de l'activité de certaines régions du cerveau en fonction de l'expérience subjective.

## Rôles fonctionnels possibles des oscillations:

- **lier** différentes propriétés d'un même objet ("binding problem")
- **contrôler** le flux d'information dans certaines régions
- **créer des fenêtres temporelles** où certains phénomènes sensible à la synchronisation d'activité (comme la PLT, avec son récepteur NMDA aux propriétés si particulières) peuvent se produire (par sommation temporelle, etc.),
- et d'autre où ils ne peuvent pas.



Également, si le potentiel de membrane d'un neurone oscille, il y aura des moments où c'est plus facile pour lui d'atteindre le seuil de déclenchement d'un potentiel d'action (dépolariation) et d'autres moins (hyperpolarisation) **favorisant par exemple certaines perceptions.**

# Lien oscillation - synchronisation

Les **oscillations** sont une façon très **économique** pour le cerveau de favoriser une synchronisation d'activité neuronale **soutenue**, rappelle György Buzsáki.

**Car lorsque deux populations de neurones oscillent au même rythme**, il devient beaucoup **plus facile** pour elles de synchroniser un grand nombre d'influx nerveux en **adoptant simplement la même phase** dans leur oscillation.

Du coup, ce sont des assemblées de neurones entières qui **se « reconnaissent et se parlent »**.

Brain Science Podcast #31: Brain Rhythms with György Buzsáki

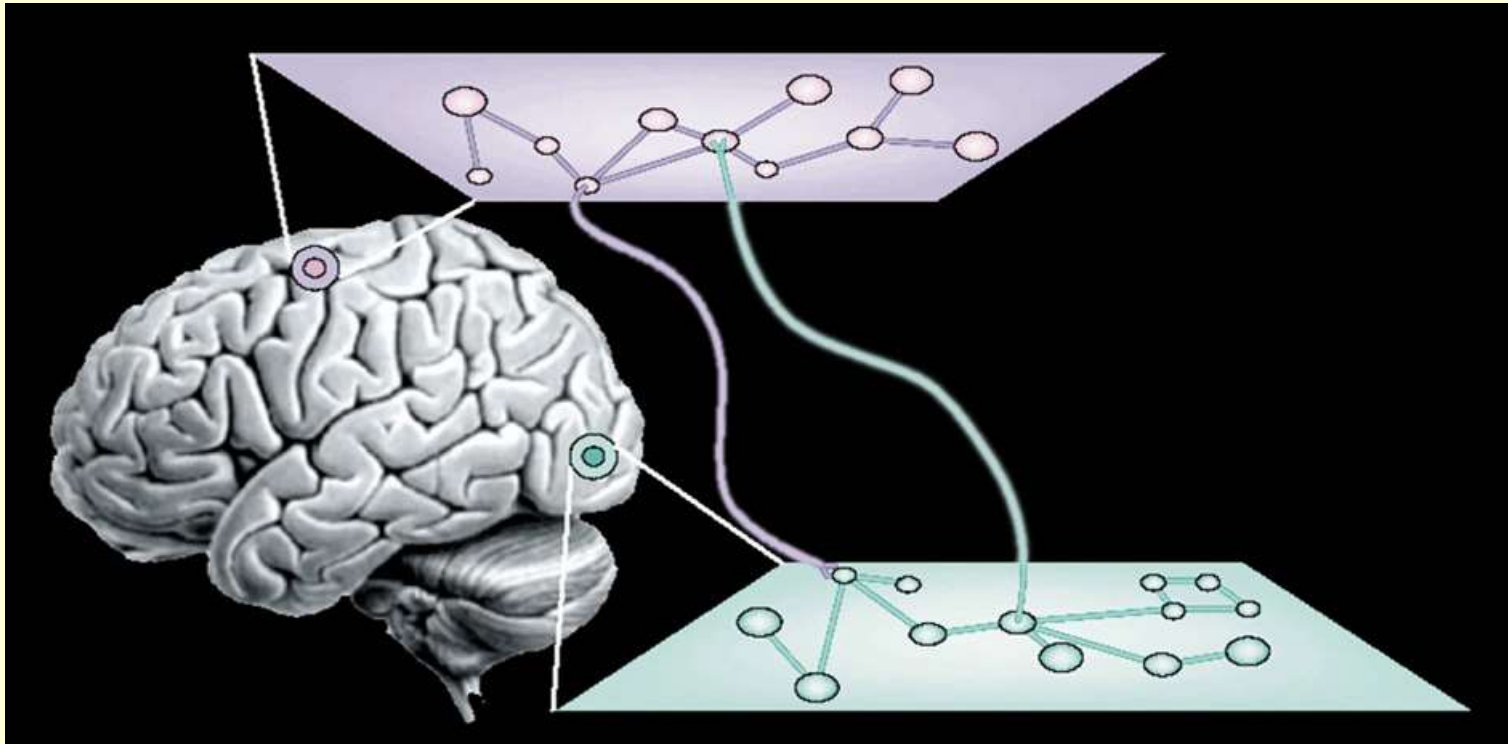
<http://brainsciencepodcast.com/bsp/brain-science-podcast-31-brain-rhythms-with-gyorgy-buzsaki.html>



## La connectivité fonctionnelle

(fcMRI ou rs-fcMRI (pour « resting state » fcMRI)) entre différentes régions du cerveau :

en mesurant les fluctuations spontanées à basse fréquence du signal BOLD (que l'on associe aux fluctuations à basse fréquence des « local field potentials »),

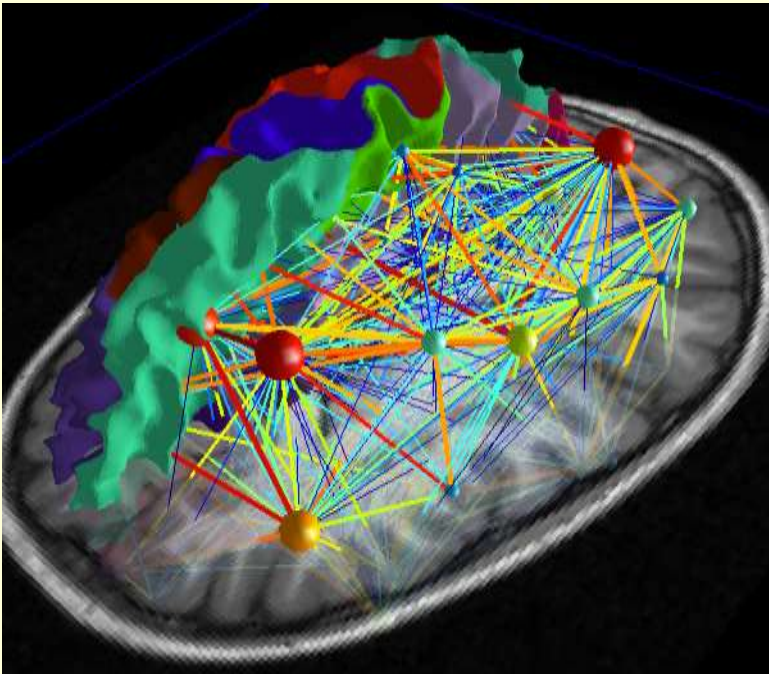


# La connectivité fonctionnelle

(fcMRI ou rs-fcMRI (pour « resting state » fcMRI)) entre différentes régions du cerveau :

en mesurant les fluctuations spontanées à basse fréquence du signal BOLD,

on tente d'identifier des régions qui fluctuent au même rythme et en phase et qui ont ainsi naturellement tendance à « **travailler ensemble** ».

