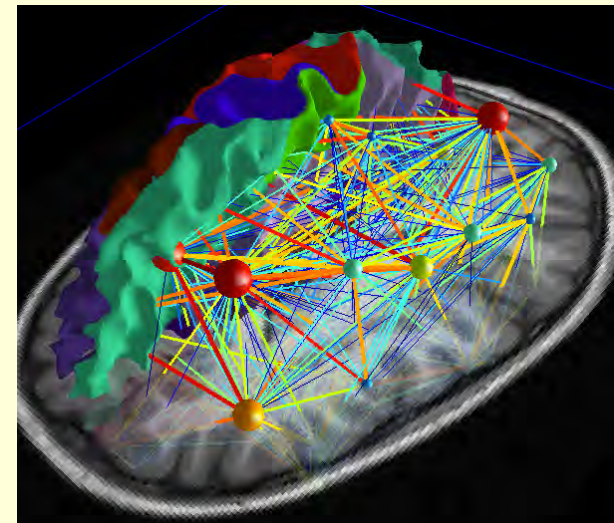
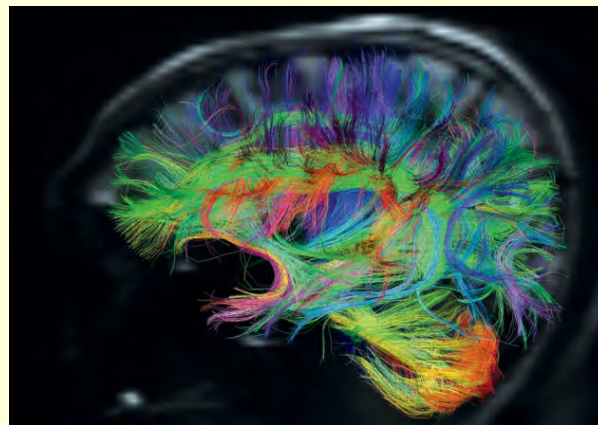
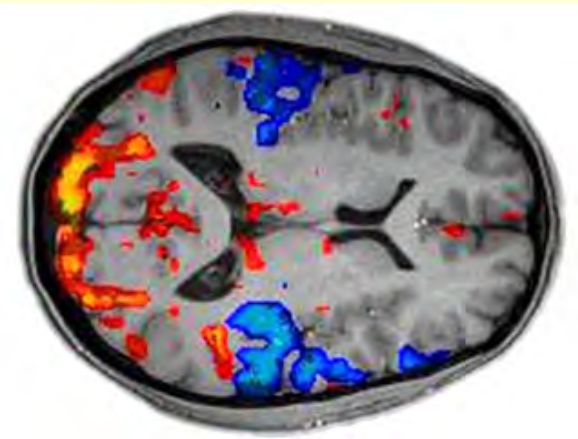


# L'apport des neurosciences... à tous les niveaux !

**Cours 4 :** Cartographier notre connectome à différentes échelles  
(Imagerie cérébrale et réseaux fonctionnels)



# L'apport des neurosciences... à tous les niveaux !

~~Cours 1:~~ A- Multidisciplinarité des sciences cognitives  
B- D'où venons-nous ?

~~Cours 2:~~ En quoi le fonctionnement et l'organisation des neurones distingue le cerveau d'un ordinateur ?

~~Cours 3:~~ A- Évolution de nos mémoires et rôle de l'hippocampe  
B- Apprendre à associer, de la liste d'épicerie aux championnats de mémoire

**Cours 4 :** Cartographier notre connectome à différentes échelles  
(Imagerie cérébrale et réseaux fonctionnels)

**Cours 5 :** A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier  
B- Éveil, sommeil et rêve

**Cours 6 :** A- Penser à partir de ce que l'on perçoit : l'exemple de la lecture, la catégorisation, les concepts, les analogies  
B- Les « fonctions supérieures » : langage, attention, conscience

**Cours 7 :** A- La cognition située dans un « corps-cerveau-environnement »  
B- Exemples de modèles de cognition incarnée (Barsalou, Varela, Eliasmith)

**Cours 8 :** A- Libre arbitre et neuroscience  
B- Vers une neuropédagogie ?



Moléculaire



Cellulaire



Cérébral



Individu

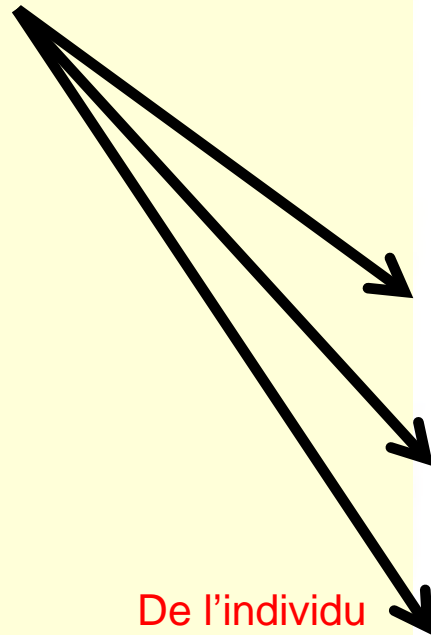
Psychologie

Corps



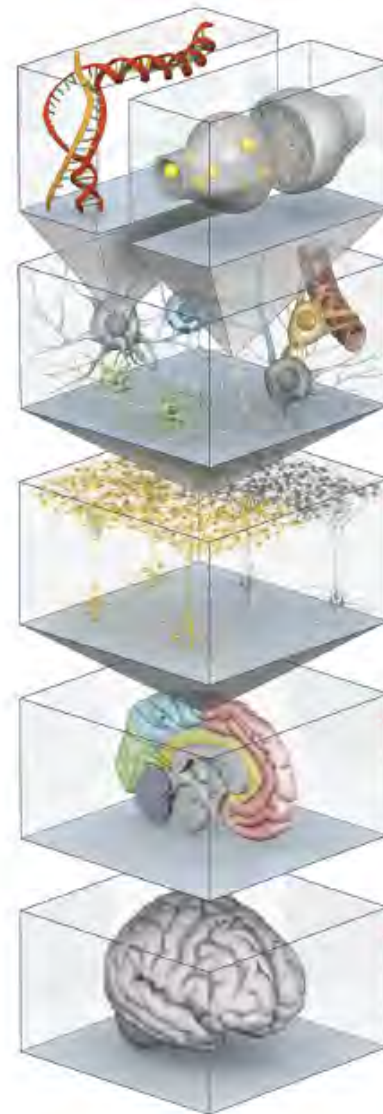
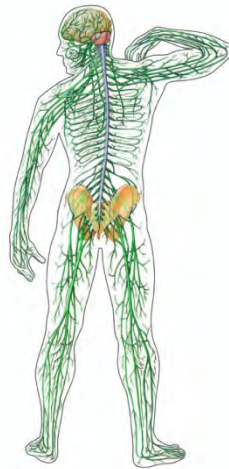
Social

# Cours 4 :



**Social**  
(corps-cerveau-  
environnement)

**De l'individu**  
(corps-cerveau)



## **Molecular**

A century of research, beginning with the first inspection of a brain cell under a microscope, would translate into a digital facsimile that combines component molecular parts to assemble a cell that demonstrates the essential properties of a neuron—the transmission of electrical and chemical signals.

## **Cellular**

A brain-in-a-box simulation will have to capture every detail of neurons and nonneuronal glial cells, including the exact geometric shapes of the dendrites and axons that receive and send information.

## **Circuits**

A model of the neural connections between different brain areas and among neighboring cells may furnish clues to the origins of complex brain diseases such as autism and schizophrenia.

## **Regions**

Major neural substructures—the amygdala (emotions), the hippocampus (memory), the frontal lobes (executive control)—can be inspected alone or as they interact with one another.

## **Whole Organ**

An in silico brain might substitute for the actual organ. By removing the computer code for a “gene,” the virtual system can, for instance, mimic the effects of a mutation, as scientists do today by “knocking out” a gene in mice. The tool would avoid the lengthy breeding process and could simulate a multitude of experimental conditions.

# Plan

## **Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale**

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

## Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

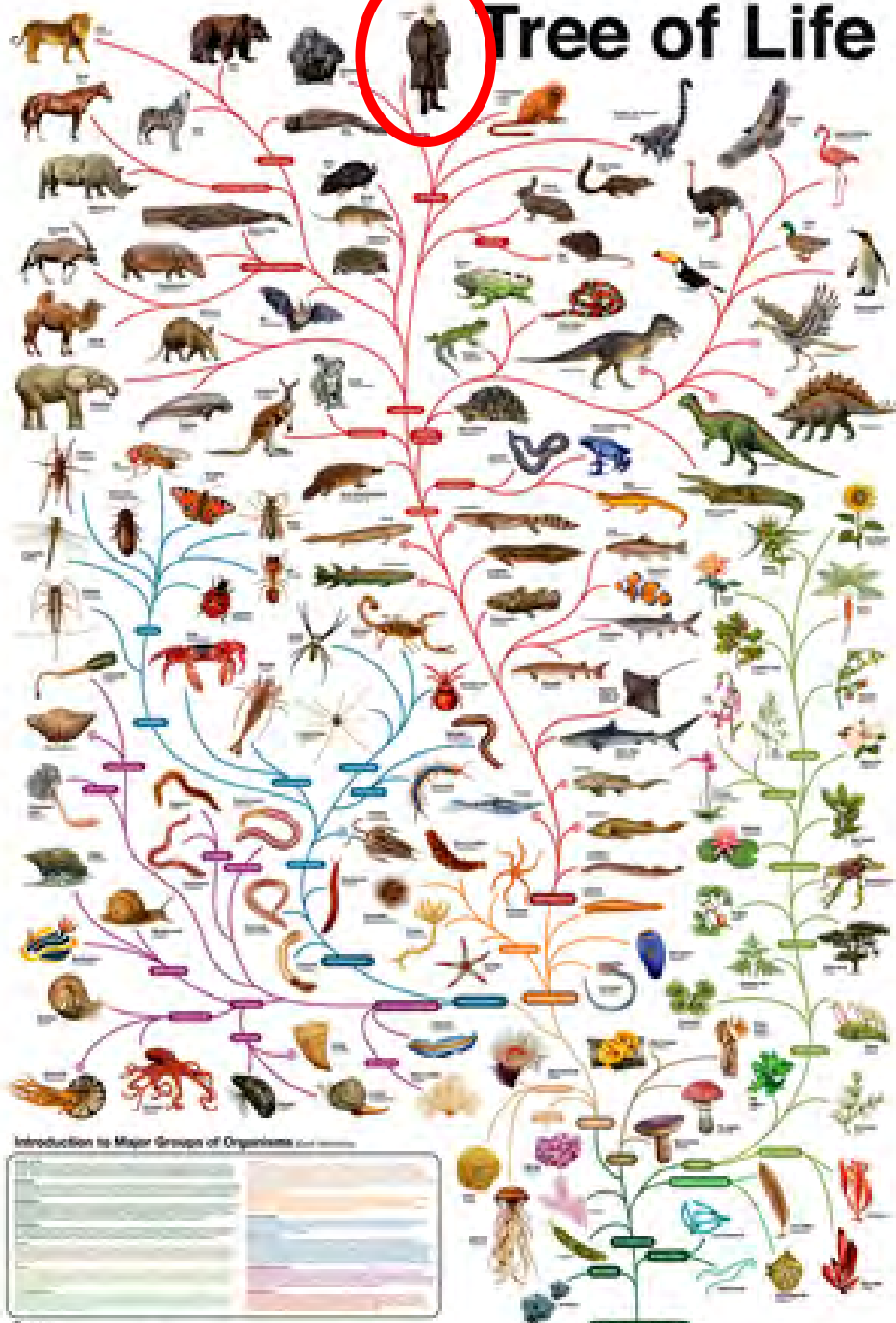
- Problème d'échelle temporelle
- Problème de dimension
- Problème de « consistance »
- Problème d'échelle spatiale

# Problème d'échelle temporelle

Comment fait-on pour cartographier un  **système dynamique**  
comme notre cerveau qui varie à  **différentes échelles de temps**  
allant du  **millième de seconde** au  **millions d'années** ?

Et d'abord, qu'est-ce qu'on entend par tout ça ?

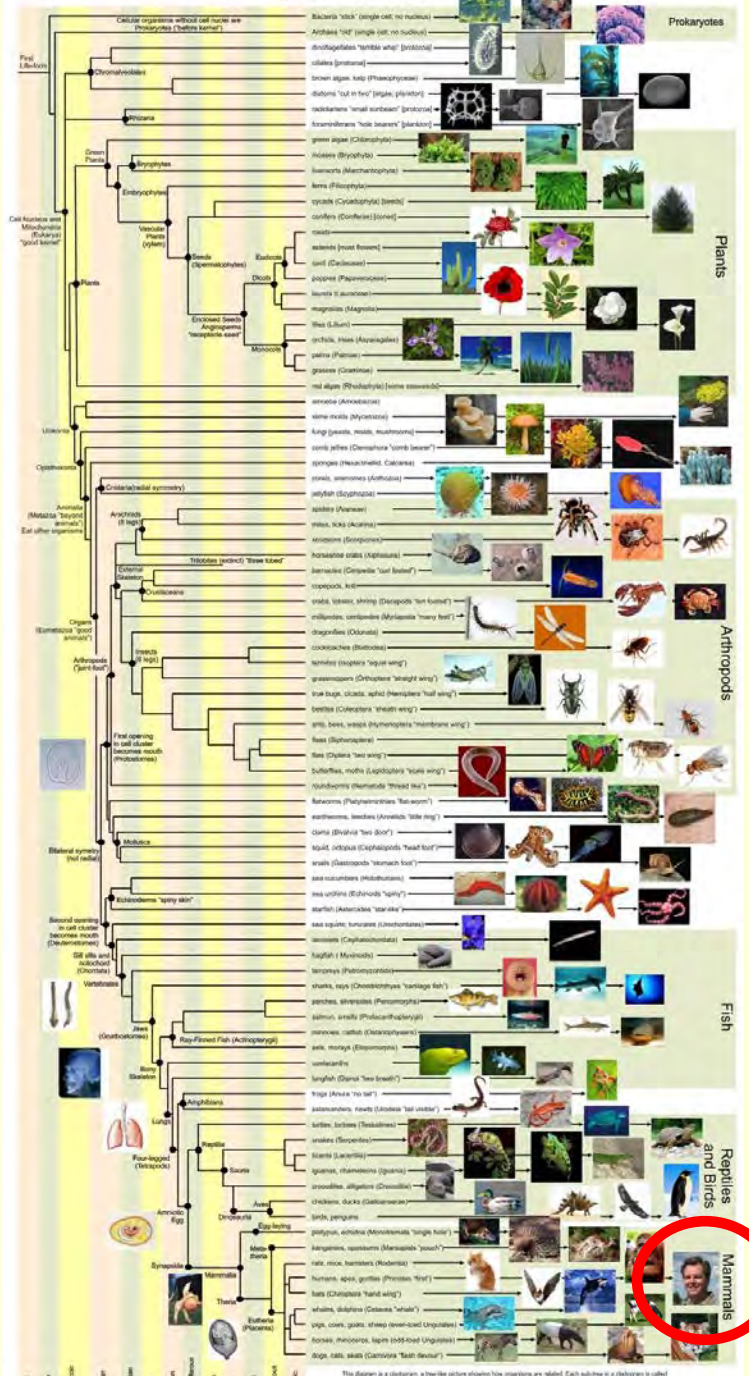
# Tree of Life



**Introduction to Major Groups of Organisms**

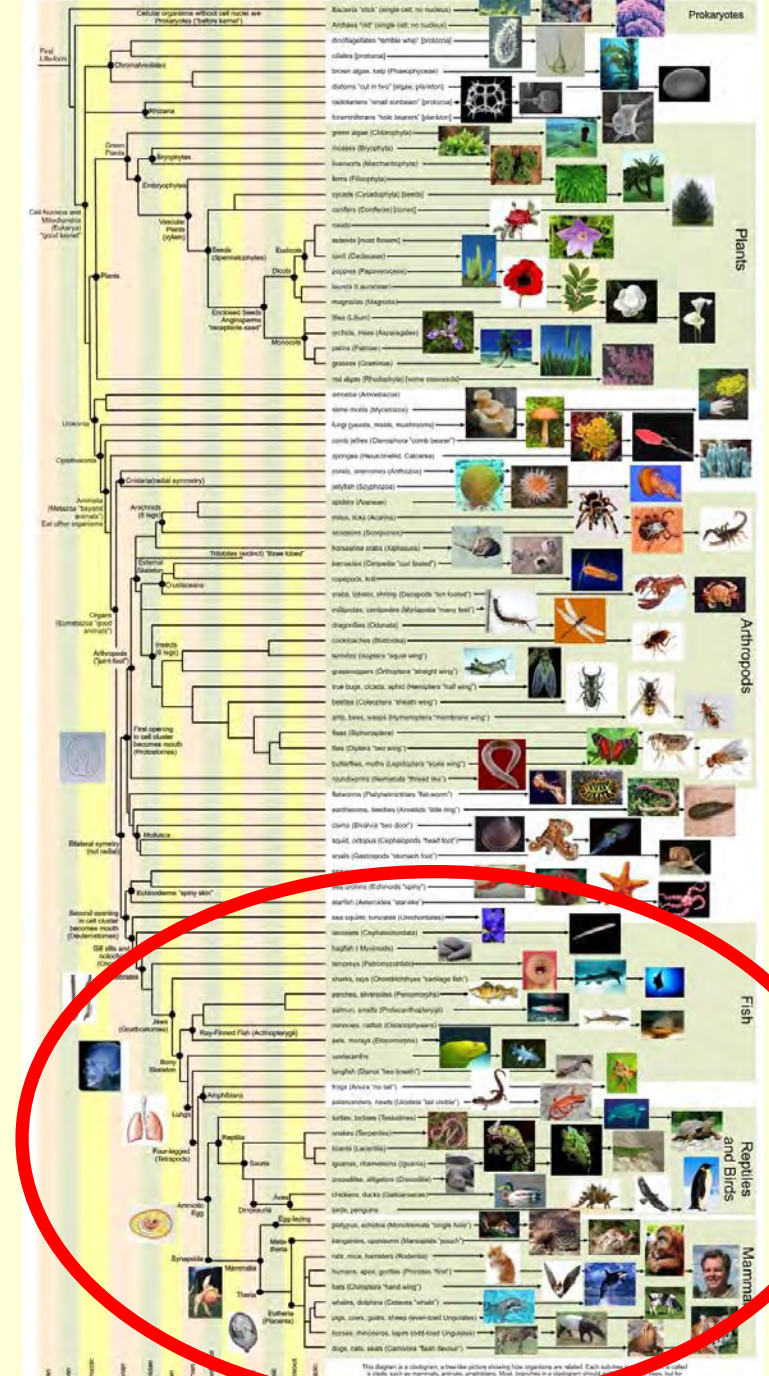
**Origin of Life**

# Tree of Life



This diagram is a phylogenetic tree showing the relationships between various organisms. Each organism is represented by a small image. The tree is color-coded by major groups: Prokaryotes (yellow), Plants (green), Invertebrates (blue), Fish (orange), and Mammals (red). A red circle highlights a human figure at the top of the tree.

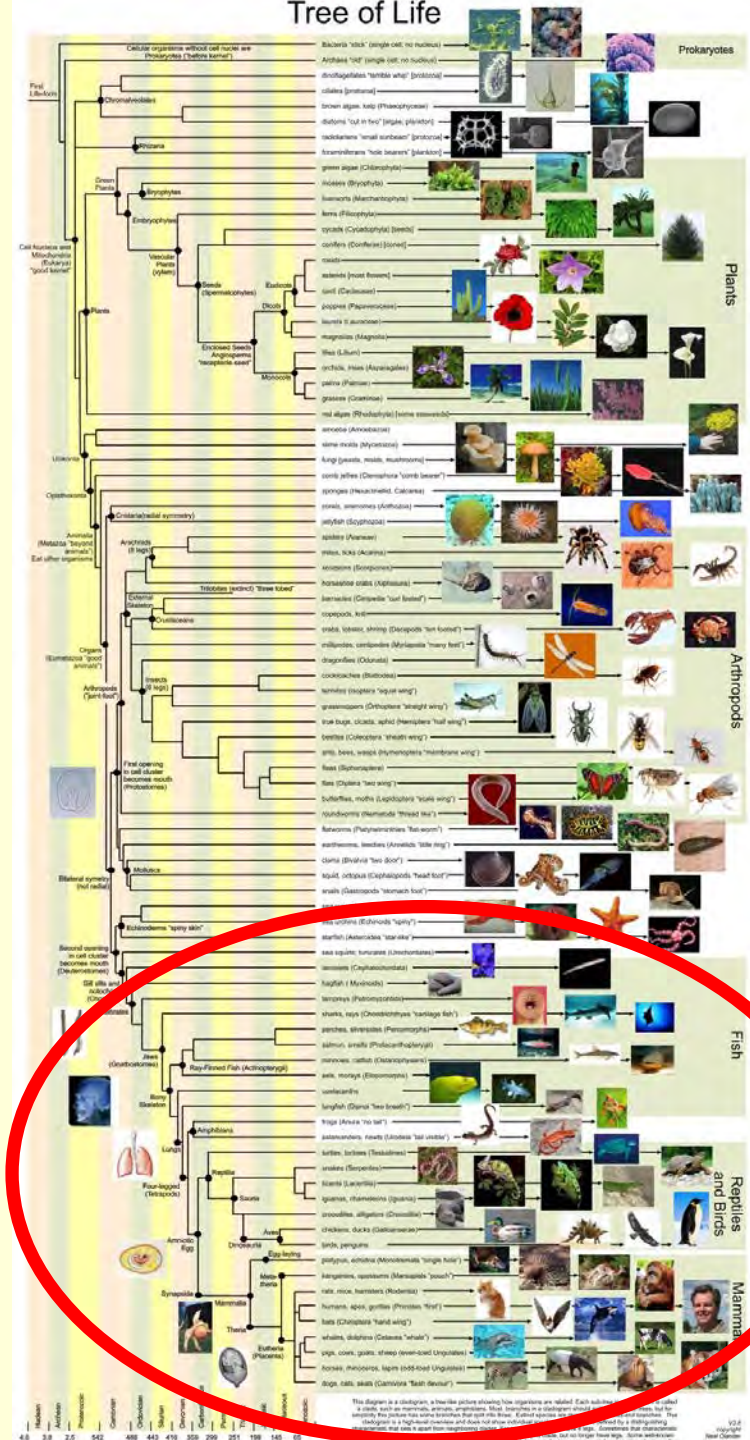
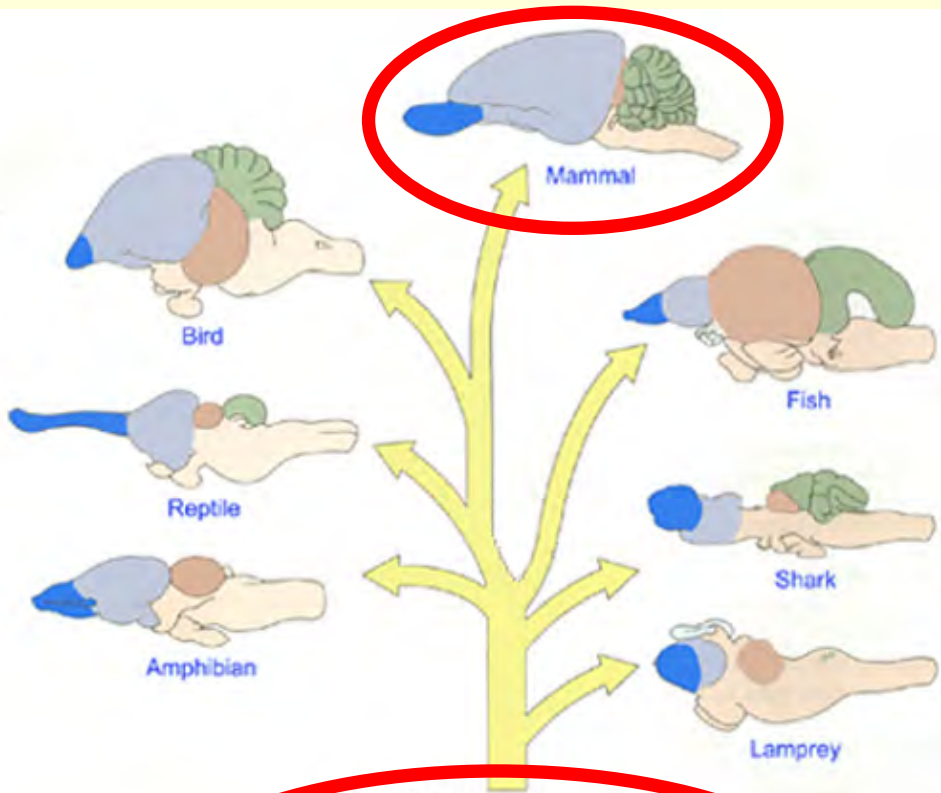
# Tree of Life



## Les vertébrés

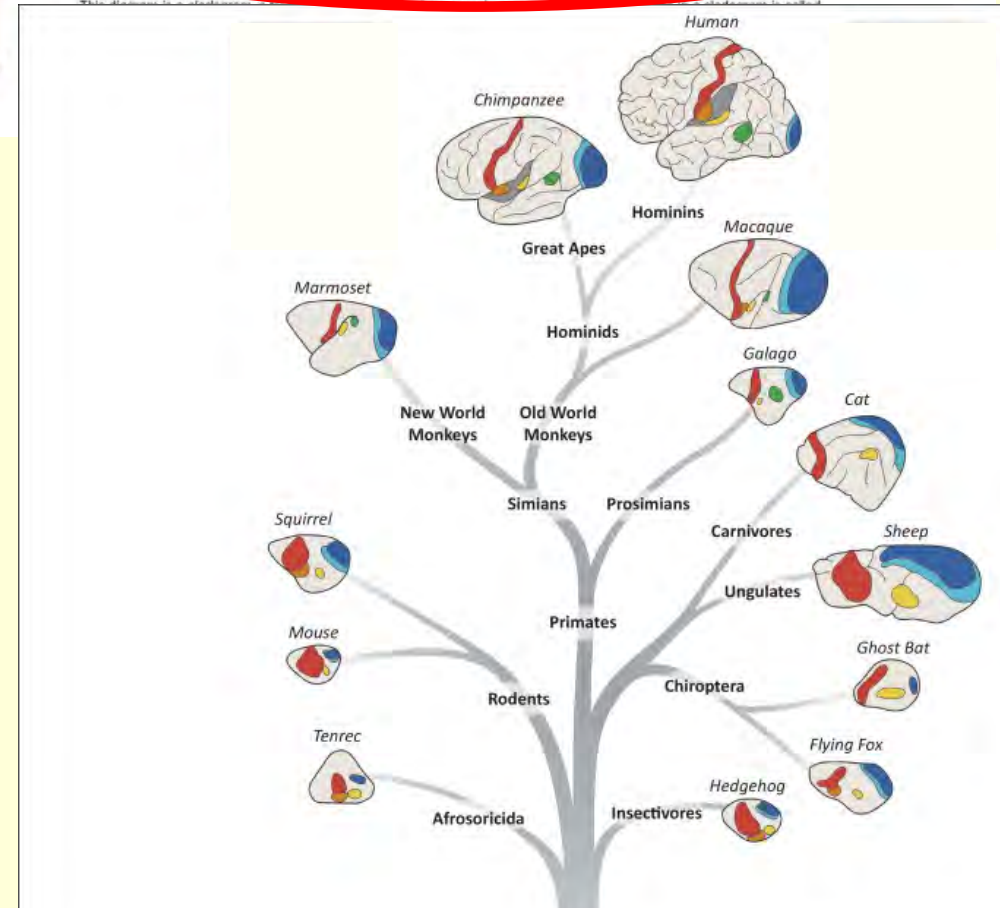
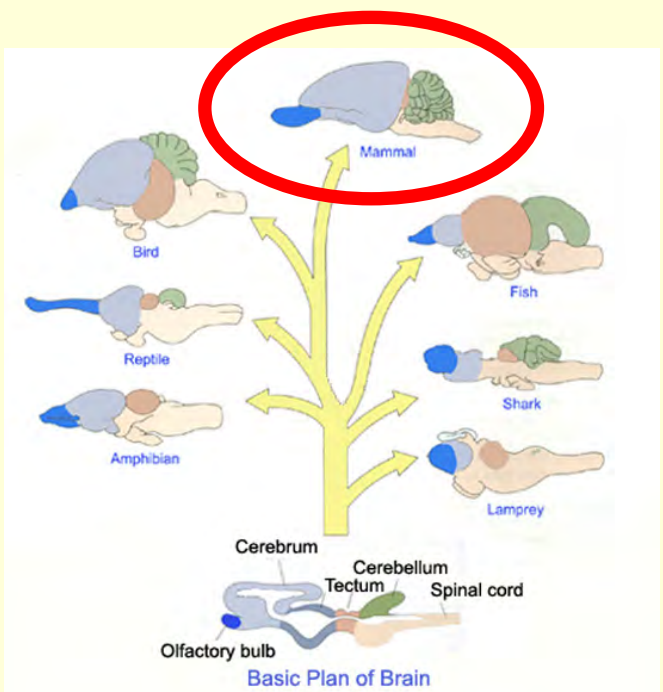
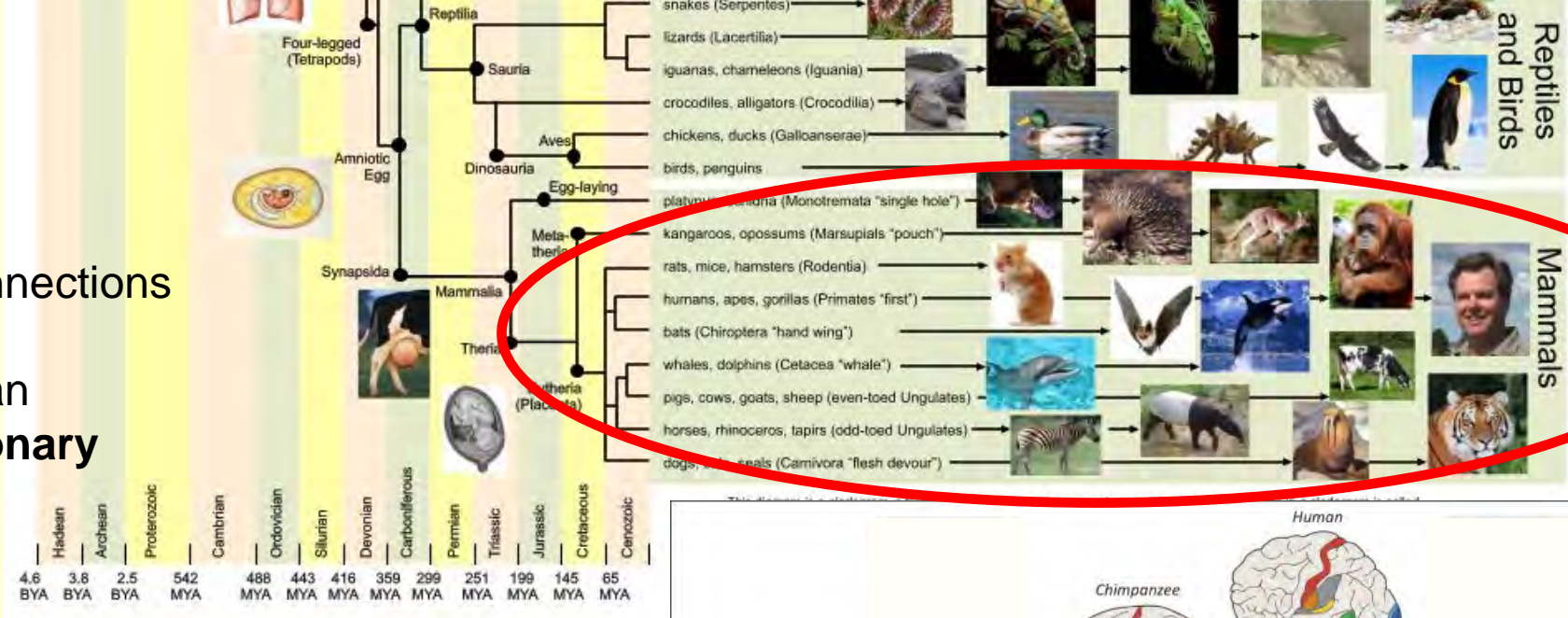
(qui ont une colonne vertébrale)





This diagram is a cladogram, a tree-like picture showing how organisms are related. Each subdivision is called a clade and an organism within a clade is called a member. The clade is defined by a shared characteristic that is not shared by any other organism. The diagram is a high-resolution tree and does not show evolutionary time. It is a tree of life. The diagram is a cladogram, a tree-like picture showing how organisms are related. Each subdivision is called a clade and an organism within a clade is called a member. The clade is defined by a shared characteristic that is not shared by any other organism. The diagram is a high-resolution tree and does not show evolutionary time. It is a tree of life.

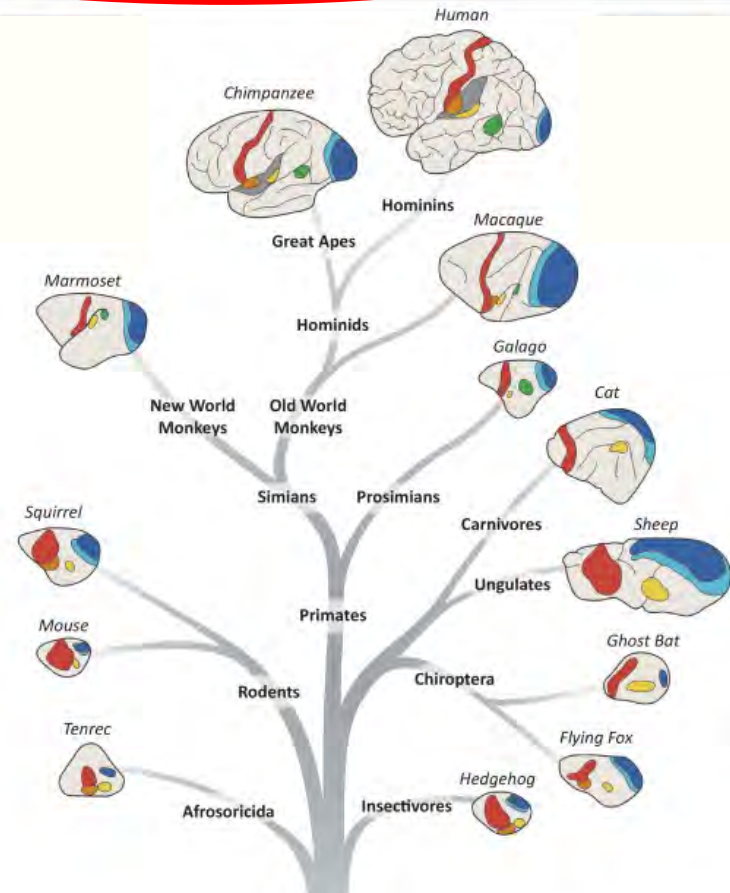
and connections  
 ctive  
 human  
 olutionary



and connections  
 ctive  
 human  
 olutionary

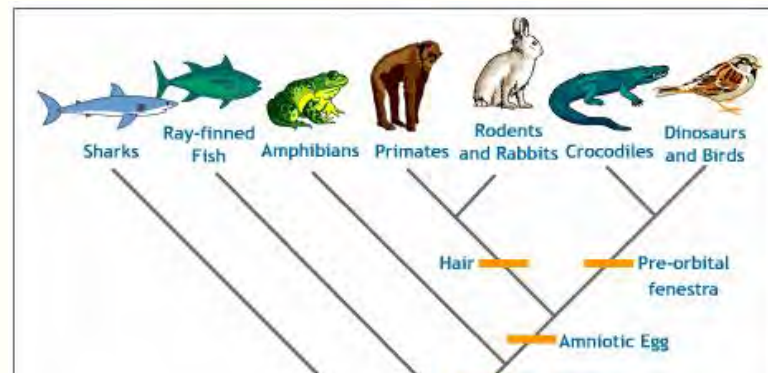
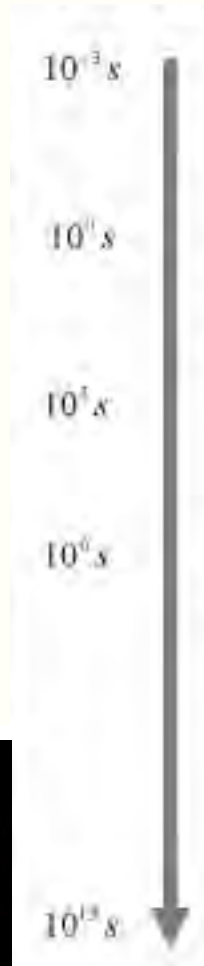


Les plans généraux du cerveau humain sont spécifiés par les pressions sélectives ayant opéré à l'échelle de temps de l'évolution biologique.

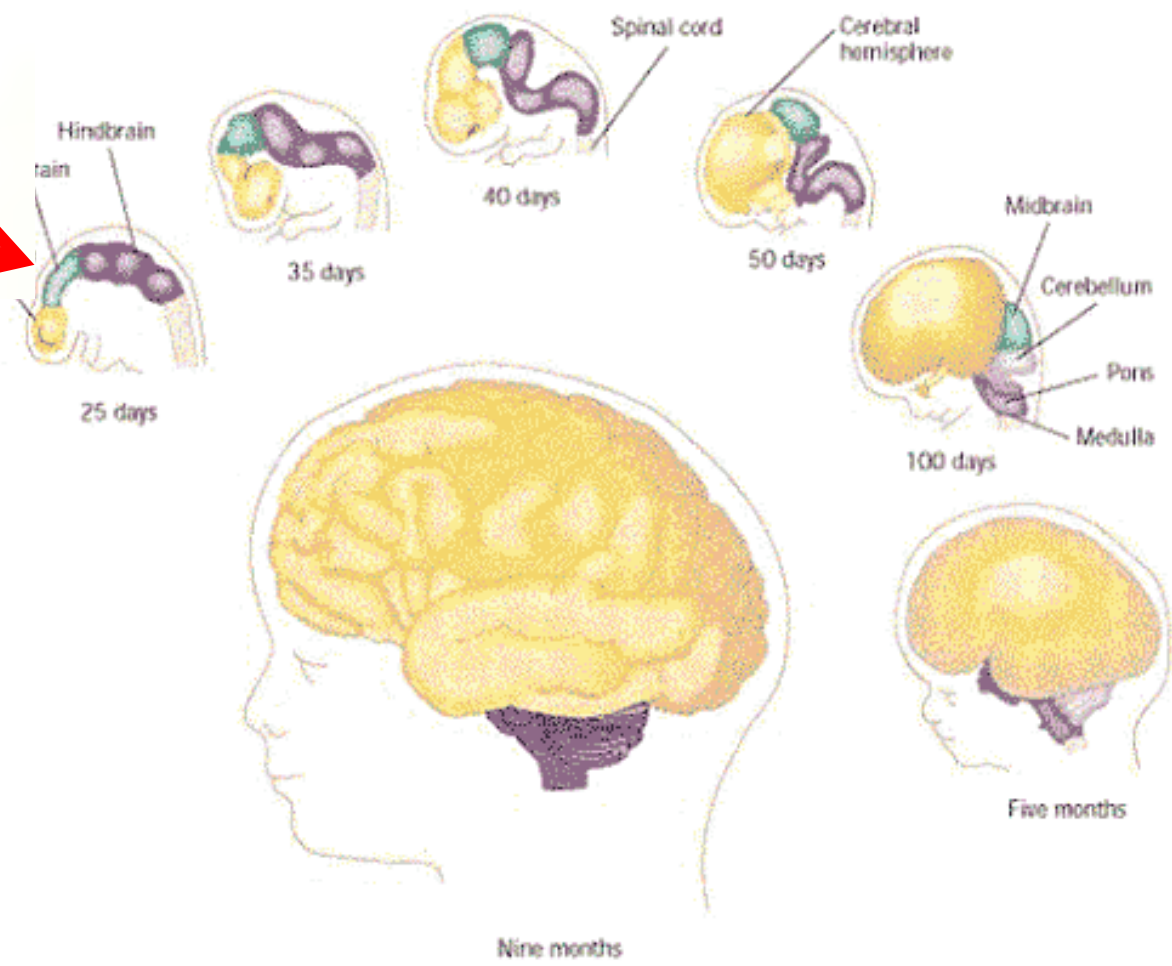
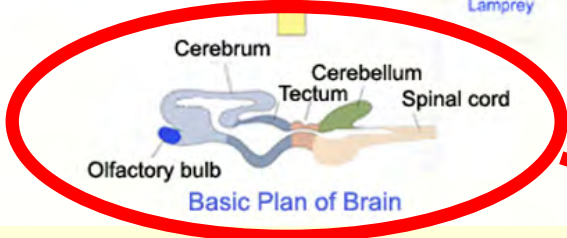
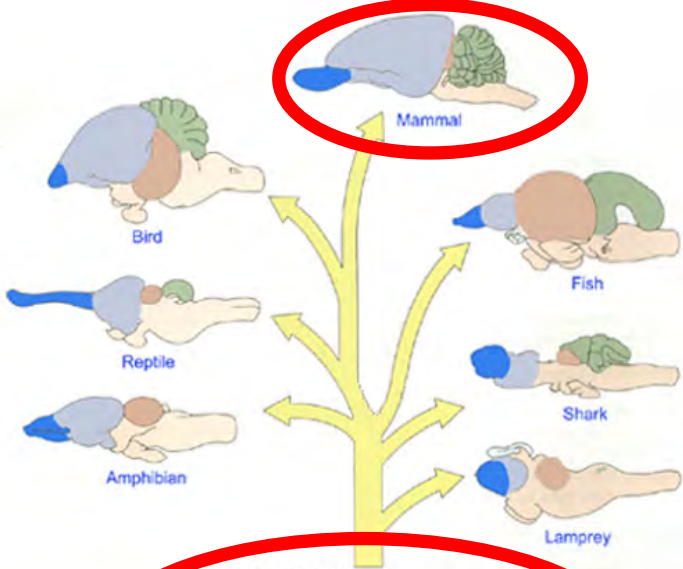