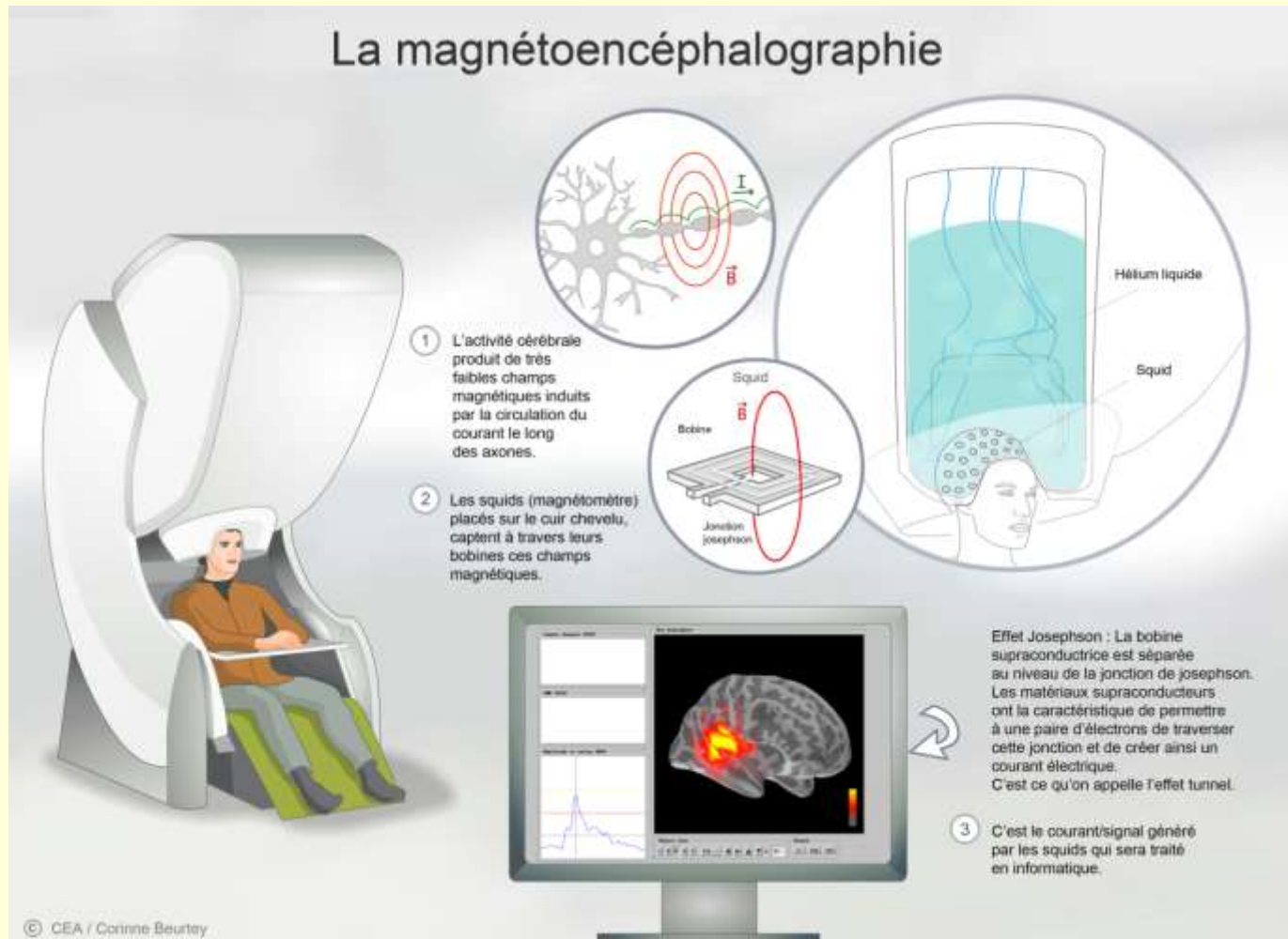


Neuroimage. 2011 Jun 1; 56(3): 1082–1104.

## Measuring functional connectivity using MEG: Methodology and comparison with fcMRI

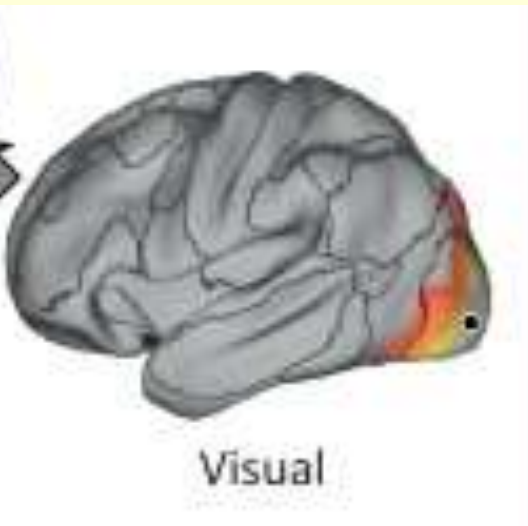
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3224862/>

→ on peut le  
faire avec  
les deux  
techniques.



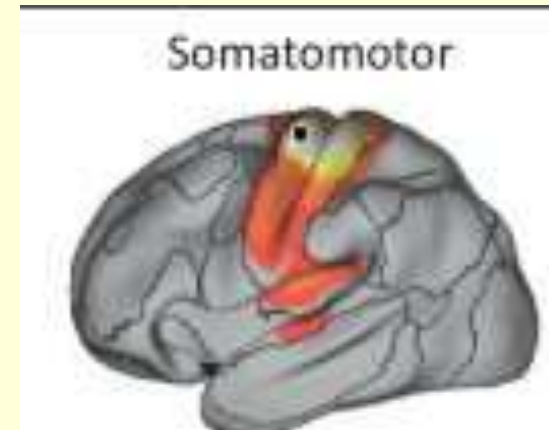
## fc-IRM :

Comment ça marche et qu'observe-t-on ?



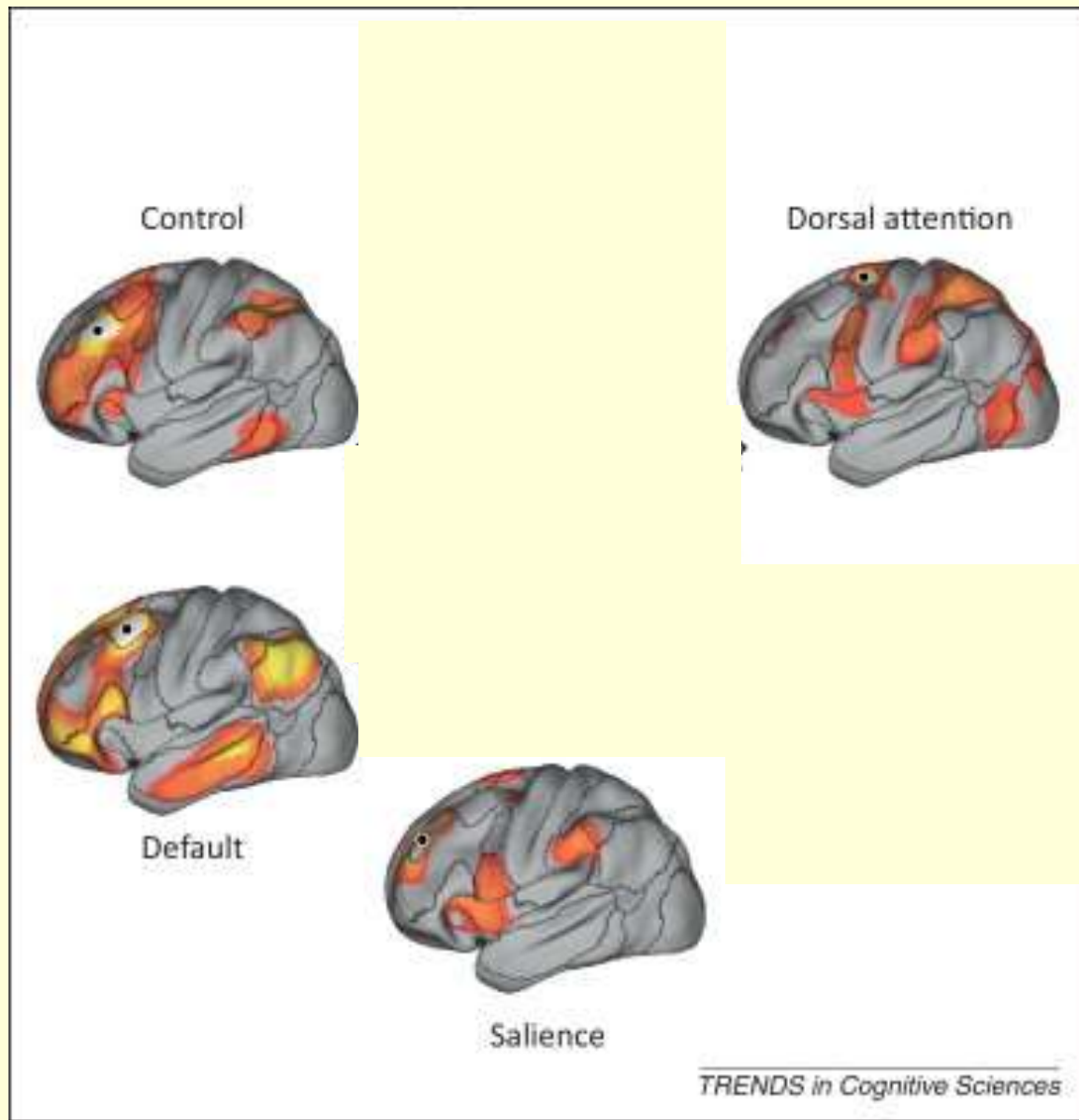
Si la « région semence » est placée dans les zones sensorielles et motrices **primaires**,

les réseaux obtenus affichent une **connectivité largement locale** (réseaux visuels et sensorimoteurs).



Mais si la « région semence » est placée dans les zones associatives, on observe des **réseaux distribués à l'échelle du cerveau entier**.

Et plus un comportement peut être considéré comme **nouveau ou récent** d'un point de vue évolutif, plus ce domaine cognitif utilise des circuits **répartis dans un réseau plus large** que les fonction plus anciennes (sensori-motrice, par exemple).



Mapping Functionally Related Regions of Brain with Functional Connectivity MR Imaging (2000)

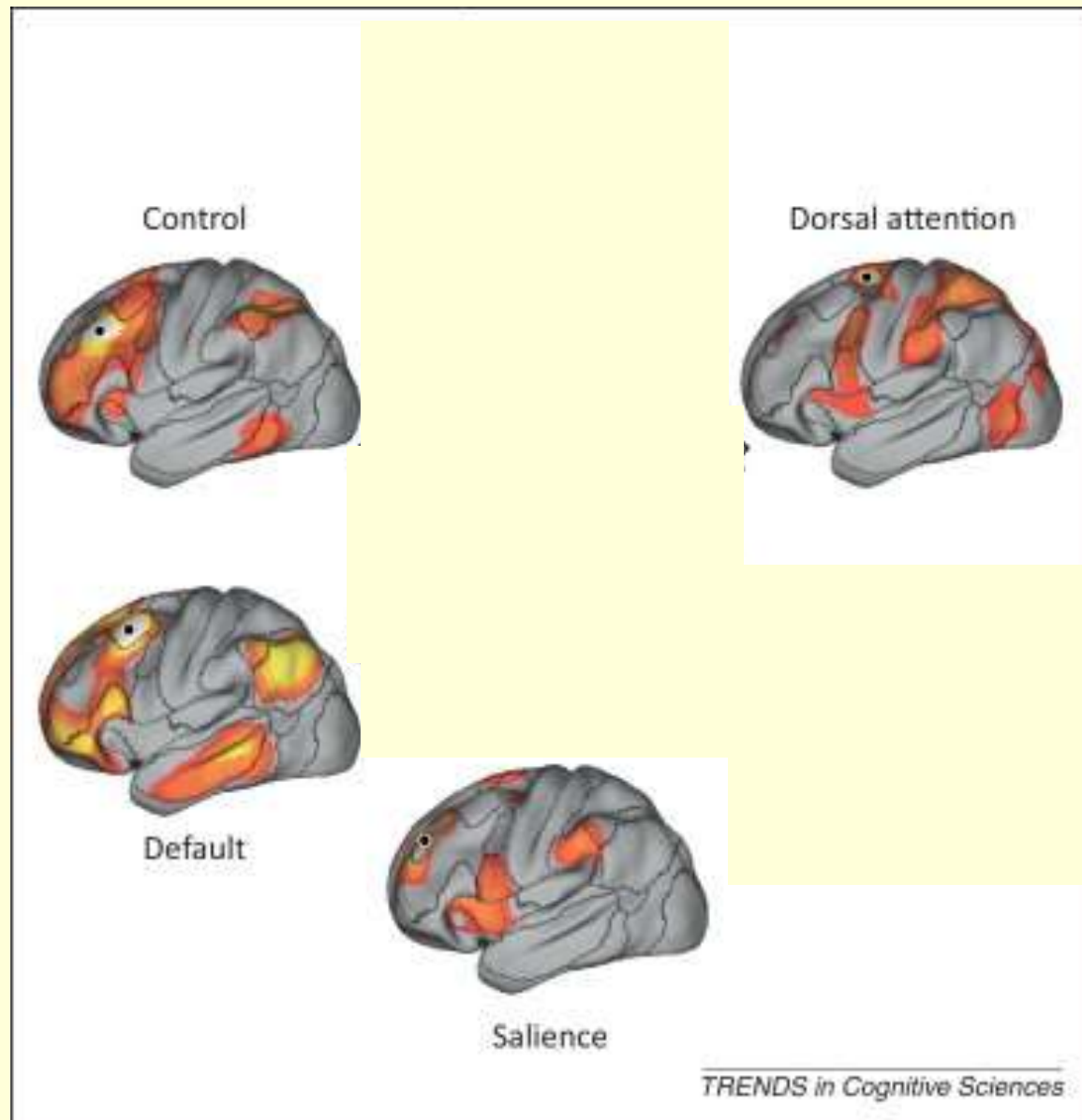
<http://www.ajnr.org/content/21/9/1636.full>

**The evolution of distributed association networks in the human brain**, Randy L. Buckner & Fenna M. Krienen, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 17, Issue 12, 648-665, **13 November 2013**

Plus quelque chose émerge **tard** dans l'évolution, plus il y a de chance qu'il y ait déjà de nombreux éléments déjà utiles qui existent et qui sont **répartis un peu partout** dans différentes régions du cerveau.

Et ce sont donc ces régions différentes **qu'il faudra relier entre elles** pour faire émerger le nouveau processus cognitif.

Les réseaux associés au langage sont **les plus dispersés** que l'on connaisse, suivi (par ordre décroissant) par le raisonnement, la mémoire, l'émotion, l'imagerie mentale, etc.

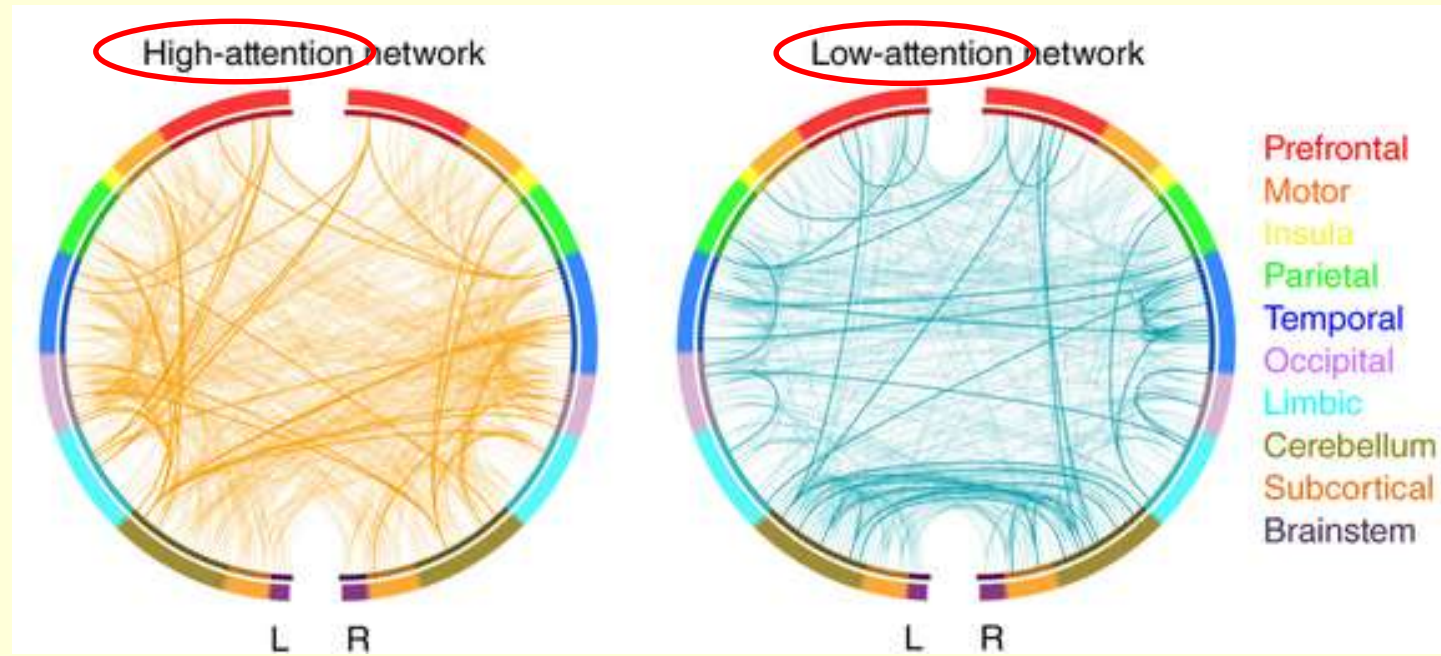


**The evolution of distributed association networks in the human brain**, Randy L. Buckner & Fenna M. Krienen, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 17, Issue 12, 648-665, [13 November 2013](#)