# Échelle de temps :

# Processus dynamiques :

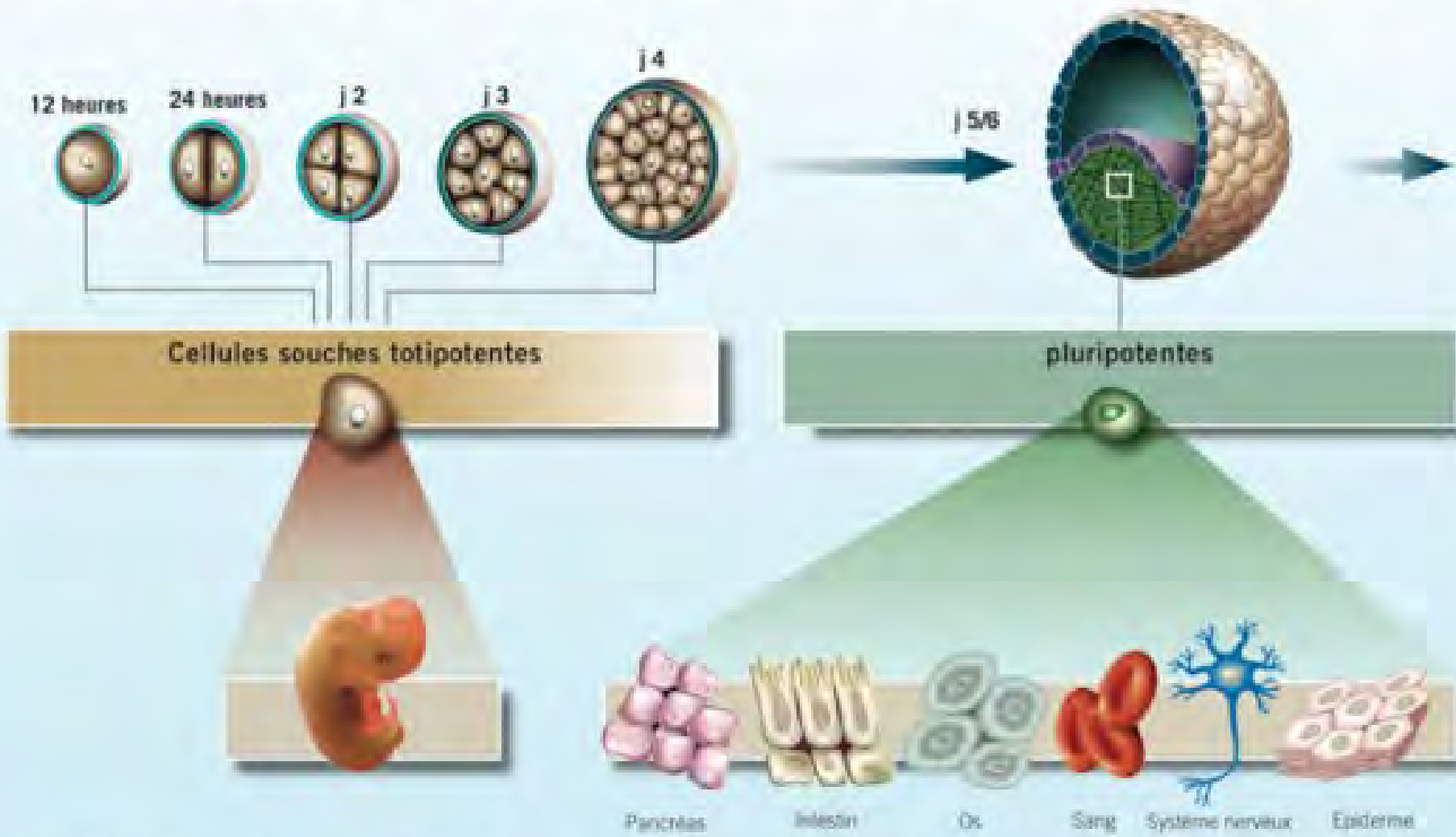


**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux



# Quatre types de cellules souches

PRÉEMBRYON  
STADE BLASTOCYTE

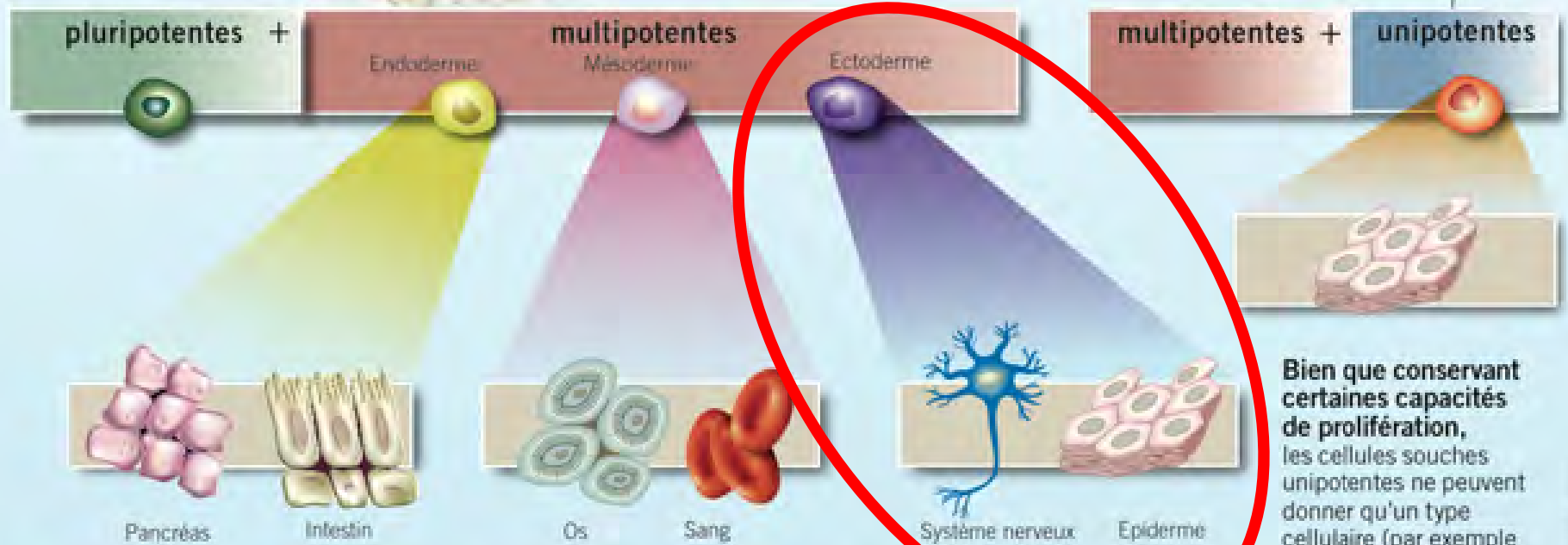
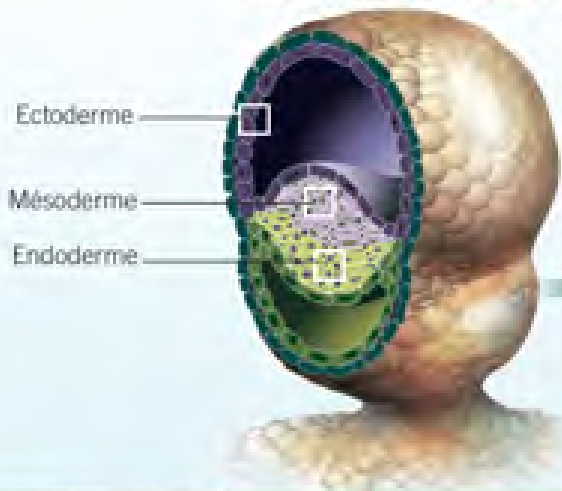


Issues des premières divisions de l'œuf fécondé, ces cellules sont indifférenciées et immortelles. Dites totipotentes, elles sont celles ayant la plus grande capacité de différenciation. Une seule d'entre elles – si elle était réimplantée dans un utérus – permettrait d'aboutir à un individu complet.

Présentes dans la masse interne du préembryon au stade de blastocyste, ces cellules pluripotentes sont immortelles et capables de se différencier en n'importe lequel des 200 types cellulaires. C'est sur ces fameuses « cellules souches embryonnaires humaines » (CSEh) que se concentre la recherche biomédicale actuelle.

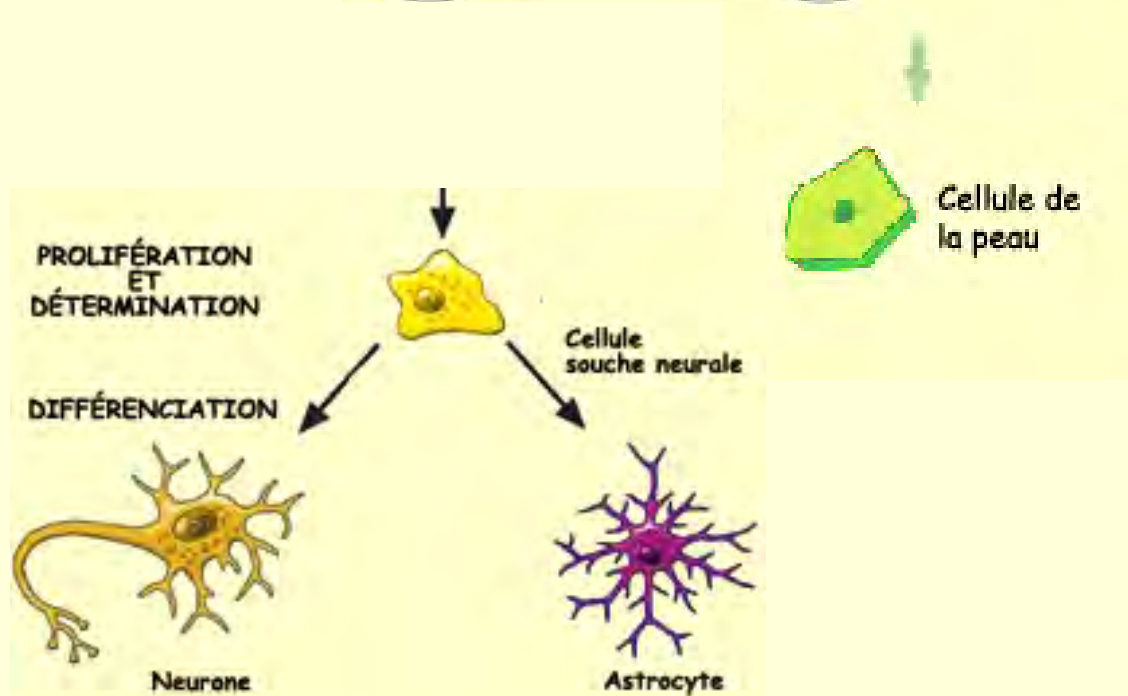
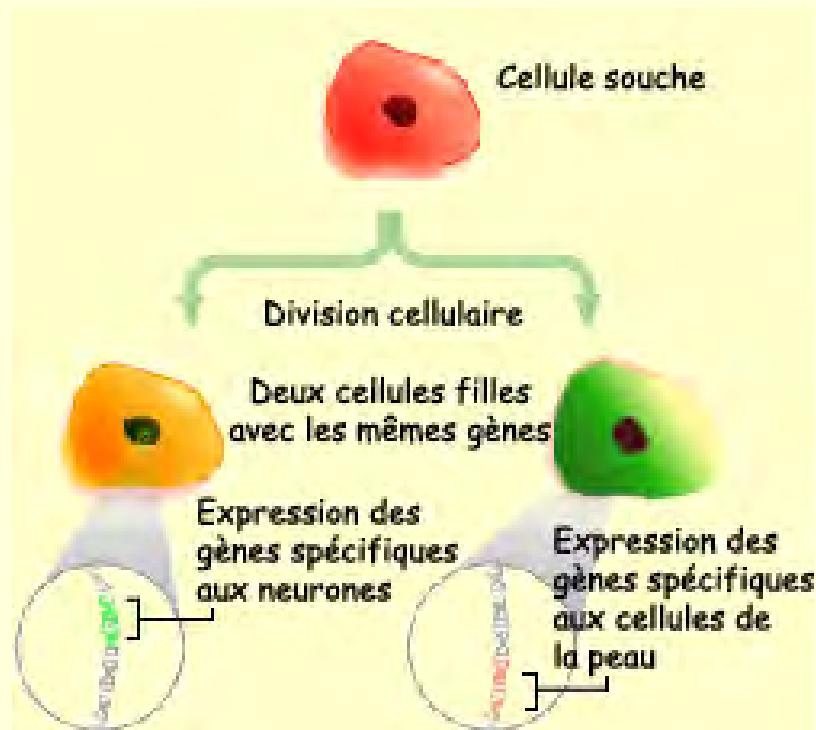
# EMBRYON IMPLANTÉ

# FŒTUS

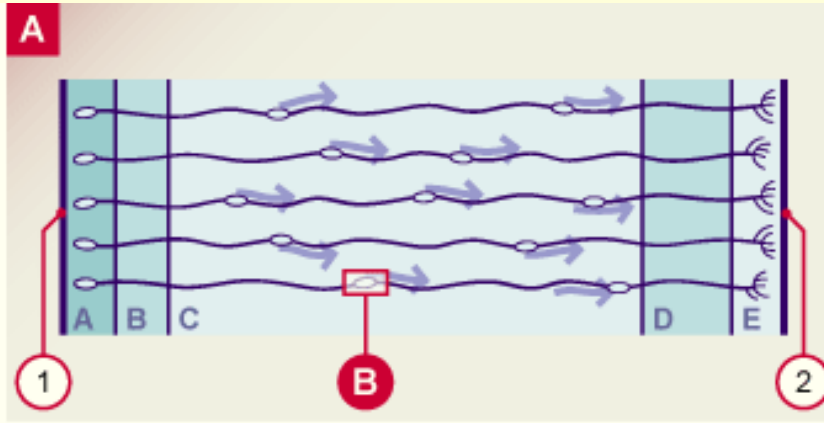
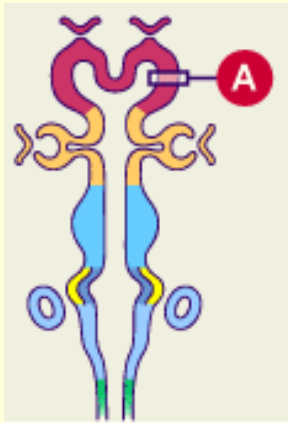


**Bien que conservant certaines capacités de prolifération, les cellules souches unipotentes ne peuvent donner qu'un type cellulaire (par exemple hépatocytes du foie ou kératinocytes de la peau). Un organisme adulte conserve aussi des niches de cellules souches multipotentes.**

**Hébergées dans des zones restreintes des différents tissus fœtaux ou adultes, les cellules souches multipotentes, appelées « cellules souches adultes », ne peuvent donner naissance qu'à un seul organe (en fonction du feuillet embryonnaire d'origine : mésoderme, endoderme ou ectoderme). Elles sont, en revanche, à l'origine de plusieurs types de cellules différenciées dudit organe. Une cellule souche hématopoïétique, par exemple, peut donner n'importe laquelle des cellules sanguines (globule rouge, globule blanc, plaquette...).**

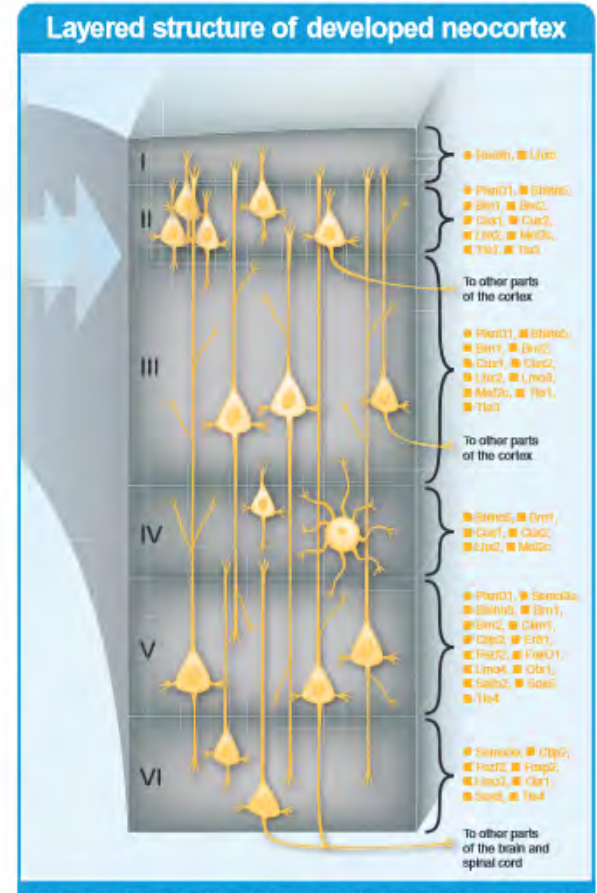
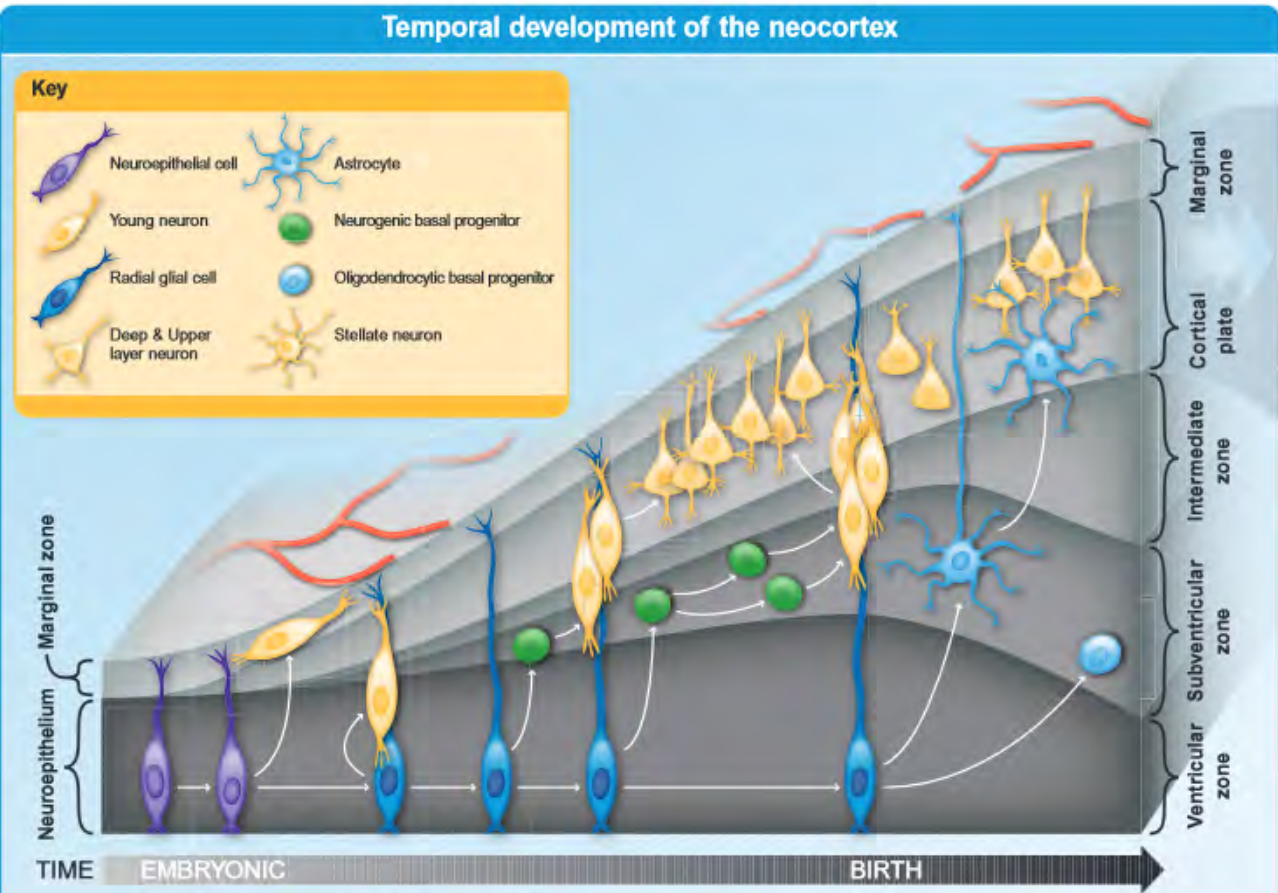






Le développement du cortex commence avec la **prolifération** cellulaire dans la zone ventriculaire du télencéphale.