# A neuromarker of sustained attention from whole-brain functional connectivity

Nature  
Neuroscience 19,  
165–171 (2016)

<http://www.nature.com/neuro/journal/v19/n1/full/nn.4179.html>



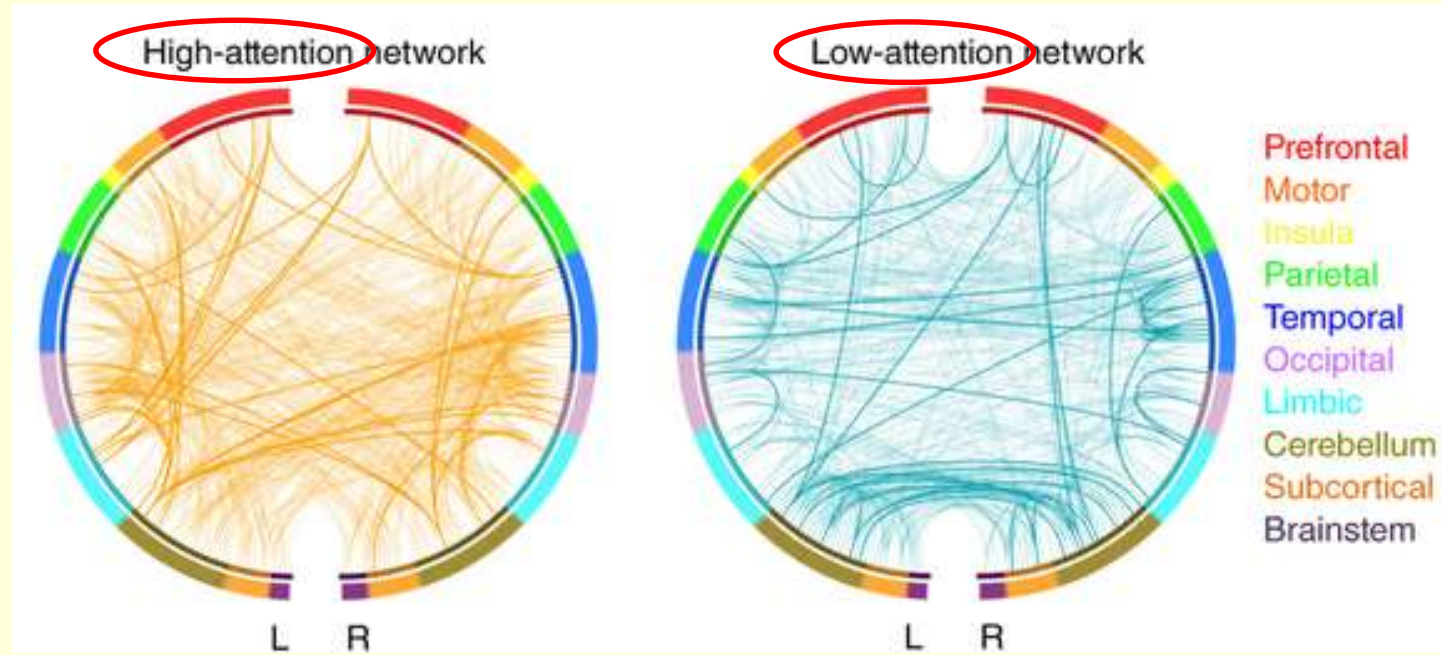
**Des « signatures » de réseaux construits à partir des patterns de connectivité de cerveau d'individus plus ou moins bons pour soutenir leur attention.**

Ça veut dire qu'on peut analyser le pattern de connectivité fonctionnelle de votre cerveau (voir quelles régions ont tendance à « travailler ensemble »), et ensuite prédire à quel point vous aller être capable de soutenir votre attention dans une tâche d'attention subséquente !

# A neuromarker of sustained attention from whole-brain functional connectivity

Nature  
Neuroscience 19,  
165–171 (2016)

<http://www.nature.com/neuro/journal/v19/n1/full/nn.4179.html>



**Le BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Lundi, 15 février 2016

Des prédictions étonnantes basées sur la connectivité cérébrale

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2016/02/15/5126/>



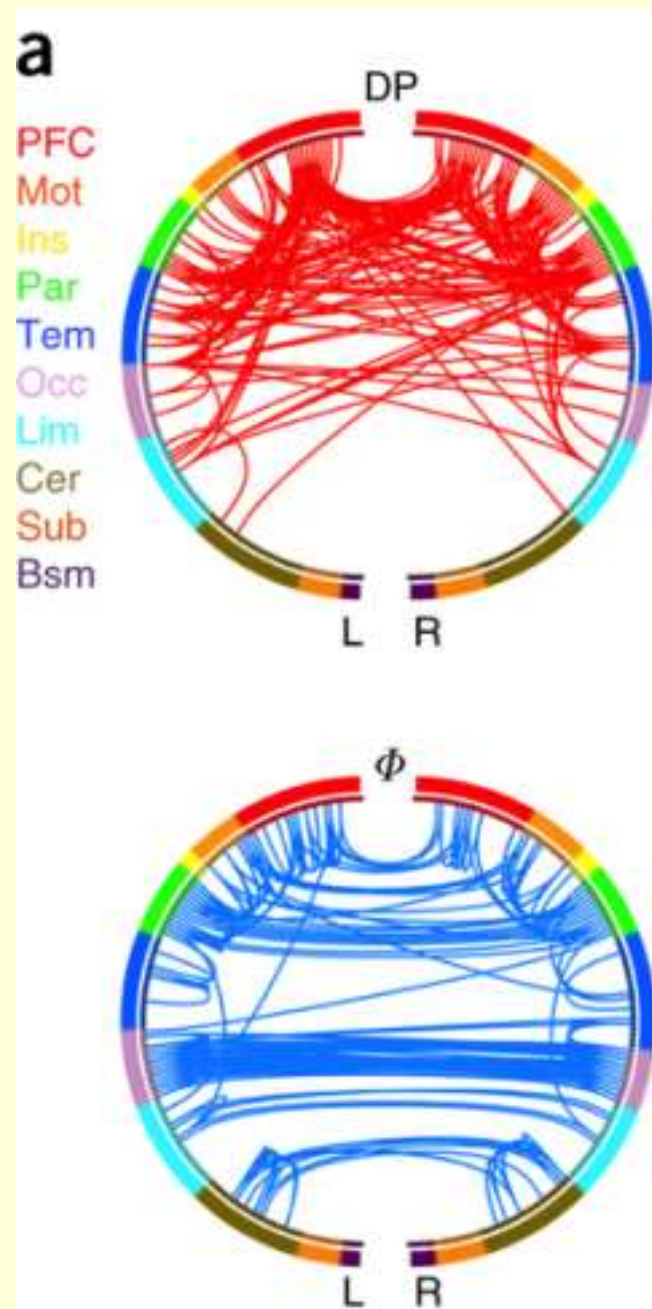
## Functional connectome fingerprinting:

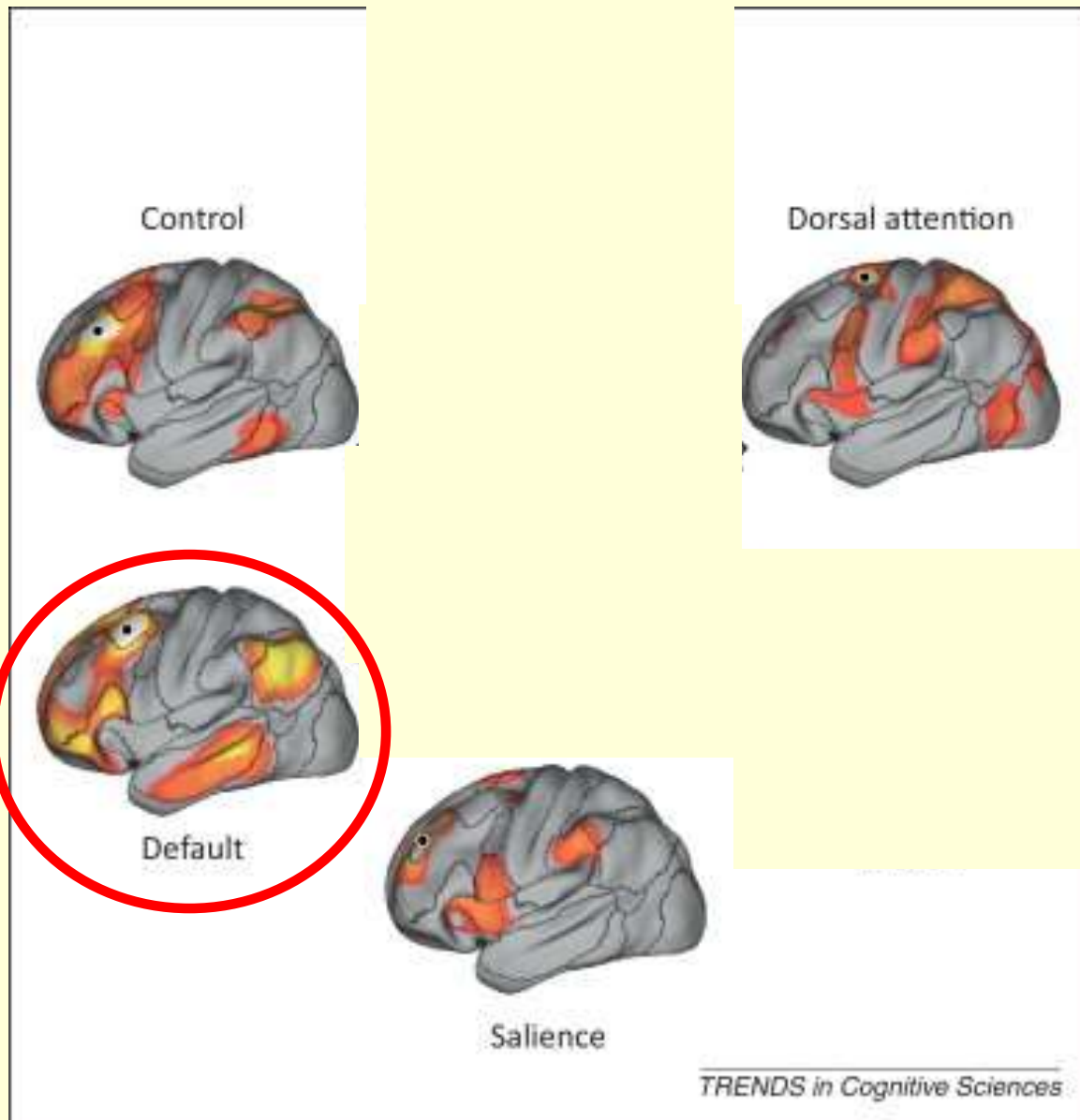
identifying individuals using patterns of brain connectivity

Nature Neuroscience 18, 1664–1671 (2015)

<http://www.nature.com/neuro/journal/v18/n11/full/nn.4135.html>

→ le concept « d'empreinte digitale » du connectome fonctionnel.





**The evolution of distributed association networks in the human brain**, Randy L. Buckner & Fenna M. Krienen, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 17, Issue 12, 648-665, [13 November 2013](#)

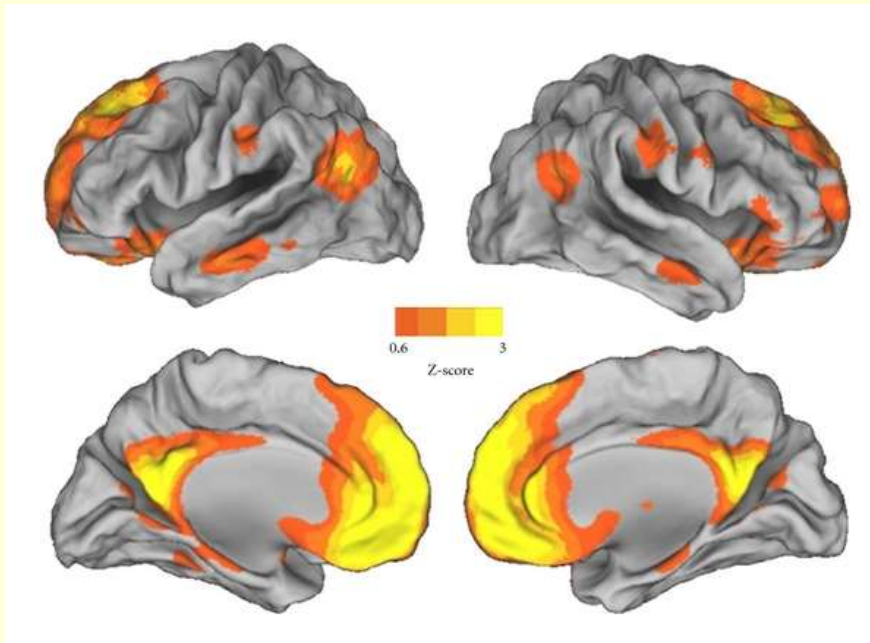
# **A default mode of brain function** (ou « intrinsic-connectivity networks »)

**Raichle** et ses collègues ont renversé la perspective jusque-là admise :

au lieu de voir ces régions comme étant désactivées durant les tâches,

ils les ont considéré comme étant **plus actives** quand les sujets ne **faisaient aucune tâche**.

Et on a par la suite confirmé que ces régions du réseau du mode par défaut sont **connectées anatomiquement** [ **2009** ].



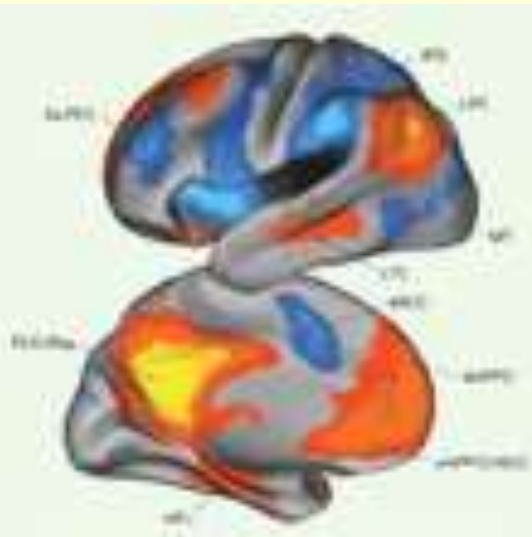
## **Two views of brain function**

<http://www.cell.com/trends/cognitive-sciences/fulltext/S1364-6613%2810%2900029-X>

## **Common blood flow changes across visual tasks: II. Decreases in cerebral cortex.**

Shulman, G.L. et al. J. Cogn. Neurosci. **1997**; 9: 648–663

**A default mode of brain function.** Raichle, M.E. et al. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. **2001**; 98: 676–682



Lundi, 29 septembre 2014

## Qu'est-ce qui détermine « ce qui nous trotte dans la tête » ?

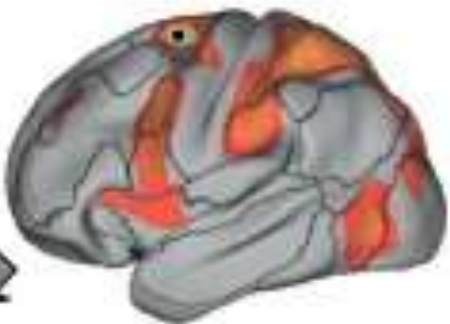
On se trouve souvent dans **deux grands états mentaux qui s'opposent** et sont, d'une certaine façon, mutuellement exclusifs.

Soit nous sommes envahis par les innombrables stimuli de notre environnement (et ils sont fort nombreux à l'heure des téléphones intelligents et des réseaux sociaux) et notre **réseau du mode par défaut** nous repasse ensuite des extraits de ce film de notre vie personnelle et sociale quand il est moins sollicité.



Default

Dorsal attention



Ou soit, par l'entremise fréquente de régions frontales de notre cortex, nous concentrons notre **attention** sur une tâche cognitive pour la résoudre.

Et ce que l'on observe c'est :

une **anti-corrélation** entre les activités de ces deux systèmes qui est visible dans leur activité spontanée au repos,

### Two views of brain function

Marcus Raichle (2010)

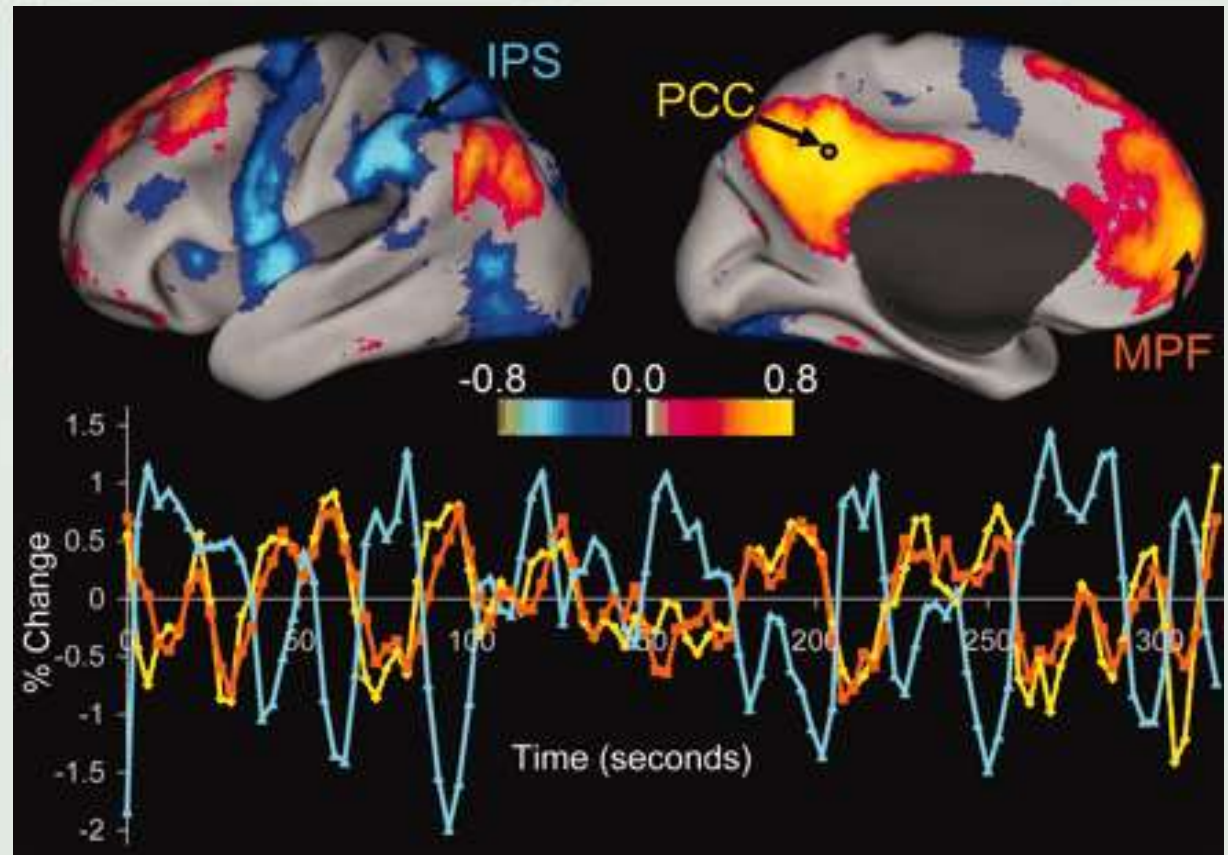
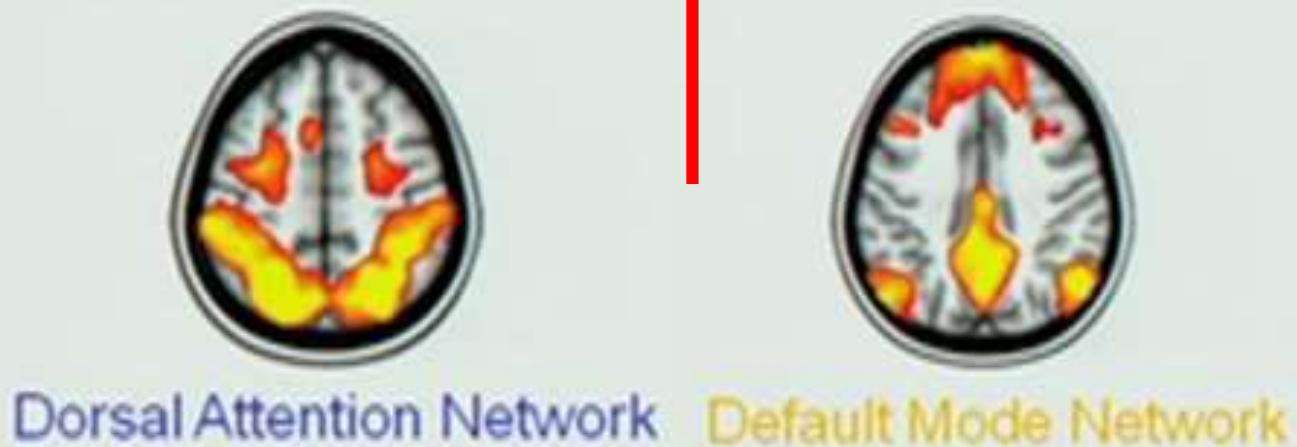
<http://www.cell.com/trends/cognitive-sciences/fulltext/S1364-6613%2810%2900029-X>

The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks

Fox et al (2005) PNAS

<http://www.pnas.org/content/102/27/9673.full>

« idées noires » ?



Modèles impliquant le réseau du mode par défaut en psychiatrie  
**pour la dépression :**

## **Depressive Rumination, the Default-Mode Network, and the Dark Matter of Clinical Neuroscience**

J. Paul Hamilton, Madison Farmer, Phoebe Fogelman, Ian H. Gotlib

**February 24, 2015**

<http://www.biologicalpsychiatryjournal.com/article/S0006-3223%2815%2900143-2/abstract>

## **Default mode network mechanisms of transcranial magnetic stimulation in depression.**

Liston C, Chen AC, Zebley BD, Drysdale AT, Gordon R, Leuchter B, Voss HU, Casey BJ, Etkin A, Dubin MJ.

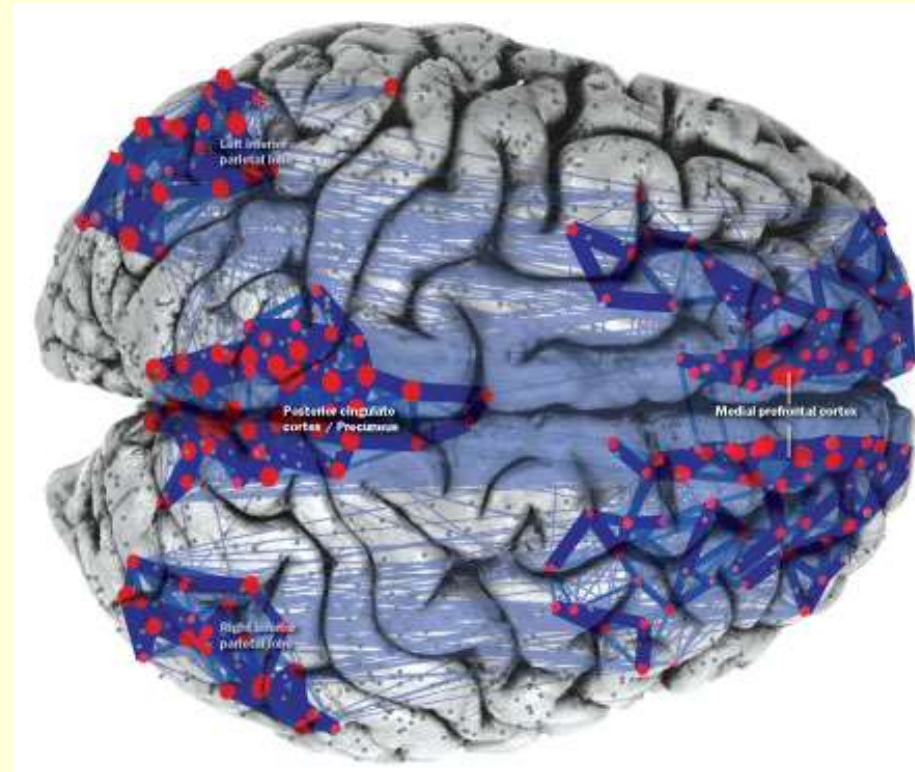
**2014 Feb 5.**

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24629537>

# Réseau du mode par défaut

Les régions impliquées dans ce circuit sont déjà connues pour être plus actives quand :

- notre esprit vagabonde (quand on est « dans la lune »);
- lorsqu'on évoque des souvenirs personnels;
- qu'on essaie de se projeter dans des scénarios futurs;
- ou de comprendre le point de vue des autres.