Ces neurones **migrent** le long de cellules gliales radiales jusqu'à la plaque corticale, en préservant leur **pattern topographique en colonnes**



The developed neocortex consists of six layers responsible for its specification. Some transcription factors are expressed in specific layers.



Le développement du système nerveux pose un problème particulier par rapport aux autres systèmes de l'organisme. En effet, les cellules du corps humain autres que nerveuses font partie de populations **homogènes**.

Autrement dit, une cellule bêta du pancréas va par exemple sécréter de l'insuline peu importe où elle est située dans le pancréas.

Il en va tout autrement des neurones puisque **leur position dans le système nerveux est déterminante pour leur fonction**.

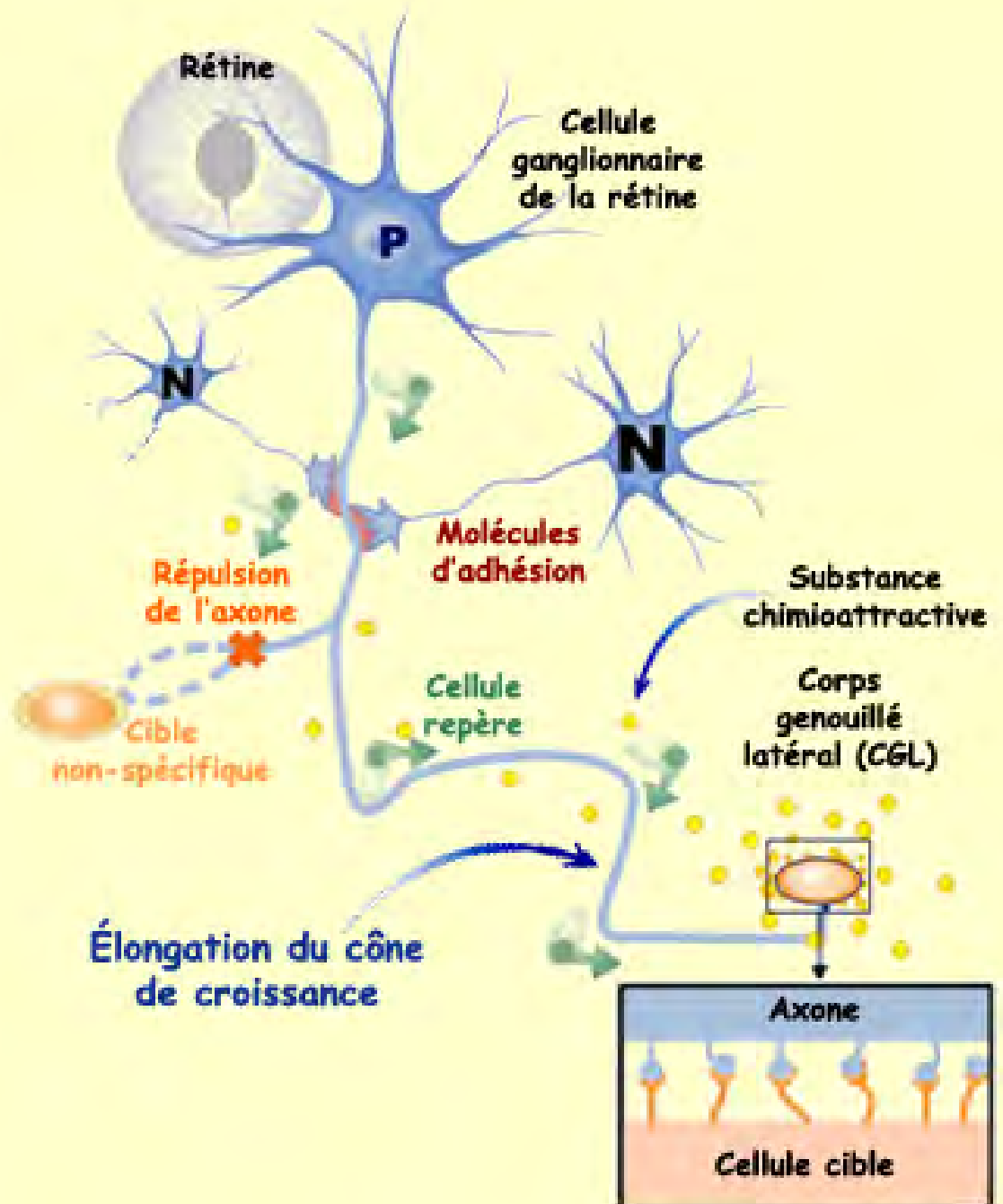
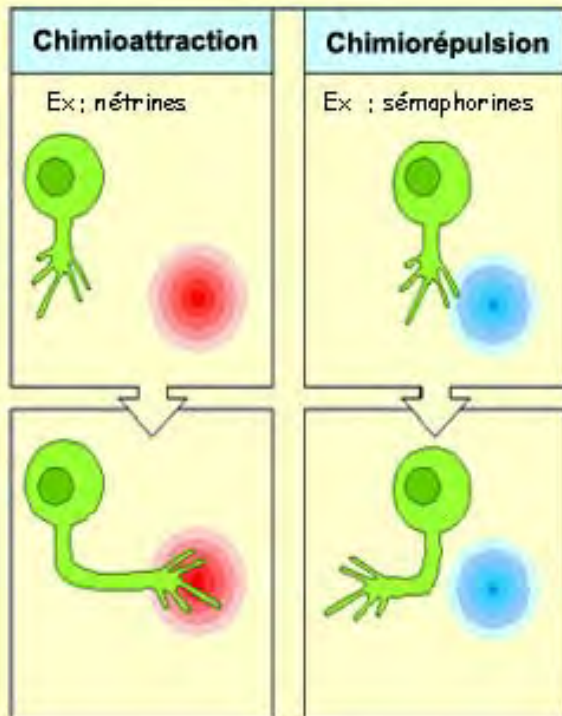
Le rôle que joue un neurone dans le cerveau dépend beaucoup de sa localisation car c'est l'emplacement d'un neurone qui détermine grandement **les connexions qu'il fera avec ses semblables**.

Ensuite, pour que les neurones puissent ensuite établir des connexions entre eux, il faut qu'ils développent **les prolongements qui les caractérisent.**

Suite à la prolifération des cellules nerveuses et à leur migration vers leur emplacement définitif dans le cerveau, on assiste donc au **développement des dendrites et de l'axone.**



Une fois le neurone positionné, différents mécanismes vont permettre aux axones d'atteindre leur **cellule cible**.



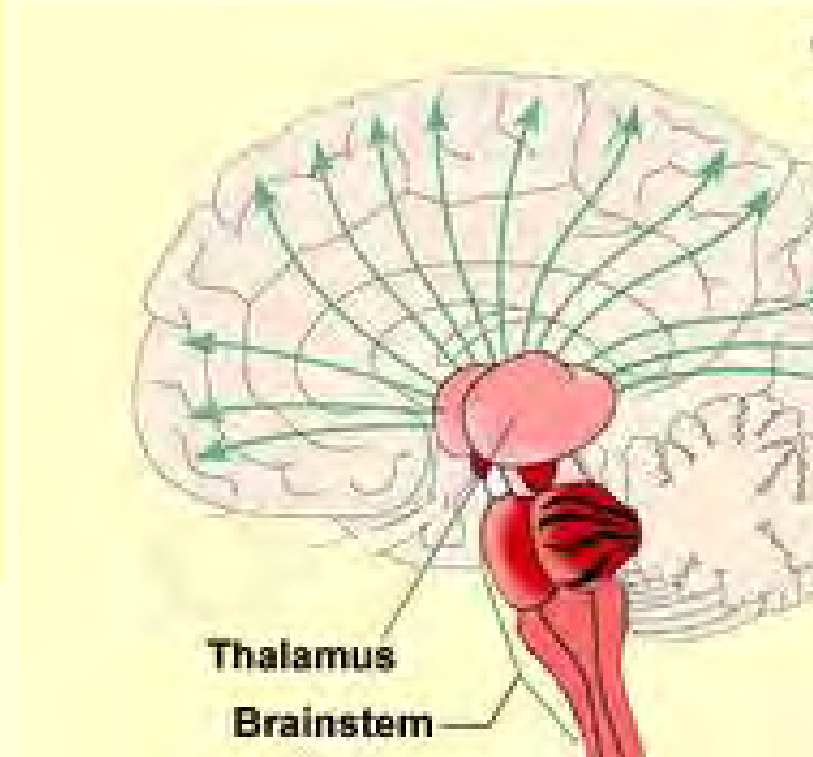
L'autre grand facteur dans la formation des aires corticales :

les inputs extérieurs en provenance du thalamus

Par exemple, pour les aires corticales sensorielles, **l'activité spontanée** dans les **cellules ganglionnaires de la rétine** est essentiel durant le développement (bien avant que l'œil ne s'ouvre).

Si l'on arrête cette activité spontanée, on obtient un cortex visuel déficient, sans différenciation claire entre V1 et les aires secondaires voisines.

Une fois leur position atteinte, l'identité de ces neurones va guider l'établissement des **connexions en provenance du thalamus**;



Et **après la naissance, dans les premières années de vie** surtout, le développement du système nerveux devient grandement **dépendant de l'activité dans ses circuits.**

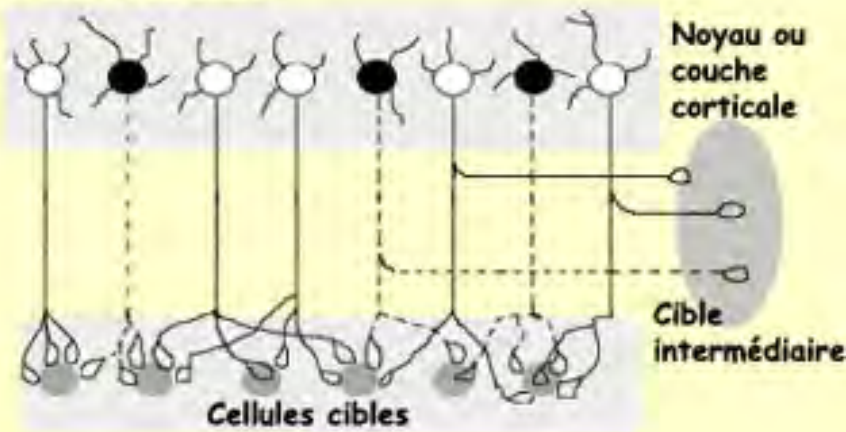
Autrement dit, des **interactions de l'enfant avec l'environnement.**

On peut qualifier les mécanismes alors à l'œuvre **d'épigénétiques.**

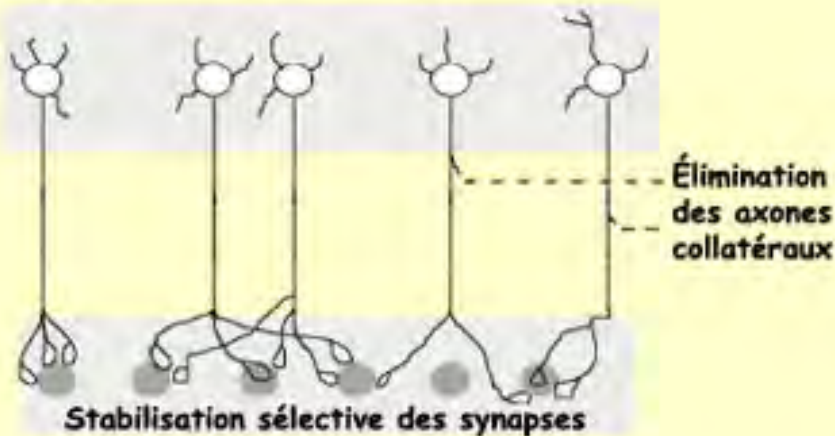
(qui viennent après la génétique...)



### A Mort neuronale



### B Ajustement des circuits neuronaux



Ces mécanismes épigénétiques comprennent des **ajustements réciproques entre les éléments pré- et post-synaptique** en vue d'accroître la précision et l'efficacité des circuits.

Deux mécanismes y participent activement :

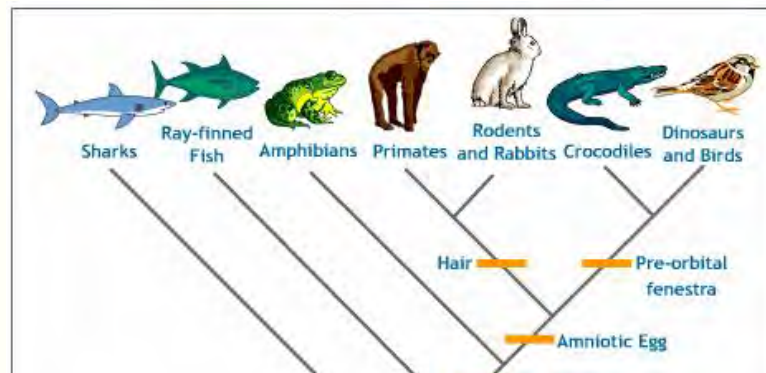
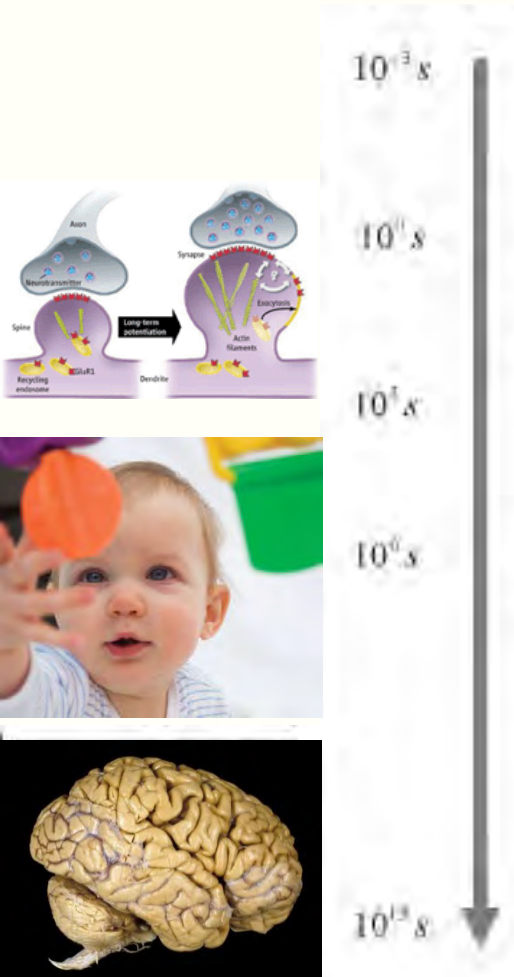
- l'ajustement de la taille de la population neuronale par la mort neuronale (ou apoptose) de certains neurones (voir capsule outil à gauche);
- l'ajustement fin des circuits neuronaux par stabilisation et élimination sélective de certaines synapses.

Cette élimination de synapses dépend de **facteurs de croissance** sécrétés par les cellules cibles mais aussi des stimulations sensorielles reçues par le cerveau

La phase d'élimination sélective des synapses débute **vers un an** et va amener une diminution de 60 % des synapses à l'âge adulte.

# Échelle de temps :

# Processus dynamiques :



**L'apprentissage** durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

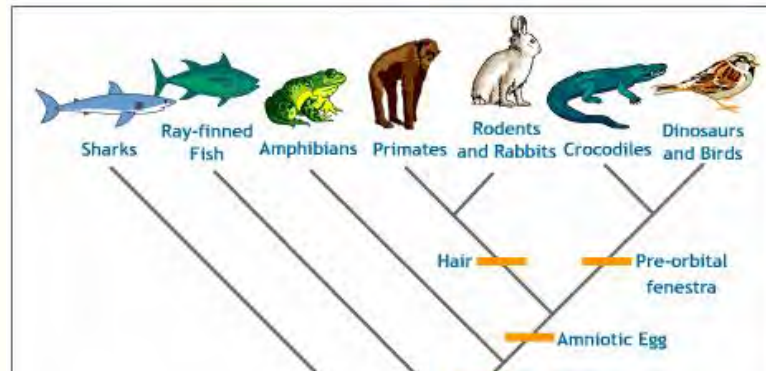
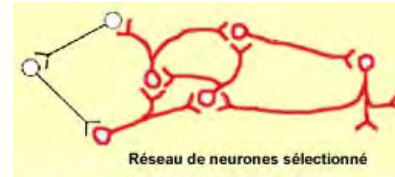
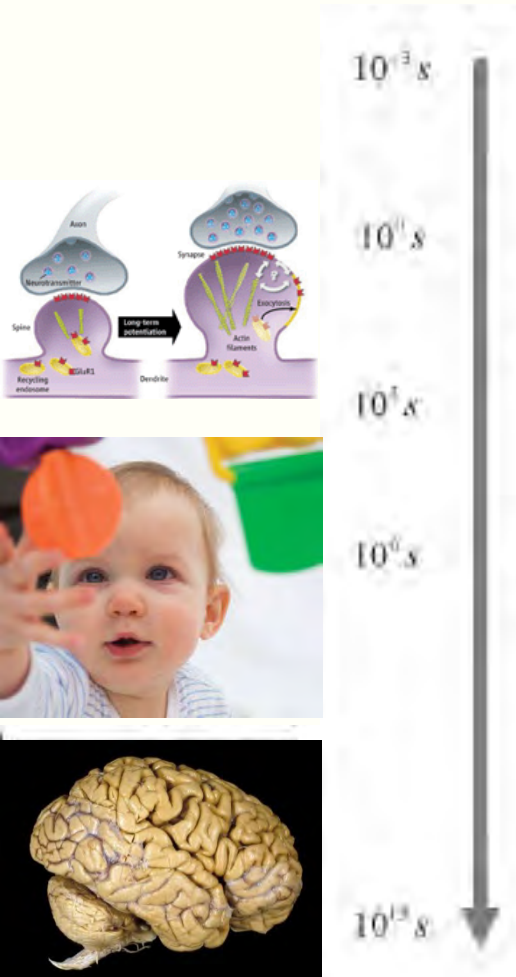
**Développement** du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux



# Échelle de temps :

# Processus dynamiques :



La semaine dernière !

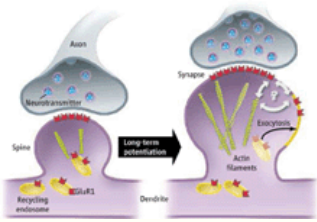
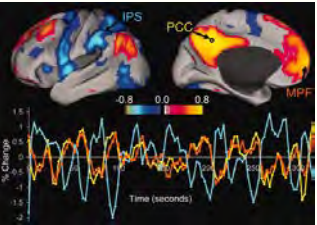
L'apprentissage durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

Développement du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

Évolution biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux

# Échelle de temps :

# Processus dynamiques :



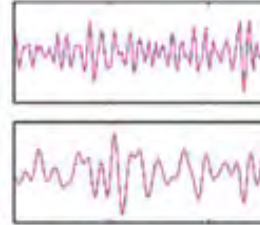
$10^{-3} s$

$10^{-1} s$

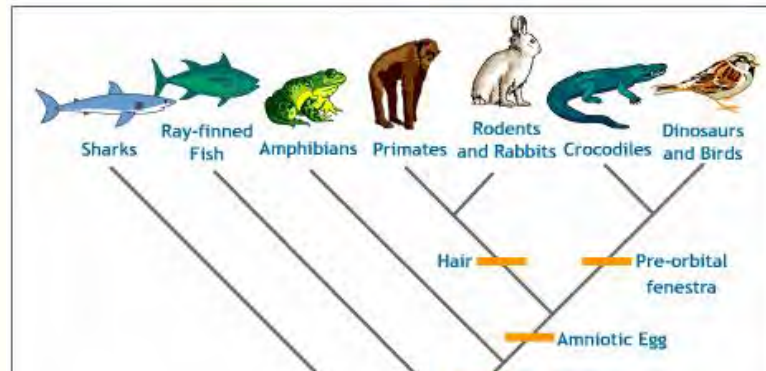
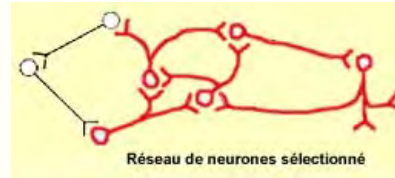
$10^1 s$

$10^6 s$

$10^{13} s$



La semaine prochaine !



Perception et action devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

L'apprentissage durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

Développement du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

Évolution biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux n

# La séance d'aujourd'hui : la « cartographie » cérébrale

Grandes autoroutes...

...et petites rues locales.

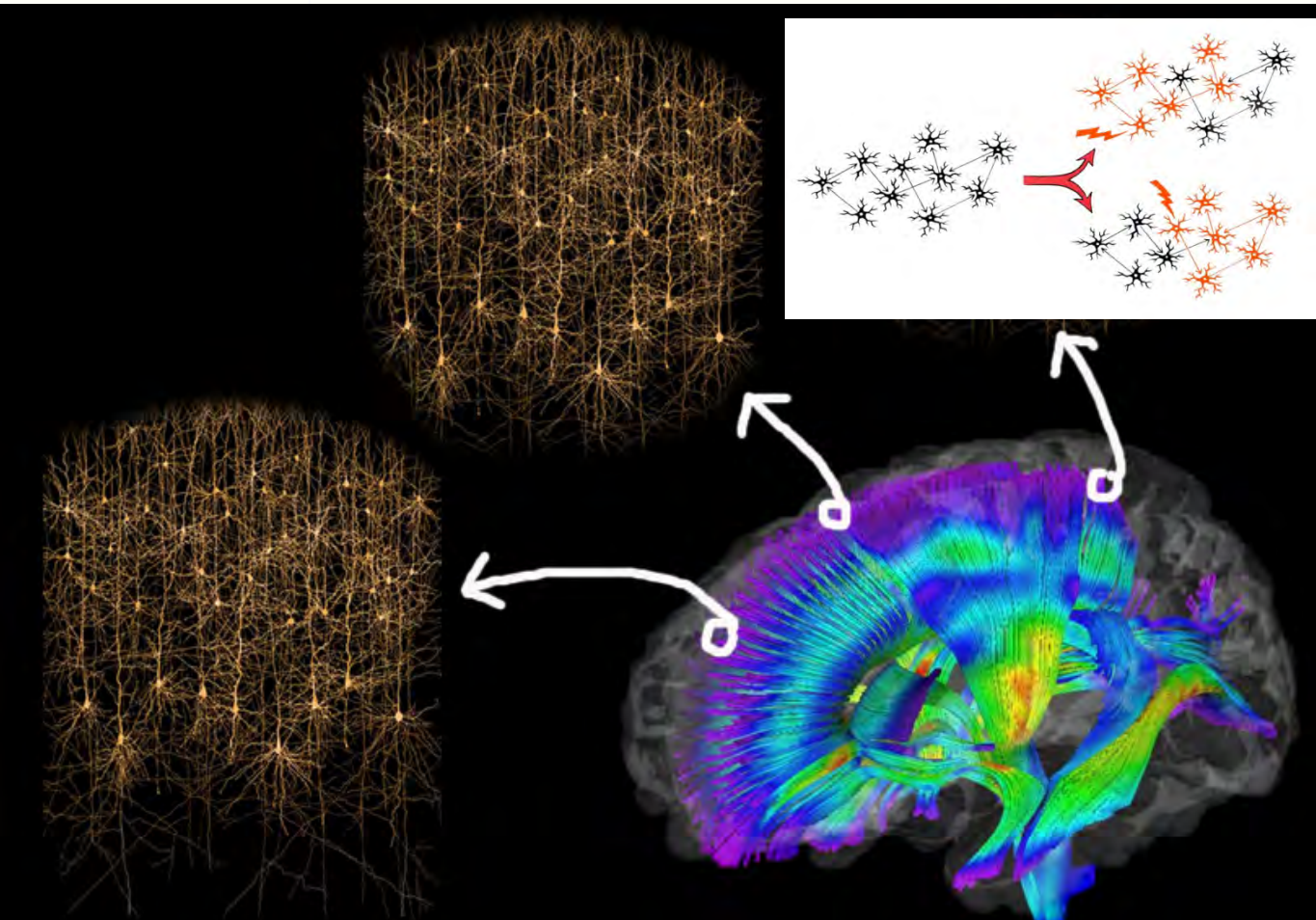
## Processus dynamiques :

Perception et action devant  
des situations en temps réel  
grâce à des coalitions  
neuronales synchronisées  
temporairement

L'apprentissage  
durant toute la vie  
par la plasticité des  
réseaux de neurones

Développement  
du système nerveux  
par des mécanismes  
épigénétiques

Évolution biologique  
qui façonne les plans  
généraux du système  
nerveux



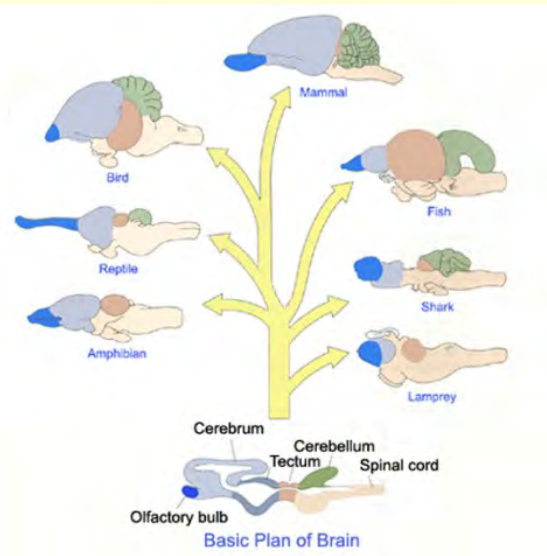
Une bonne **métaphore**  
pour rendre compte de tous  
ces processus dynamiques  
qui façonnent notre cerveau  
et donc notre psychologie...





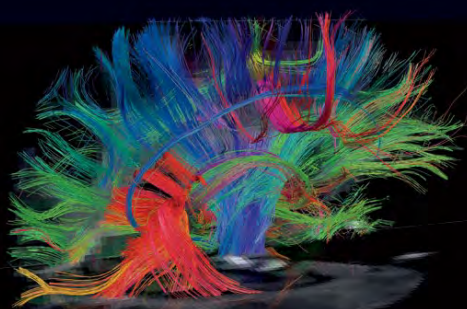
Le flux de l'eau est l'activité électrique du cerveau qui fluctue constamment.

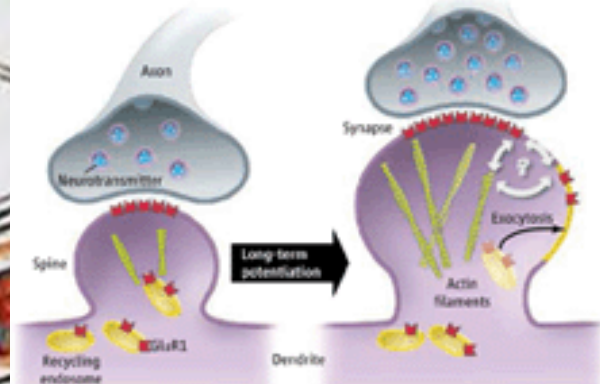
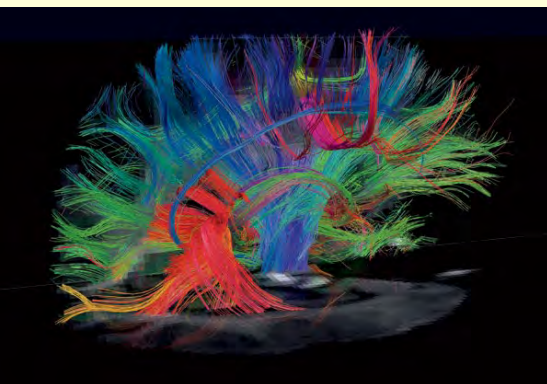
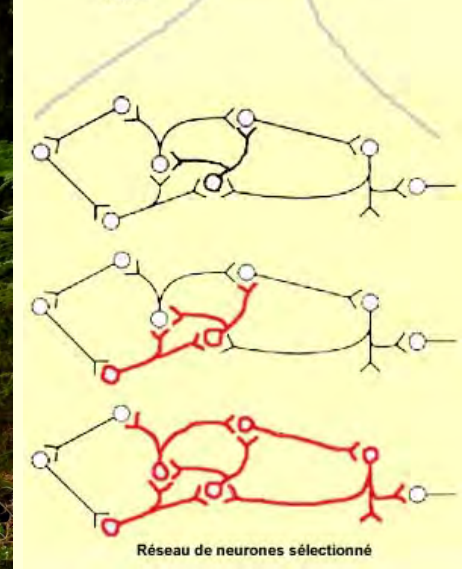
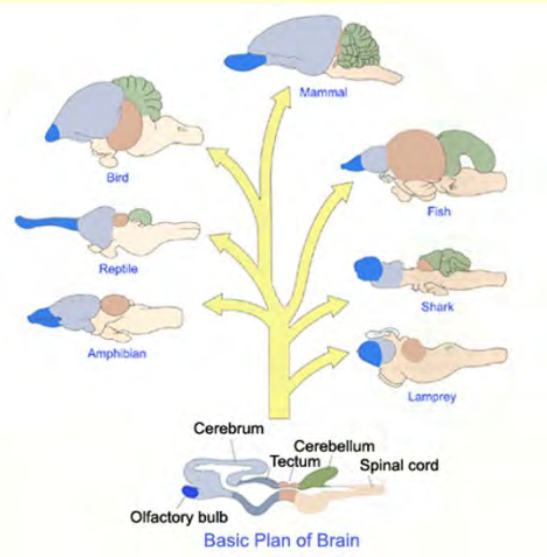
Et ces fluctuations sont contraintes par le système nerveux humain issu de sa longue histoire évolutive.



Mais sur une échelle de temps plus longue, le lit de la rivière est **érodé** par l'eau et **se modifie**.

Tout comme les petites routes de nos circuits nerveux sont modifiées par notre histoire de vie.





# Processus dynamiques :

**Perception et action** devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

Deux considérations découlent de cette conception dynamique :

Premièrement...

**L'apprentissage** durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

**Développement** du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux



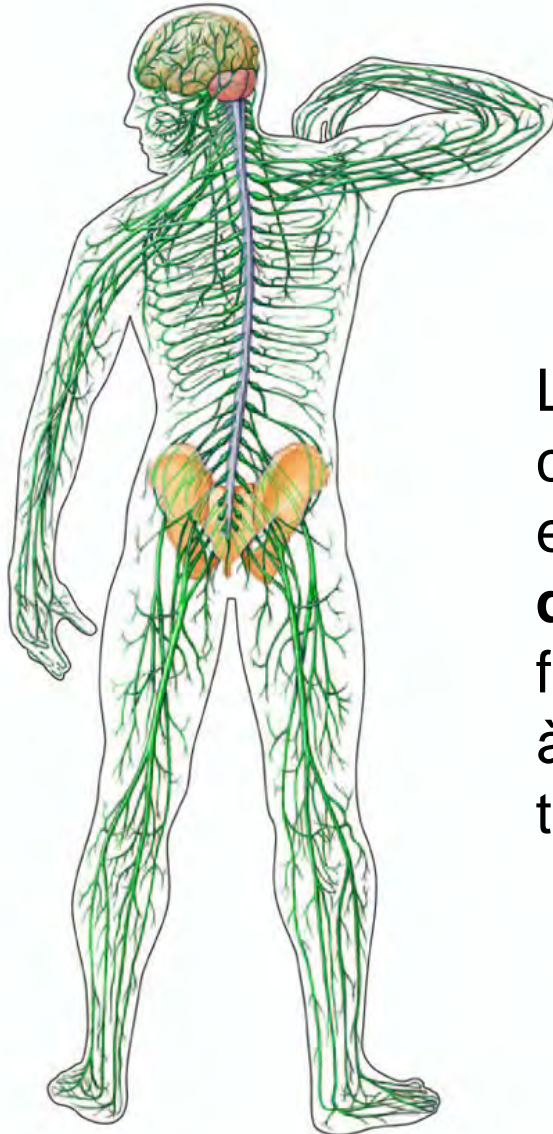
# Processus dynamiques :

**Perception et action** devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

**L'apprentissage** durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

**Développement** du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux



Le corps entier de chaque organisme est un « **modèle** » de son environnement façonné par celui-ci à différentes échelles de temps.

# Processus dynamiques :

**Perception et action** devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

**L'apprentissage** durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

**Développement** du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux

Deuxièmement...

# Processus dynamiques :

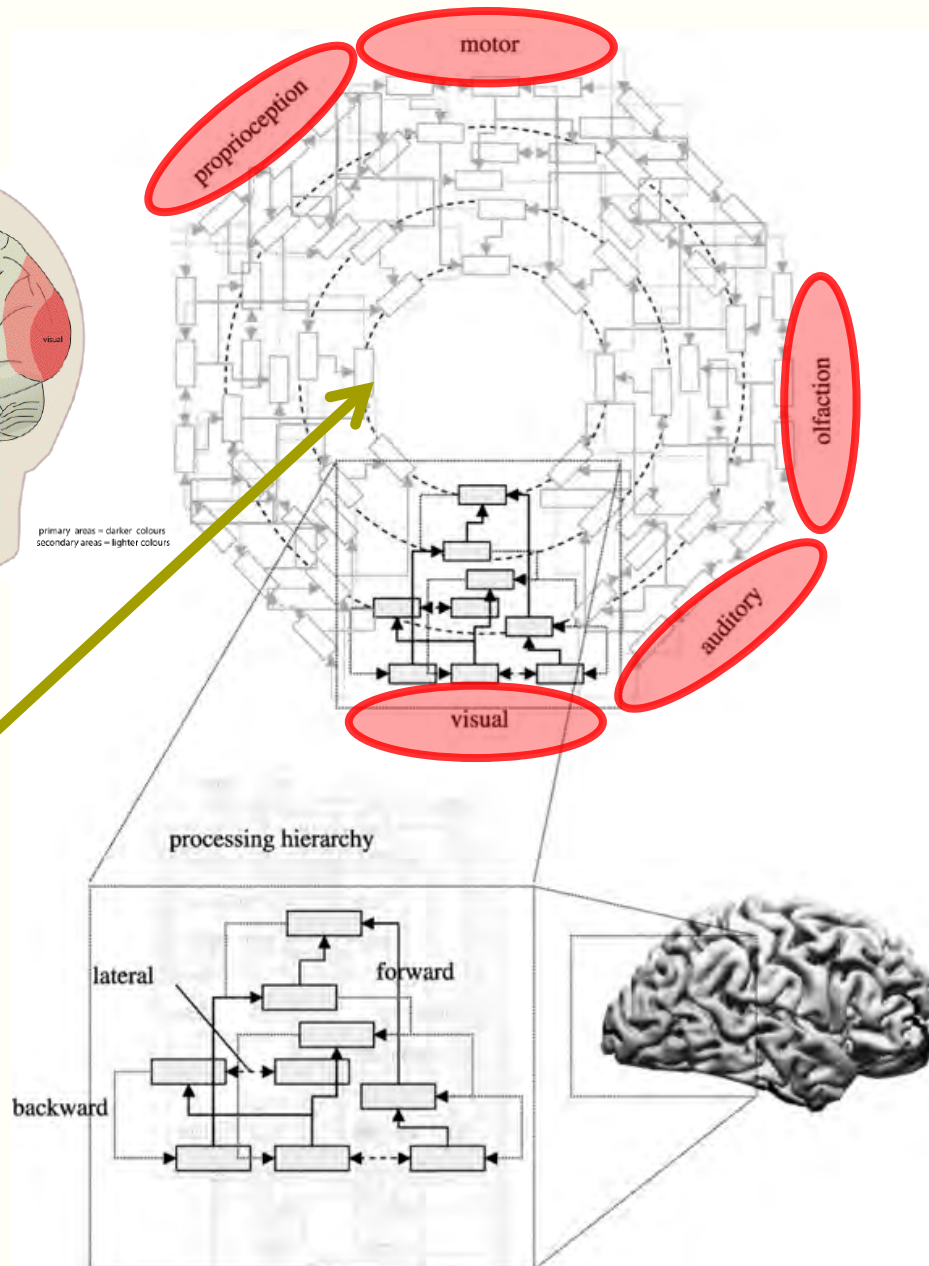
**Perception et action** devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

**L'apprentissage** durant toute la vie par la plasticité des réseaux de neurones

**Développement** du système nerveux par des mécanismes épigénétiques

**Évolution** biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux

Plus stable



# Problème de dimension



On vit dans un monde tridimensionnel et les objets, un arbre comme notre cerveau, ont aussi **3 dimensions**.

Or l'observation du cerveau avec différents types de microscopes nous oblige à couper le cerveau en **minces tranches quasi bidimensionnelles** pour pouvoir l'observer.

Le problème, c'est qu'on **perd** ainsi la richesse des trois dimensions de l'arbre dendritique des neurones ou de la divergence des voies neuronales dans diverses directions.

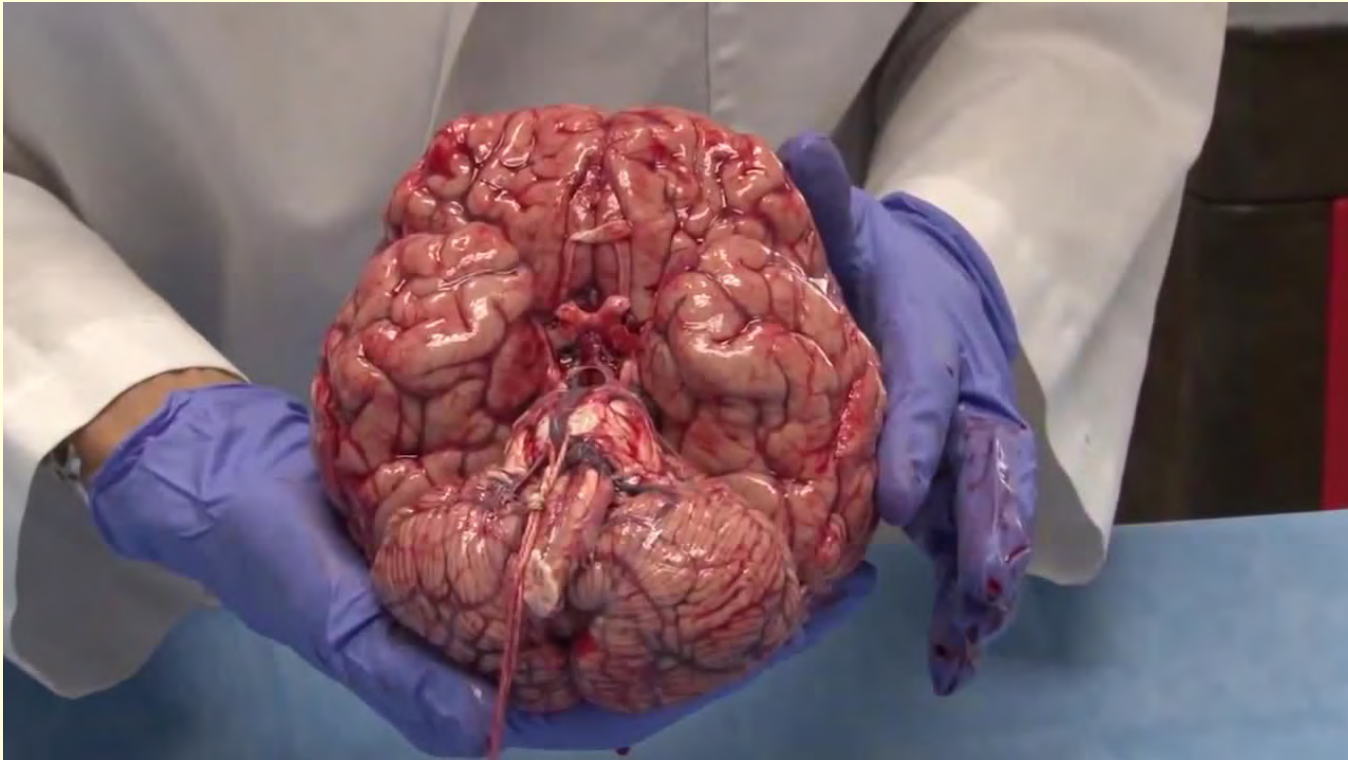
# Problème de « consistance »

## The Unfixed Brain

<https://www.youtube.com/watch?v=jHxyP-nUhUY>

**Jan 9, 2013**

In this teaching video, Suzanne Stensaas, Ph.D., Professor of Neurobiology and Anatomy at the University of Utah School of Medicine, demonstrates the properties and anatomy of an unfixed brain. **WARNING:** The video contains graphic images, a human brain from a recent autopsy.