## On the relationship between the “**default mode network**” and the “social brain”

Rogier B. Mars, et al. Front Hum Neurosci. 2012; 6: 189. Published online **2012** June 21.

## What can the organization of the brain’s **default mode network** tell us about self-knowledge?

Joseph M. Moran et al. Front Hum Neurosci. **2013** Jul 17;7:391.

→ Aussi : rôle dans la mémoire de travail

**April 25, 2016**

**Essential role of default mode network in higher cognitive processing.**

[http://mindblog.dericbownds.net/2016/04/essential-role-of-default-mode-network.html?utm\\_source=feedburner&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29](http://mindblog.dericbownds.net/2016/04/essential-role-of-default-mode-network.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29)

Front Neurosci. **2013**; 7: 258.

## **Art reaches within: aesthetic experience, the self and the default mode network**

Edward A. Vessel, G. Gabrielle Starr, and Nava Rubin <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3874727/>

Lorsque les sujets de leurs expériences, enfermés dans un scanner IRMf et confrontés à des images, font état d'un **ravissement esthétique maximal**, l'appareil révèle une activation des zones cérébrales qui forment le **«réseau du mode par défaut»**.



« l'expérience esthétique me dit qu'un accord se réalise – et que c'est important pour **moi**. »

## **How Your Brain Finds Meaning in Life Experiences**

Do stories have the power to help us thrive?

Dec 29, **2017**

<https://www.psychologytoday.com/blog/the-moment-youth/201712/how-your-brain-finds-meaning-in-life-experiences>

...The study found something extraordinarily universal about **how people process stories**, regardless of their alphabet or language. In fact, researchers discovered that the part of the brain called the **default mode network (DMN)** is involved in **high-level meaning and comprehension**.

## Un célèbre neuropsychologue explique comment le fait de « ne rien faire » est en fait vital pour la santé

<http://share2give.eu/un-celebre-neuropsychologue-explique-comment-le-fait-de-ne-rien-faire-est-en-fait-vitale-pour-la-sante/>

Une étude a été menée qui démontre que lorsque le corps humain ne fait pas d'activité, son cerveau se met **en mode « par défaut »** et **fait alors le tri** des informations qu'il contient. Cette étape est absolument indispensable pour le neuropsychologue **Francis Eustache** qui exerce au CHU de Caen.

De cette façon, il pourra mieux comprendre l'environnement qui l'entoure et pourra mieux composer avec les situations ultérieures qui se présenteront à vous.

### Why Your Brain Needs More Downtime

Research on naps, meditation, nature walks and the habits of exceptional artists and athletes reveals how mental breaks increase productivity, replenish attention, solidify memories and encourage creativity

By Ferris Jabr on October 15, **2013**

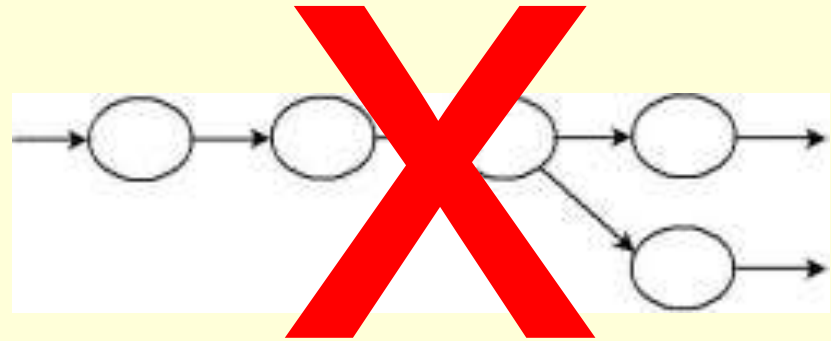
<https://www.scientificamerican.com/article/mental-downtime/>

En guise de conclusion partielle :

**“The brain is decidedly *not* a primarily feed-forward system.”**

- Michael Anderson,  
Precis of After Phrenology

Et les organismes ne sont pas des récepteurs passifs de stimulations environnementales.



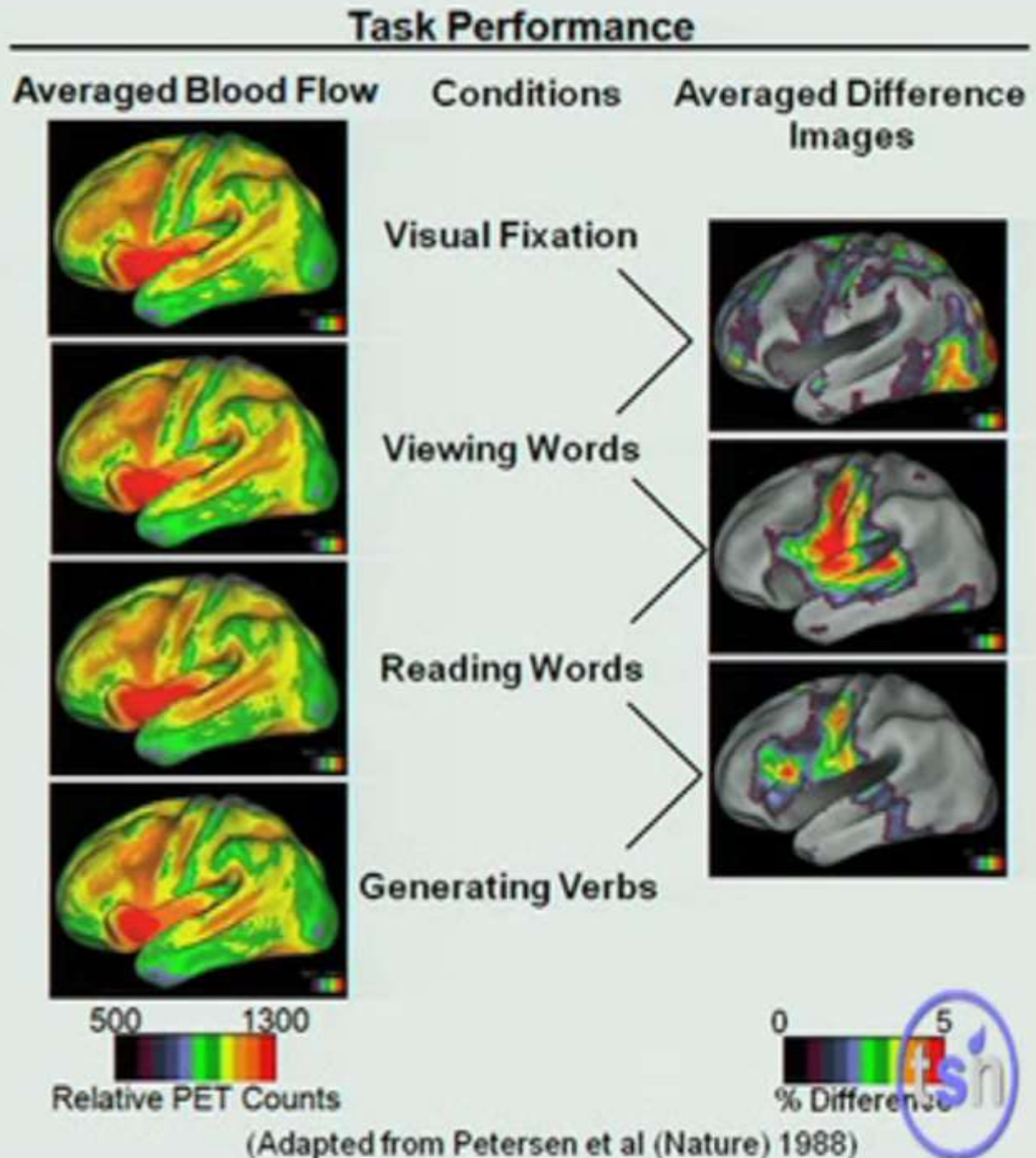
Et bien sûr, c'est toujours **une activité différentielle issue d'une soustraction** entre un état contrôle et l'état de lors d'une tâche.