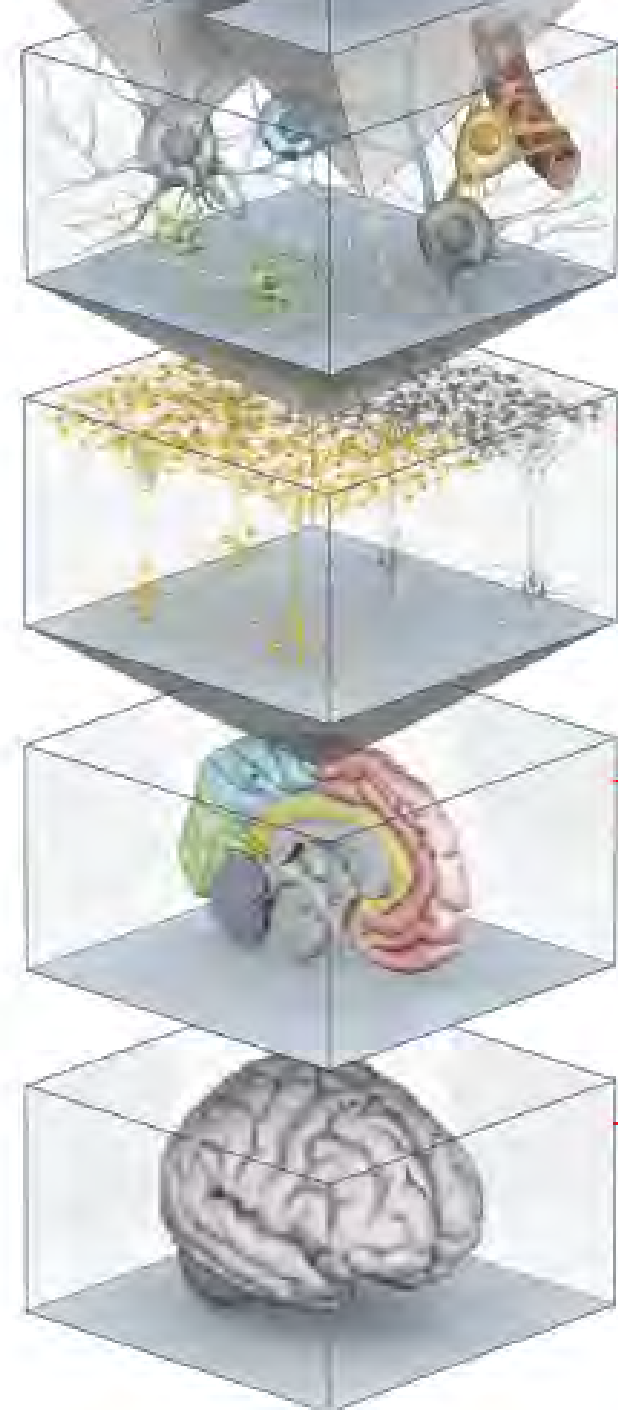
# Problème d'échelle

On voit les synapses individuelles, mais on ne sait pas quels sont les neurones connectés.

On voit certains groupes de neurones en connecter d'autres, mais on ne voit ni les synapses, ni la position de ces neurones dans les structures cérébrales.

On voit les grands faisceaux entre les structures cérébrales, mais pas les groupes de neurones d'où ils partent, et encore moins les synapses.

On voit l'activité globale du cerveau, mais il manque souvent les détails de la connectivité particulière du cerveau du sujet (et bien sûr les connexions entre neurones et les synapses)



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

## Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

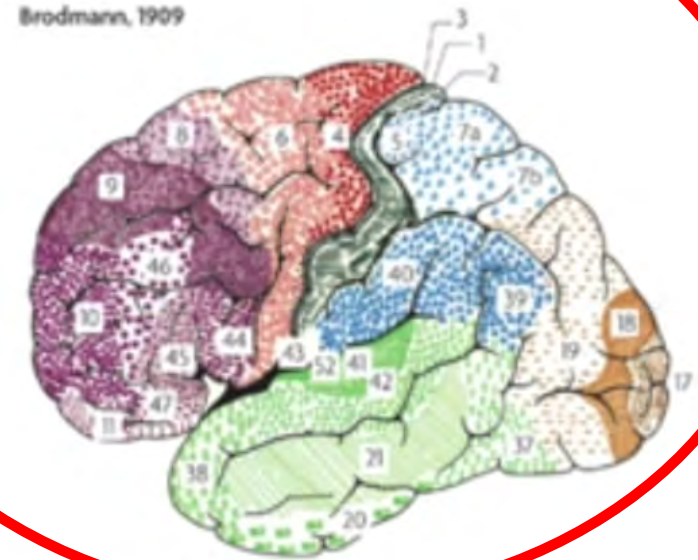




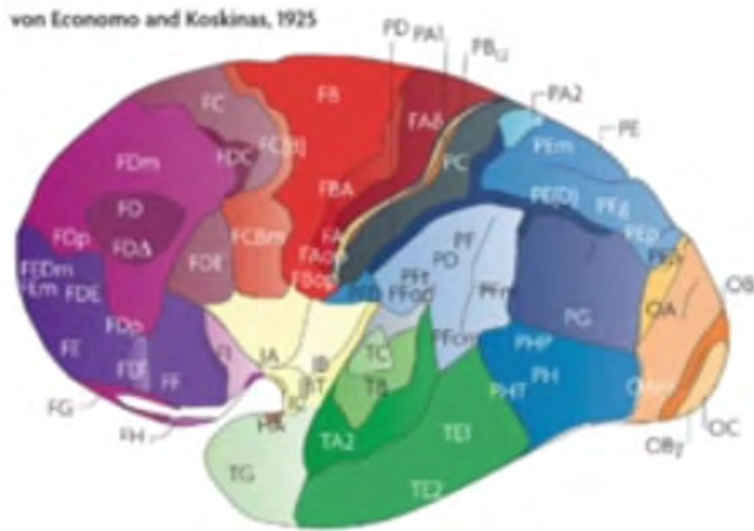
# Campbell, 1905



# Brodmann, 1909

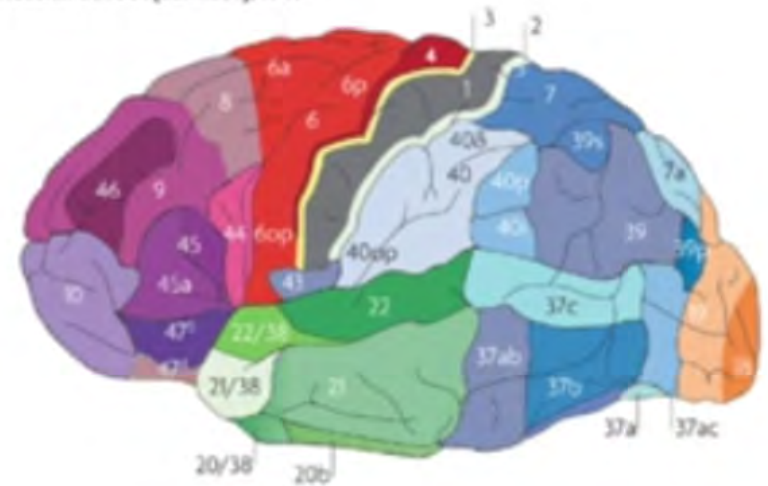


# von Economo and Koskinas, 1925



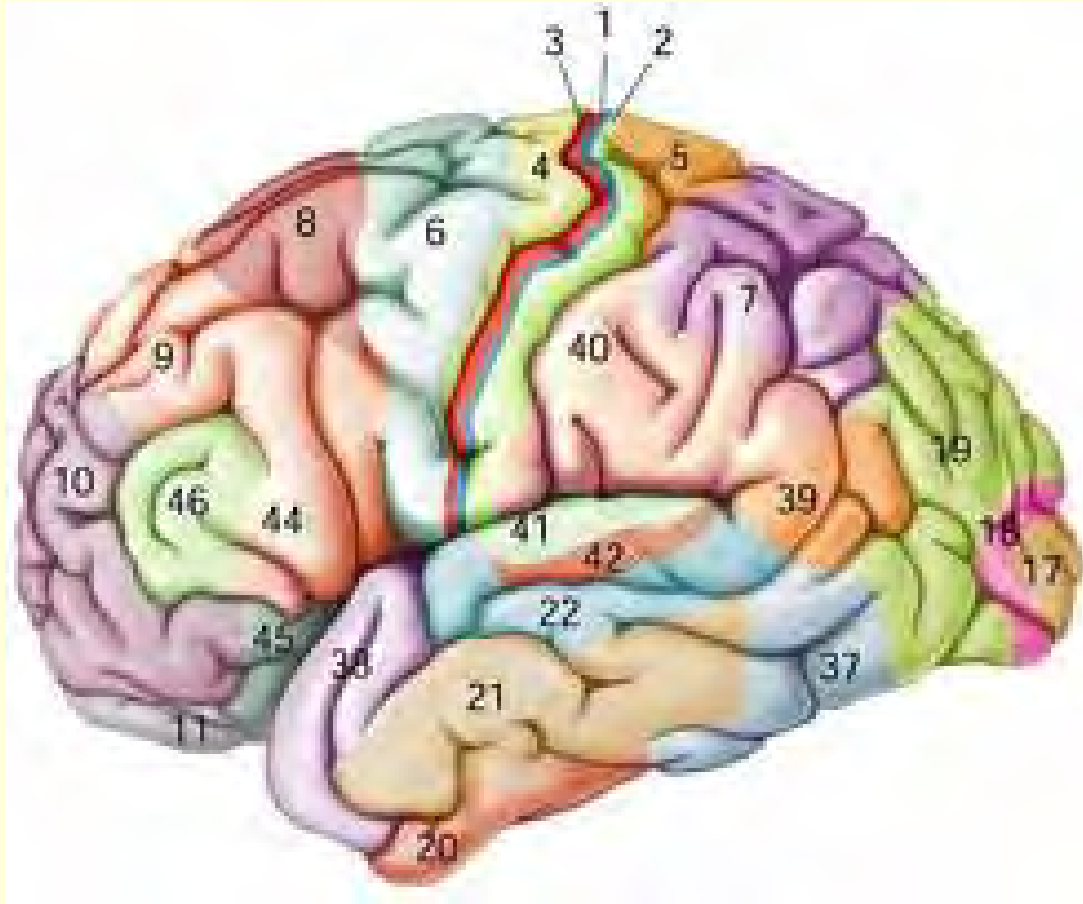
# von Economo and Koskinas, 1925

# Russian school (Sarkisov), 1949

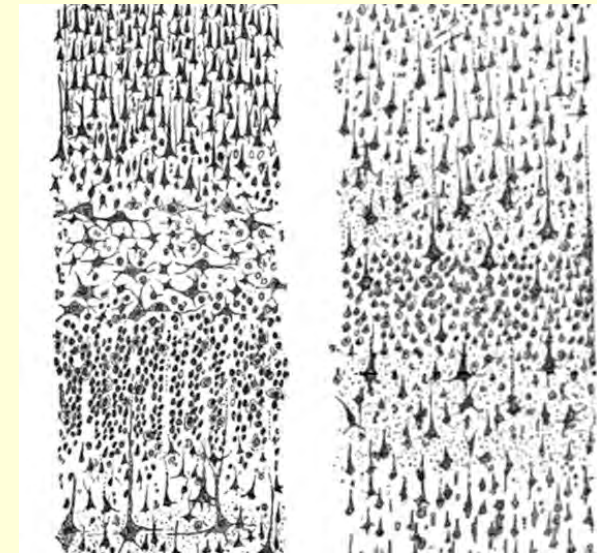


# Russian school (Sarkisov), 1949

## 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.

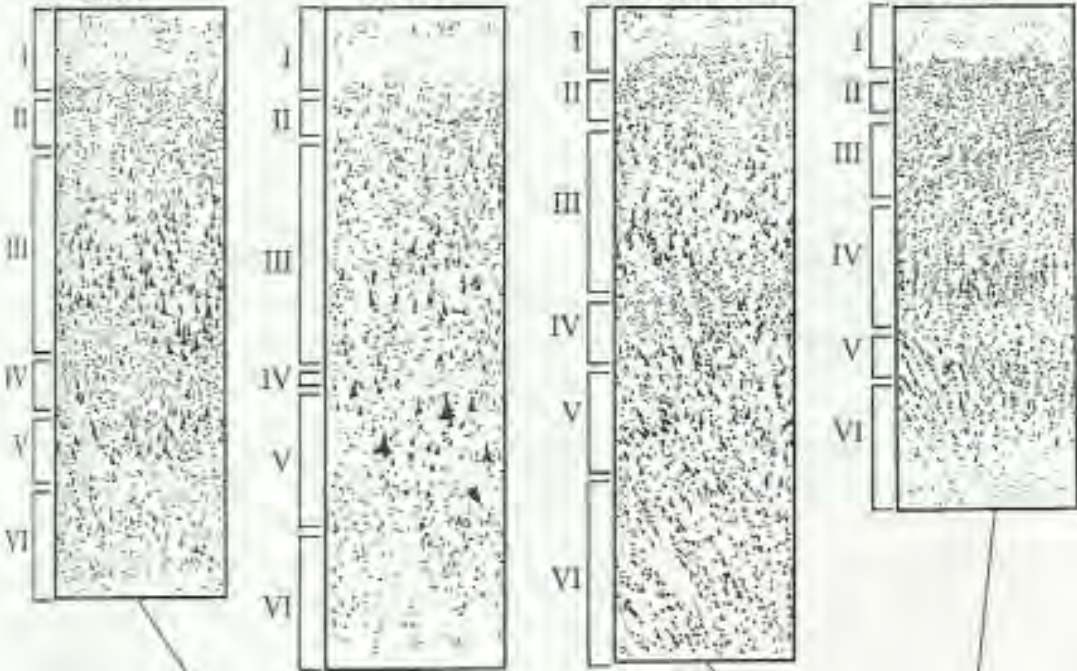


Prefrontal association cortex

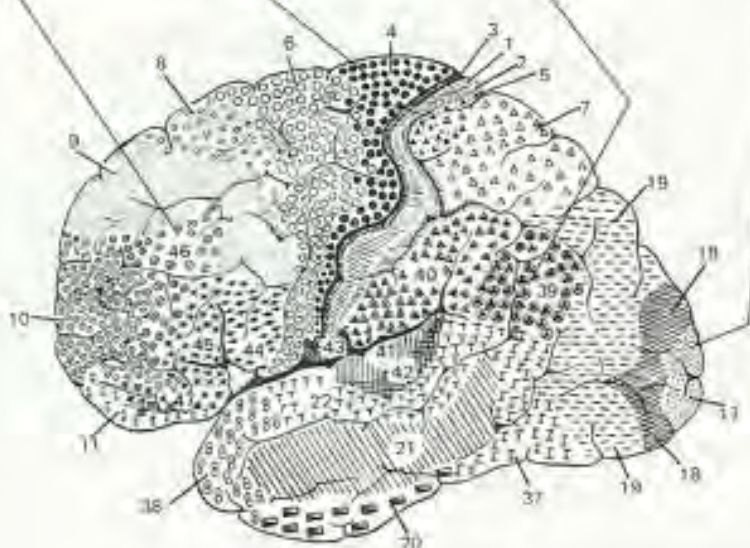
Primary motor cortex

Parietal-temporal-occipital association cortex

Primary visual cortex



Lateral



Et on sait aujourd'hui qu'effectivement cette **organisation cellulaire du cortex** n'est pas sans rapport avec les fonctions des différentes aires corticales.

# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

**Les techniques de traçage classiques**

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

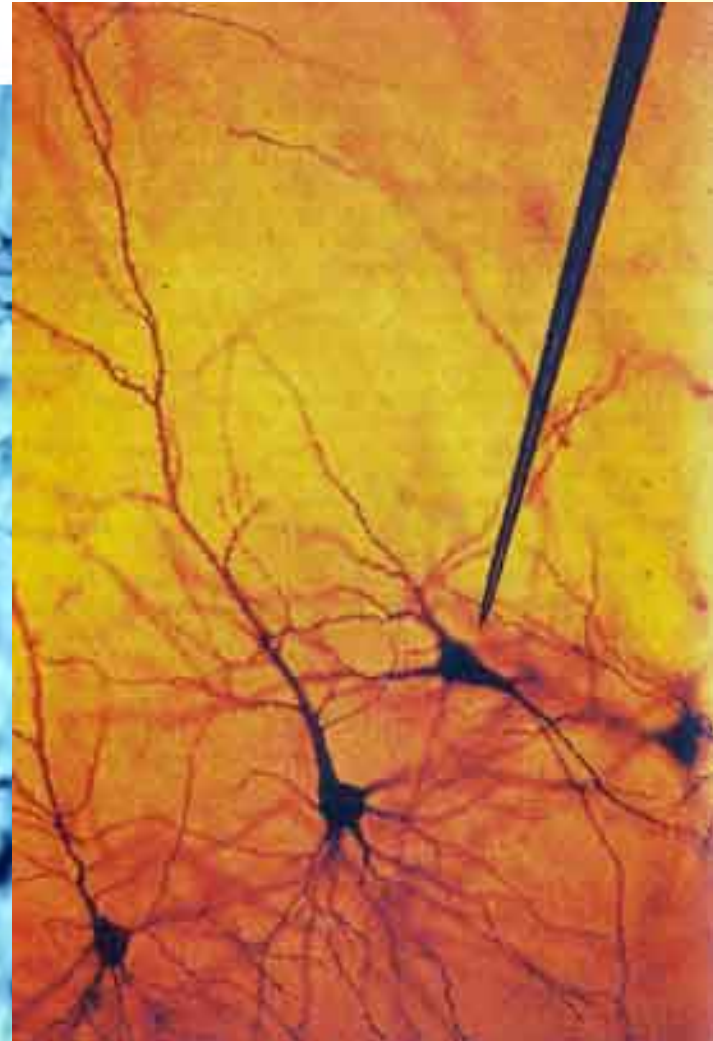
L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

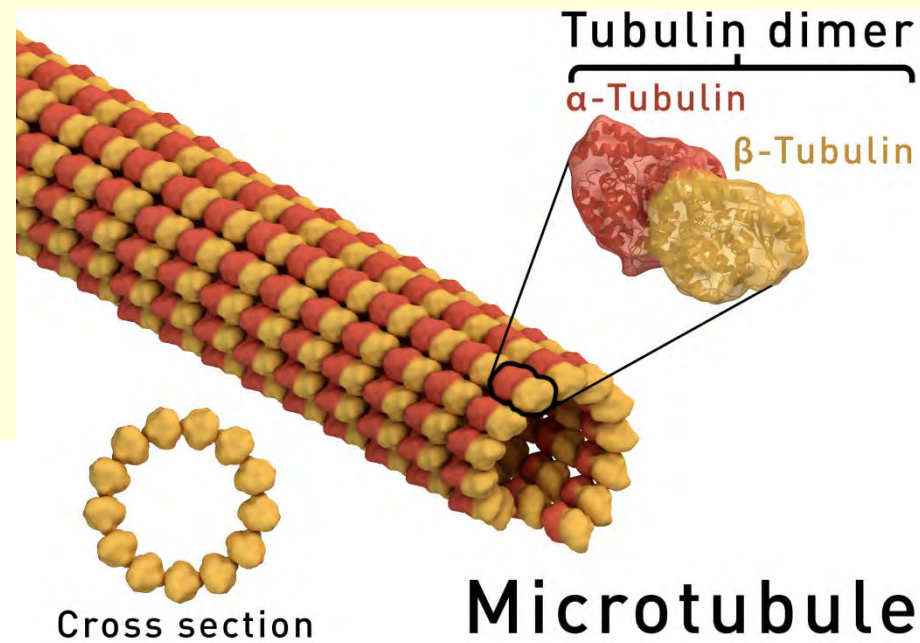
Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

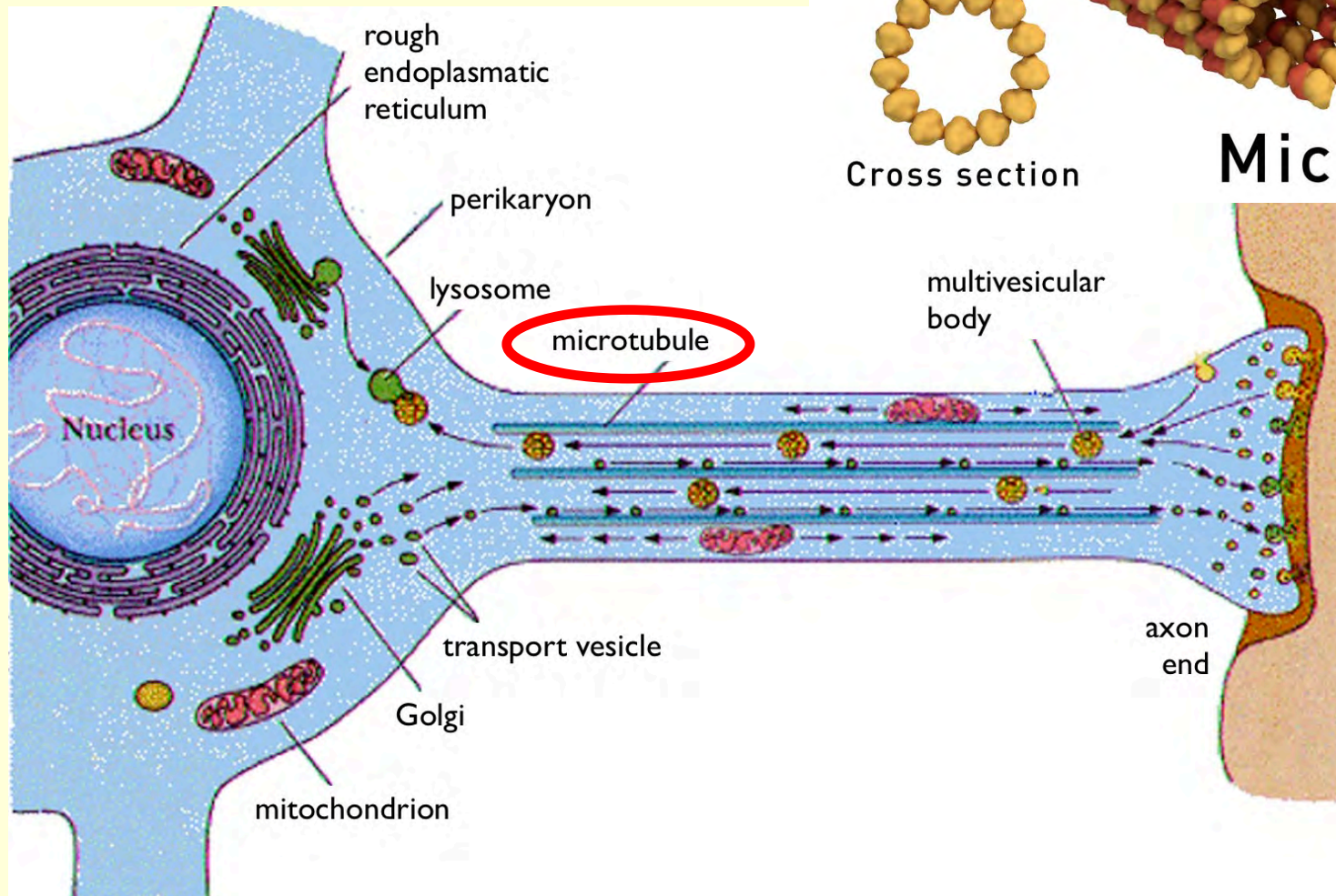
Comment retracer le trajet des axones dans le cerveau ?



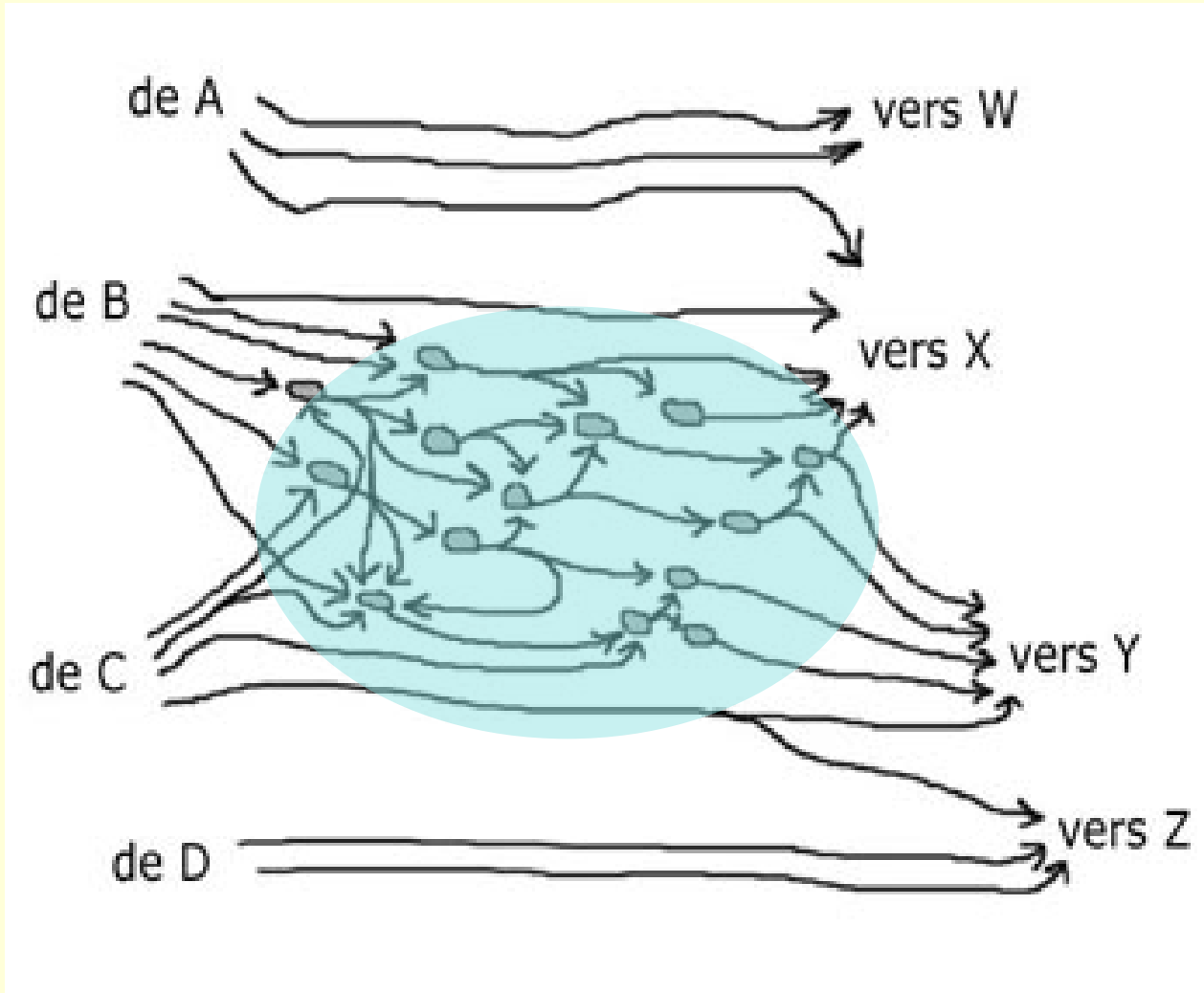
Avec des animaux, on utilise des **techniques de traçage**, basée la capacité qu'ont les neurones de faire circuler des molécules dans leur axone (le "**transport axonal**").



## Microtubule

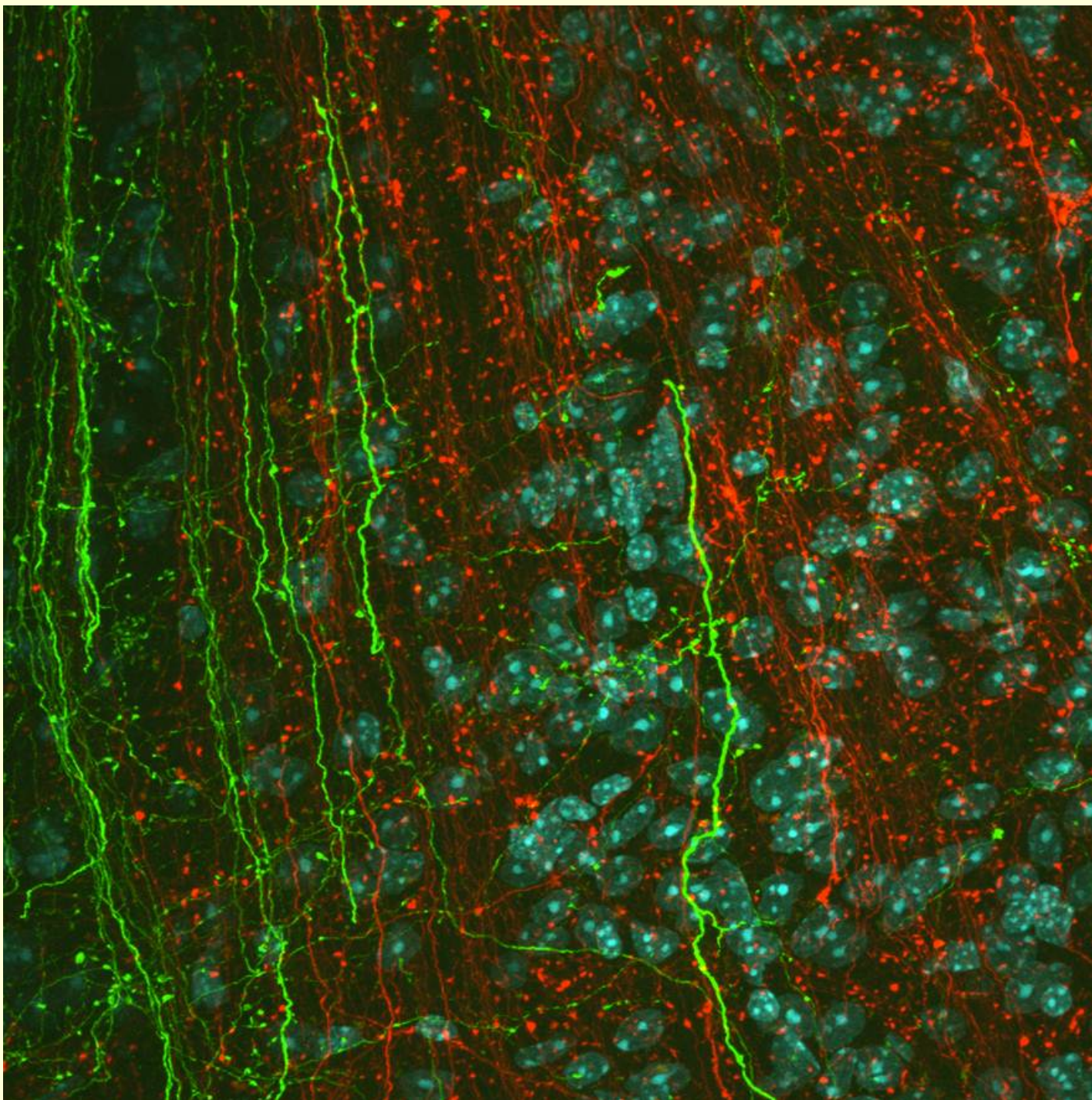


Et c'est avec de telles techniques de traçage que l'on va pouvoir établir le tracé des axones de différents groupes de neurones.



Capsule outil : l'identification des voies cérébrales

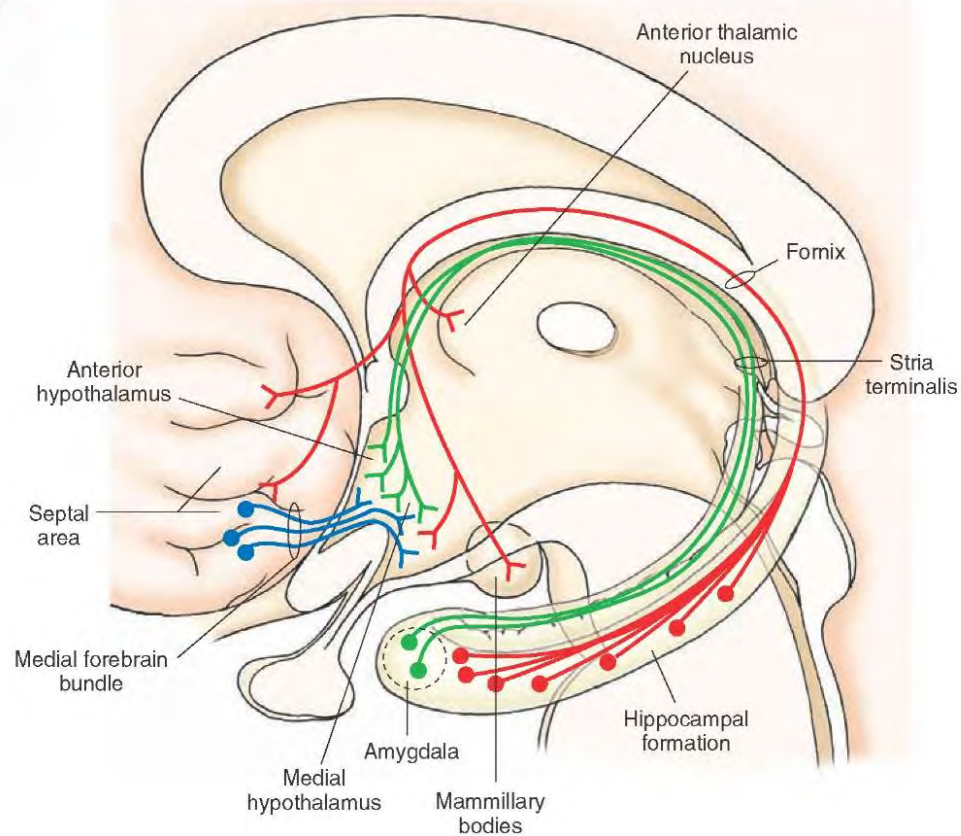
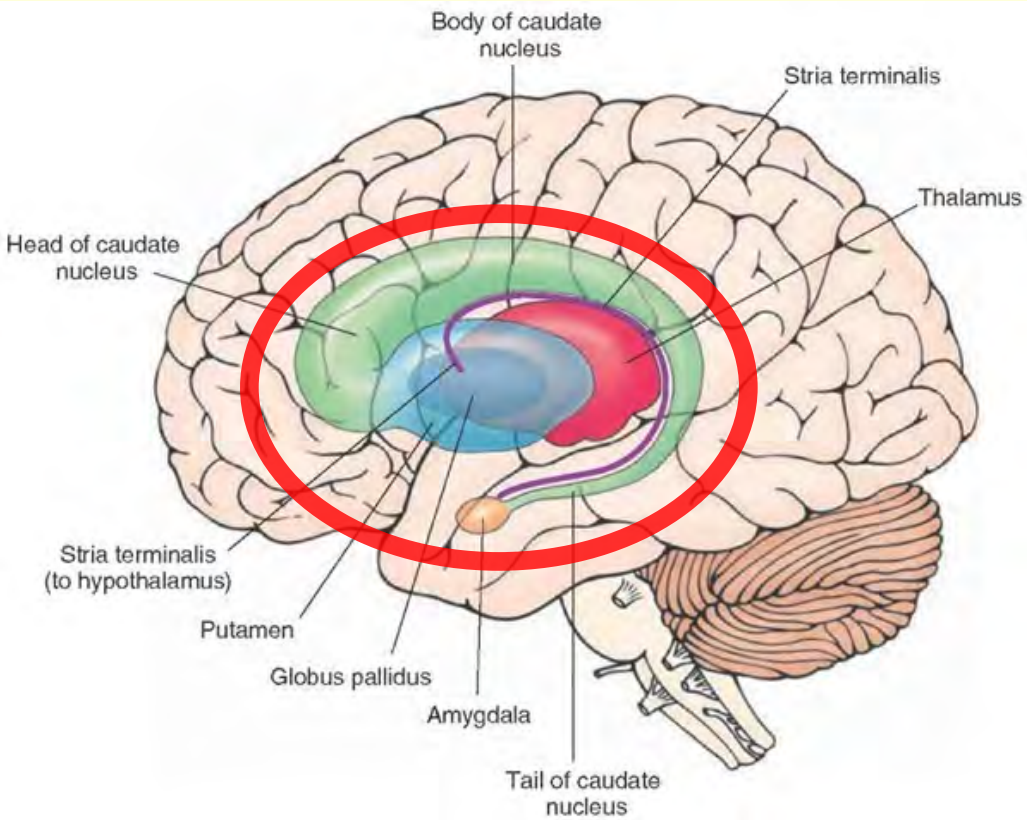
[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/capsules/outil\\_bleu03.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/capsules/outil_bleu03.html)

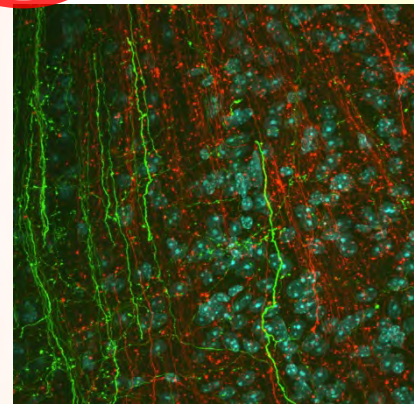
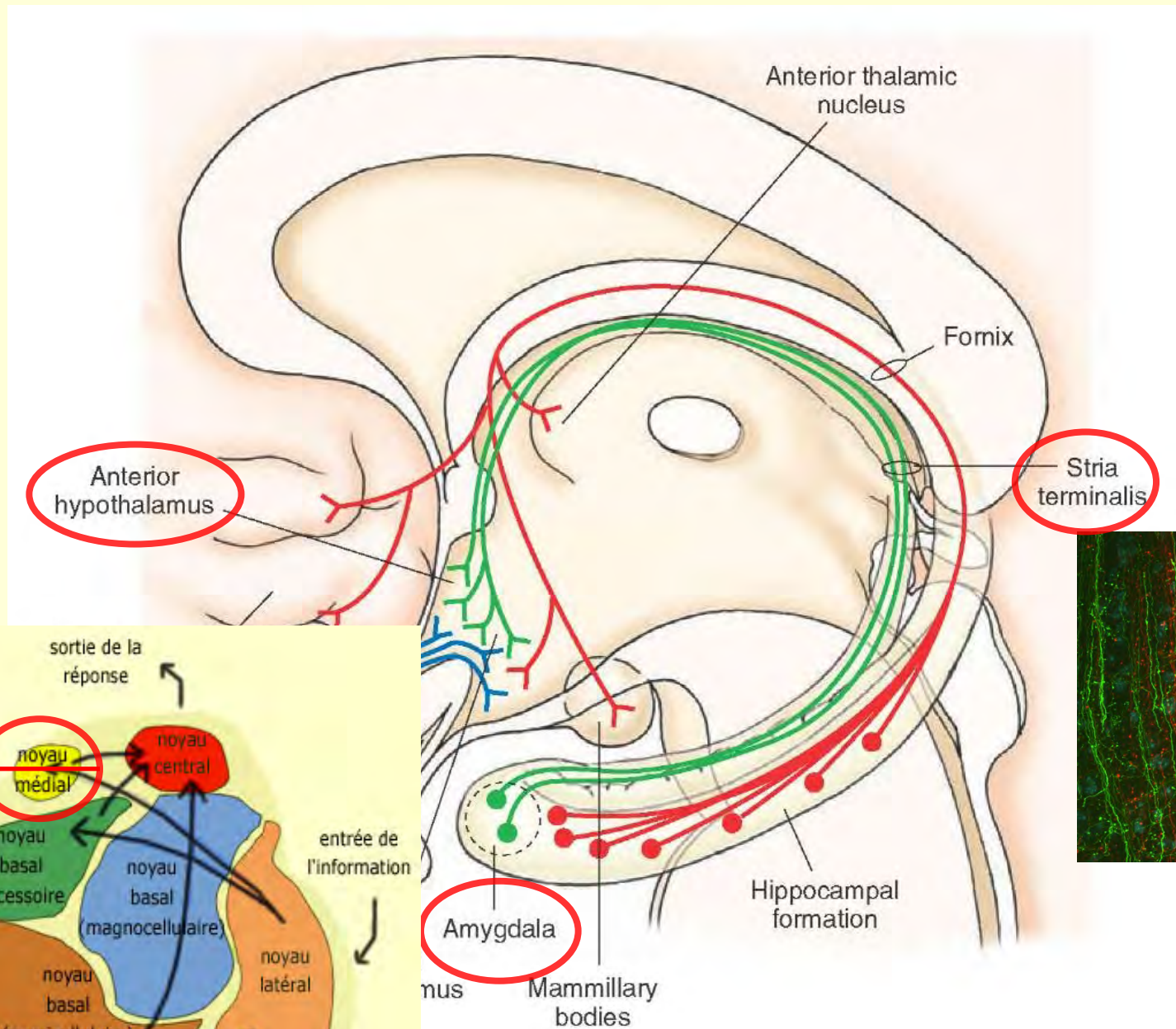


Niveau des  
axones  
individuels.

Projections du  
**noyau médian  
antérieur de  
l'amygdale**  
(vert) et du  
**noyau médian  
postérieur de  
l'amygdale**  
(rouge)  
traversant la  
**stria terminalis  
postérolatérale**  
en direction de  
leur cible :  
**l'hypothalamus**  
et le **striatum  
ventral**.