« Our resting brain is never at rest. »

- Marcus Raichle

Two views of brain function

<http://www.cell.com/trends/cognitive-sciences/fulltext/S1364-6613%2810%2900029-X>

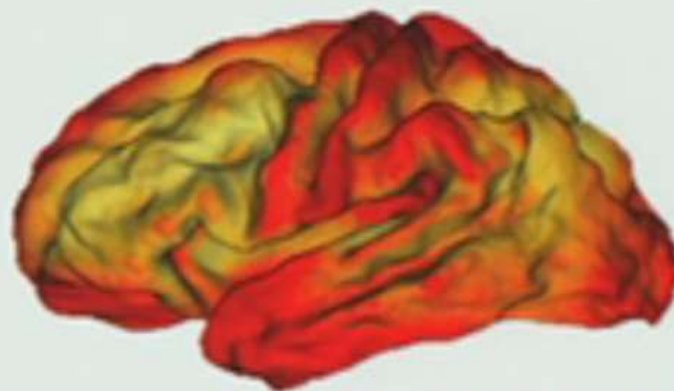


# An Historical View

**Reflexive**  
(Sir Charles Sherrington)



**Intrinsic**  
(T. Graham Brown)



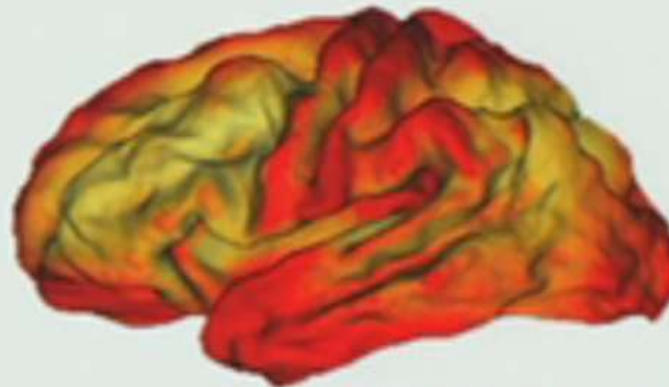
Raichle: Two Views of Brain Funct

# An Historical View

**Reflexive**  
(Sir Charles Sherrington)



**Intrinsic**  
(T. Graham Brown)



The Endogenously  
Active Brain:  
The Need for an Alternative  
Cognitive Architecture

William Bechtel

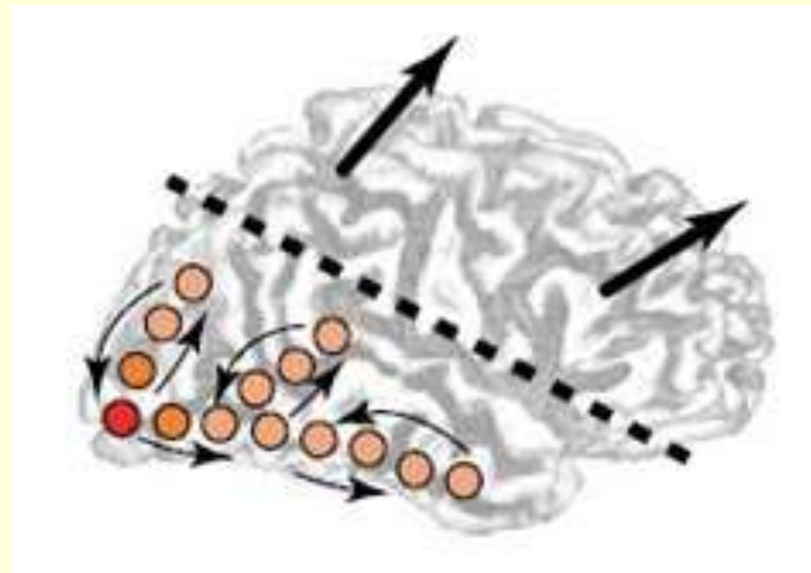
Philosophia Scientiæ **2013** /  
2 (17-2)

<http://mechanism.ucsd.edu/research/bechtel.The%20Endogenously%20Active%20Brain.pdf>

Raichle: Two Views of Brain Funct

Autrement dit :

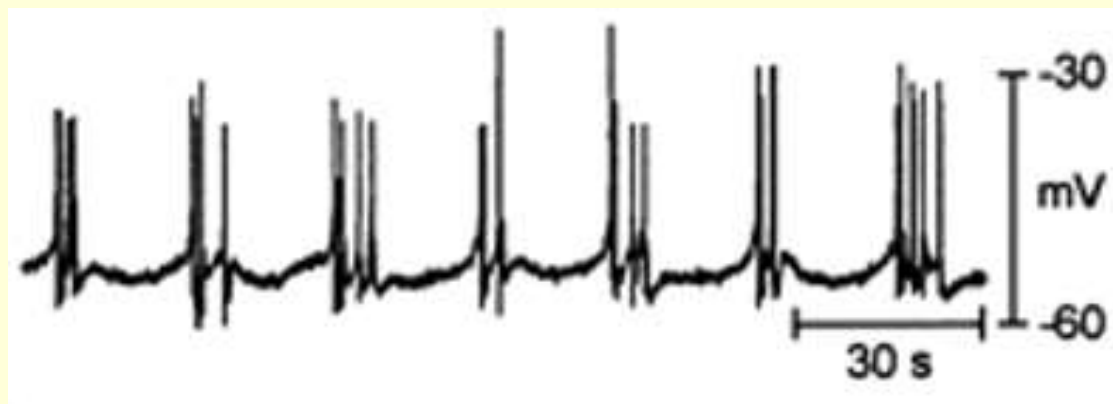
“**If there’s input** to the nervous system, fine. **It will react to it.**”



Activité « **Bottom up** »

But the **nervous system is primarily a device for generating action spontaneously**. It’s an ongoing affair.

The biggest **mistake** that people make is in thinking of it as an **input-output device**.”



~ Graham Hoyle, quoted in William Calvin’s ***The Cerebral Symphony*** (p. 214)



“Ce que l’on considère généralement comme des fonctions cérébrales – voir, penser, décider, agir – sont en réalité des **perturbations**, (“disturbance”), des altération [de l’**activité intrinsèque** du cerveau].

[traduction libre]

- **Michael L. Anderson**

**The Dynamic Brain** (2011)

What your brain is doing when you're not doing anything

<https://www.psychologytoday.com/blog/after-phrenology/201102/the-dynamic-brain>

« Une **perturbation** est un stimulus (indifférent) qui est interprété par un être vivant par rapport à sa structure interne. »

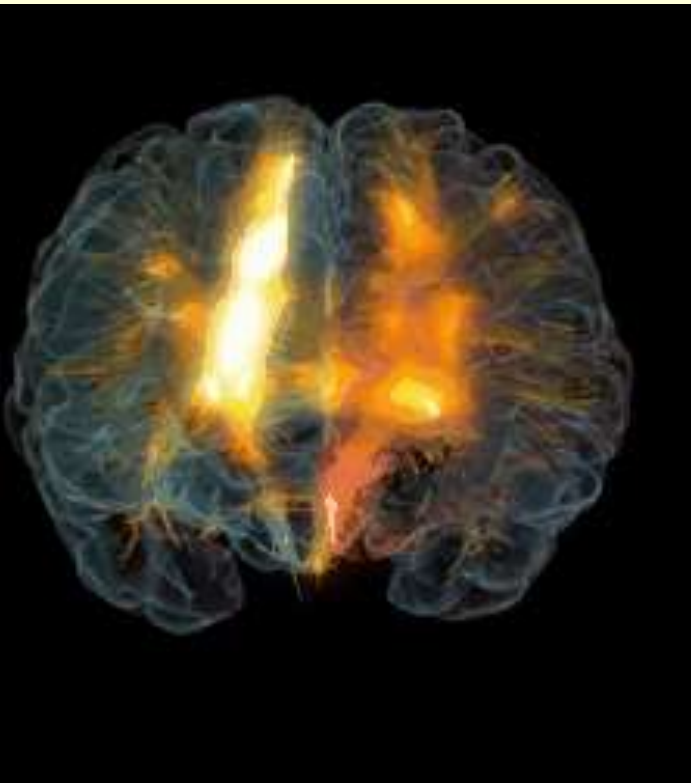
[traduction libre]

- **H. Maturana et F. Varela,**

« Autopoiesis: the organization of the living », 1980.



« [on arrive à] un moment intéressant en neuroscience où la conception réflexe des fonctions cérébrales, [...] commence à céder le pas à une conception où **les inputs sensoriels modulent au lieu de dicter** les fonctions cérébrales. »



[traduction libre]

- Rodolfo R. Llinás

Intrinsic electrical properties of mammalian neurons and CNS function: a historical perspective

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4219458/>

Front Cell Neurosci. 2014; 8: 320.

Et on va même plus loin que ça aujourd'hui avec l'idée que le cerveau projette sur le monde ses modèles internes, comme on va le voir dans le 4<sup>e</sup> bloc...