Antérieur (vert)

Postérieur (rouge)

AMYGDALE

# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

**Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)**

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

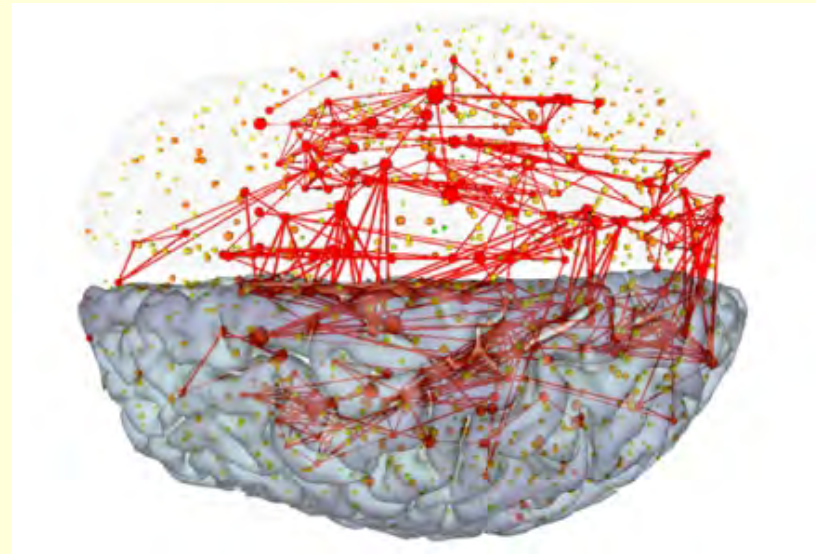
Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

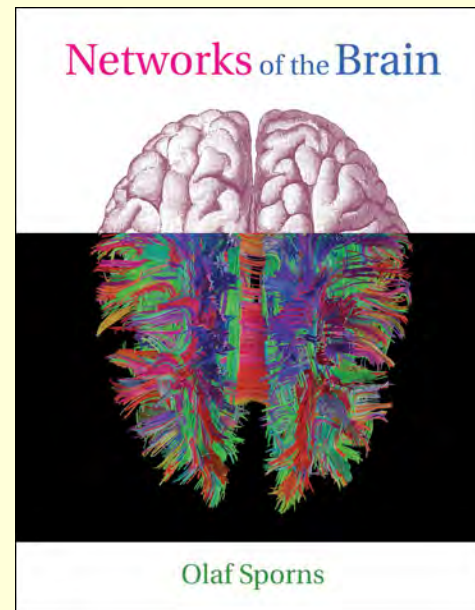
# Le « **connectome** » humain

(par analogie au génome).

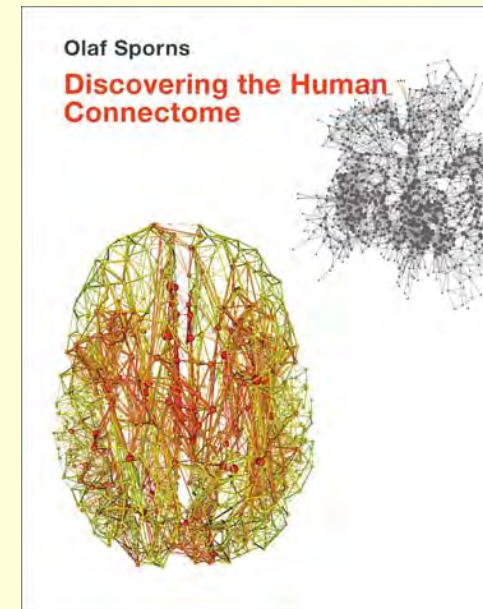


*“The **connectome** is the complete description of the structural connectivity (the physical wiring) of an organism’s nervous system.”*

(Sporns et al., 2005, Hagmann, 2005),



2010



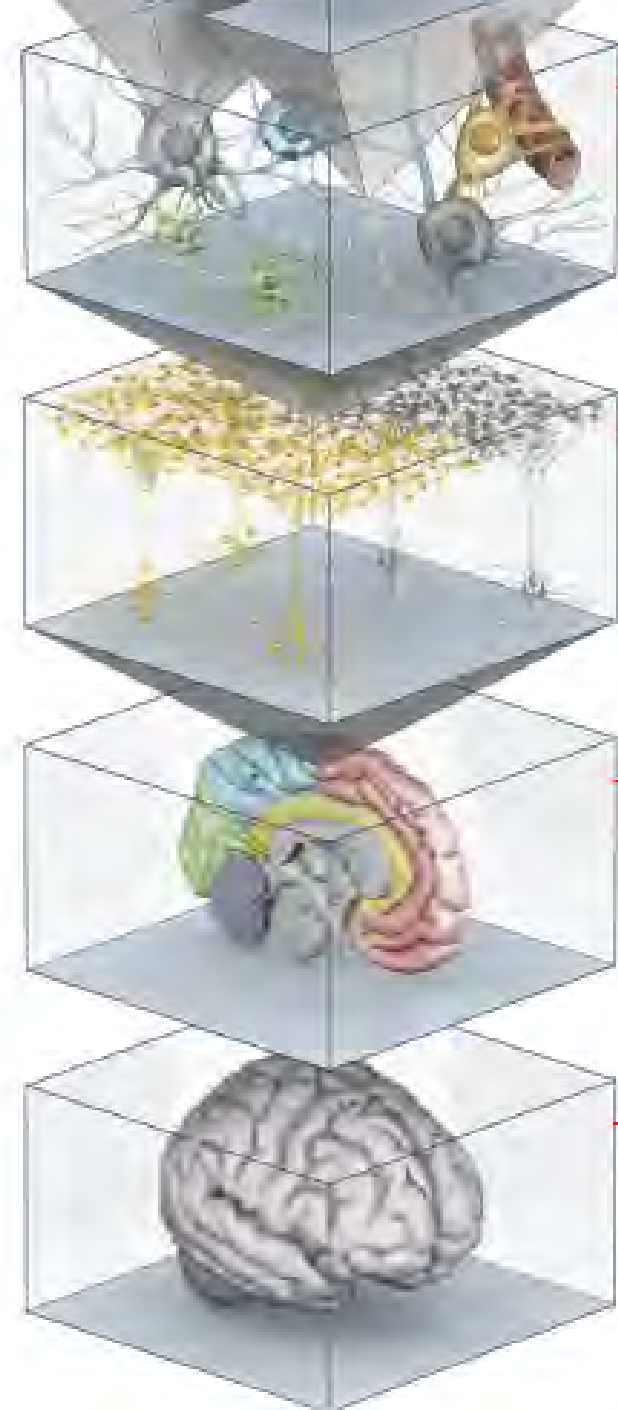
2012

Selon les aspects privilégiés, les projets qui font de la cartographie des voies nerveuses du cerveau humain doivent se concentrer à différentes échelles.

l'échelle « micro »

**l'échelle « meso »**

l'échelle « macro »



À l'échelle « meso » :

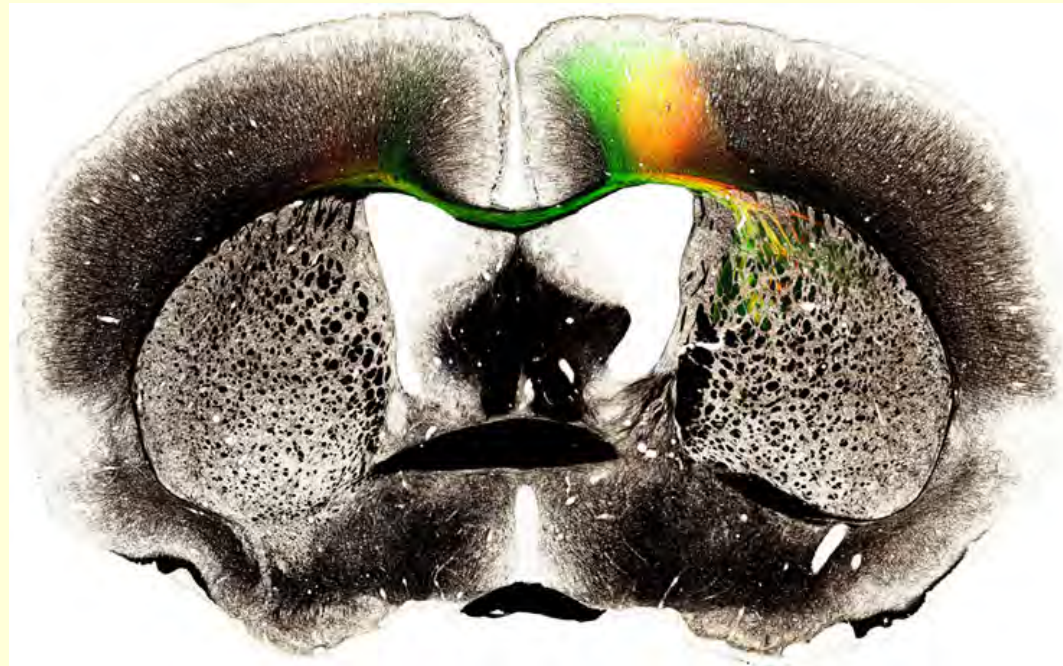
# Mouse Brain Architecture Project

<http://brainarchitecture.org/mouse/about>

Projet de cartographie de l'ensemble des connexions cérébrales de la souris à l'échelle « **mésoscopique** », plus fine que celle que l'on peut obtenir avec l'imagerie cérébrale, mais allant moins dans le détail que la microscopie électronique, capable de montrer le détail des synapses.  
(mais applicable sur des cerveaux entiers que pour de très petits cerveaux)

Ce genre de projet est rendu possible par les bas coûts et les grandes capacités de **stockage** des ordinateurs d'aujourd'hui.

Ils étaient simplement impensable il y a une dizaine d'années à peine.

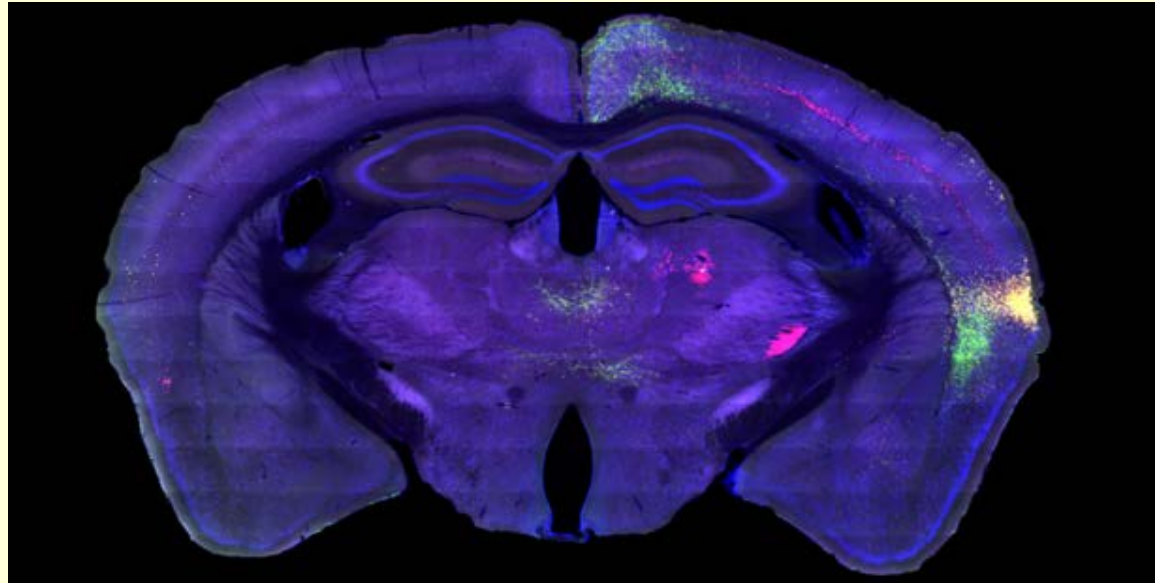


# Neural Networks of the Mouse Neocortex

Zingg B., Hintiryan H., Gou L., Song M., Bay M., Bienkowski M., Foster N., Yamashita S., Bowman I. & Toga A. & Dong H.W. (2014).  
*Cell*, 156 (5) 1096-1111.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092867414002220>

## Mouse Connectome Project (MCP)



*“The MCP also used an advanced method to map the brain circuits better: **double coinjection tract tracing**.”*

*The researchers injected one **anterograde** tracer, which travels down the axons of the cell, and one **retrograde** tracer, which travels up toward the cell body, simultaneously to examine the input and output pathways of the cortex.”*

### Mapping the Information Highway in the Brain

<http://knowingneurons.com/2014/03/26/mapping-the-information-highway-in-the-brain/http://knowingneurons.com/2014/03/26/mapping-the-information-highway-in-the-brain/>

À l'échelle « macro » :

## BigBrain

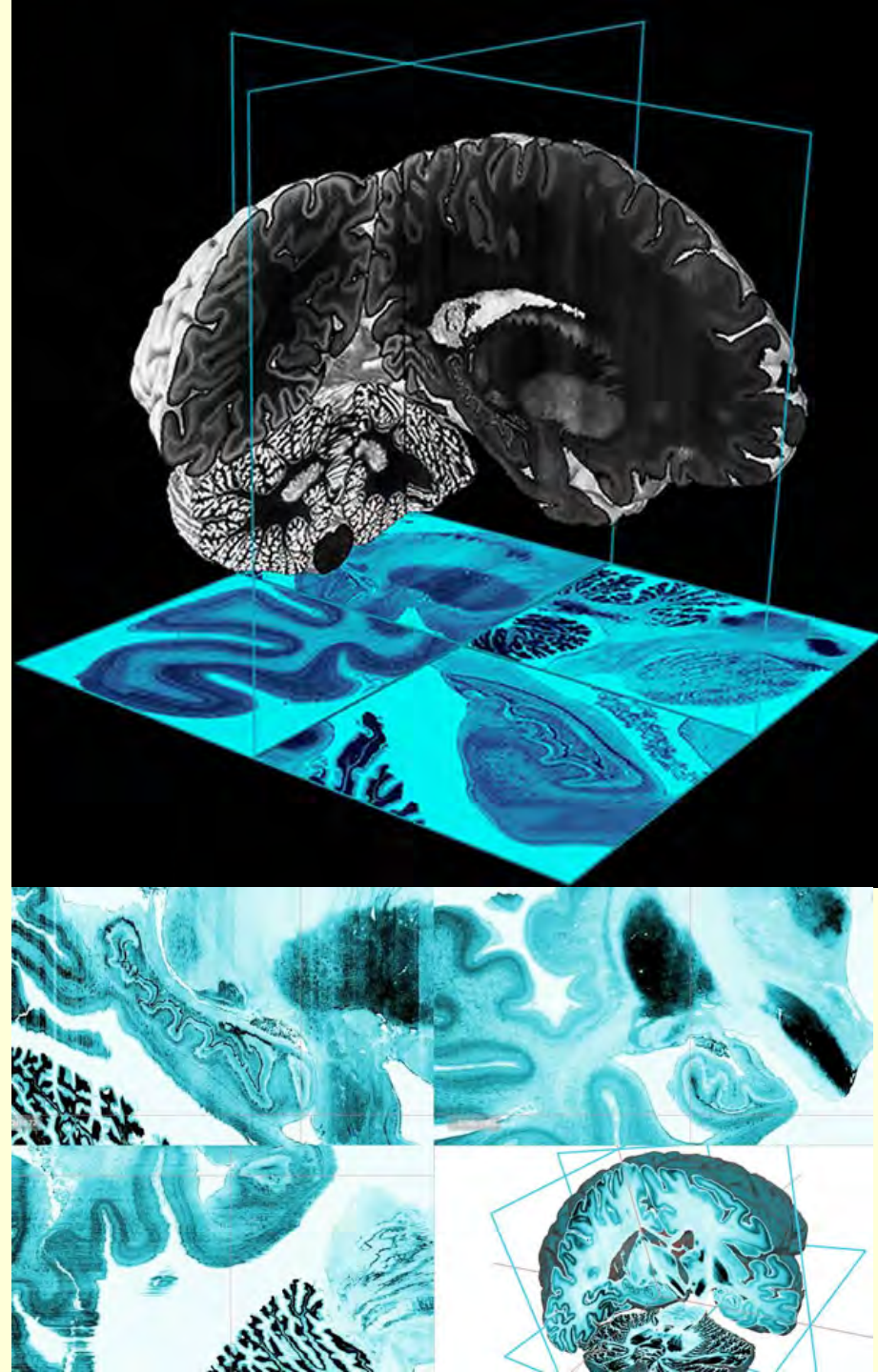
<https://bigbrain.loris.ca/>

Un groupe international de chercheurs en neurosciences ont tranché, imagée et analysé le cerveau d'une femme de 65 ans, pour créer **la carte la plus détaillée de l'intégralité d'un cerveau humain.**

Cet atlas 3D a été rendu public en **juin 2013** et est le fruit du travail de scientifiques du Montreal Neurological Institute et du German Forschungszentrum Jülich et fait partie du Human Brain Project.

3D Map Reveals Human Brain in Greatest Detail Ever

<http://www.livescience.com/37605-human-brain-mapped-in-3d.html>





L'atlas a été réalisé grâce à la compilation de 7400 des tranches de ce cerveau conservé dans de la paraffine, chacune plus fine qu'un cheveu humain (20-microns).

Il a fallu 1000 heures pour les imager à l'aide d'un scanner à plat, générant ainsi 1 milliard de milliards d'octets de données pour **reconstruire le modèle 3D du cerveau sur un ordinateur.**



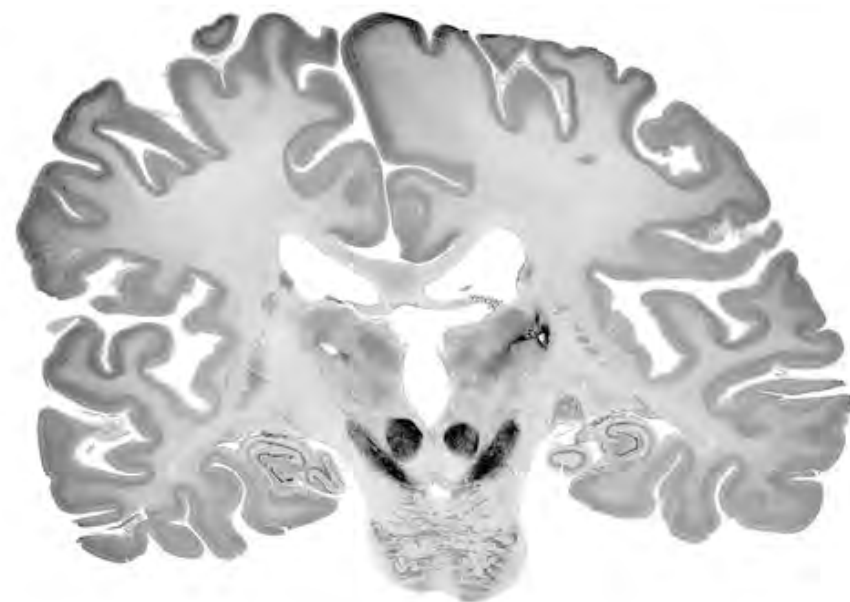
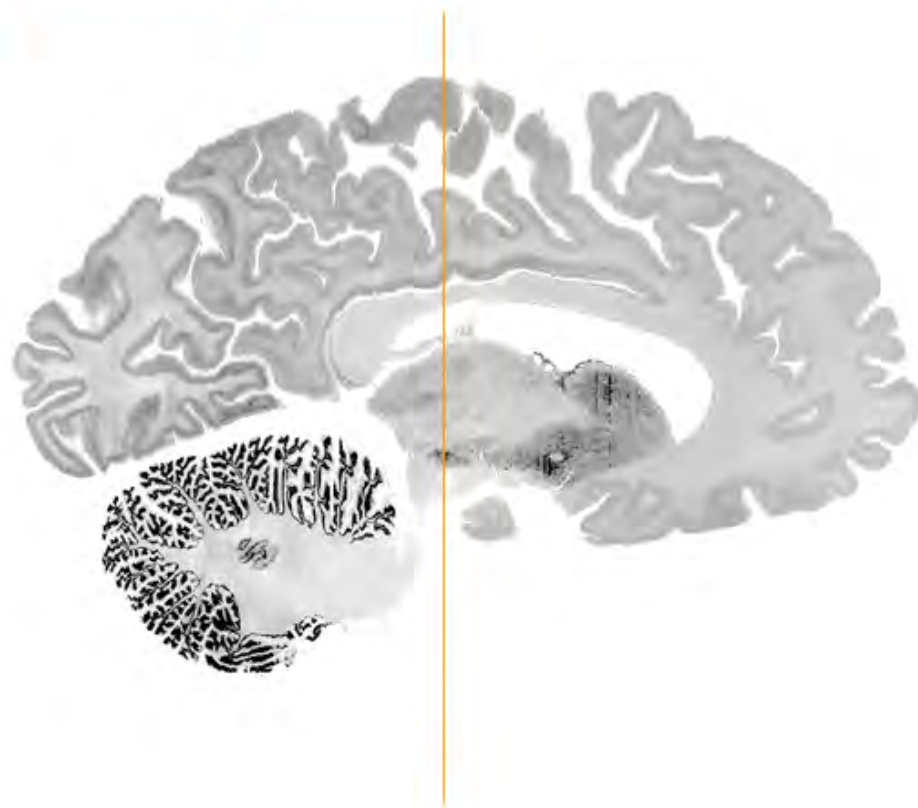
Des **cerveaux de référence** ont déjà été cartographiés avec l'IRMf, mais ils n'ont une résolution que de 1 mm cube alors que les tranches de 20  $\mu\text{m}$  de BigBrain permettent une **résolution 50 fois meilleure.**

## To download BigBrain

The full resolution histological MINC or PNG file of a selected section can be obtained by clicking on the download links to the right of the viewer.

[Previous Section](#)

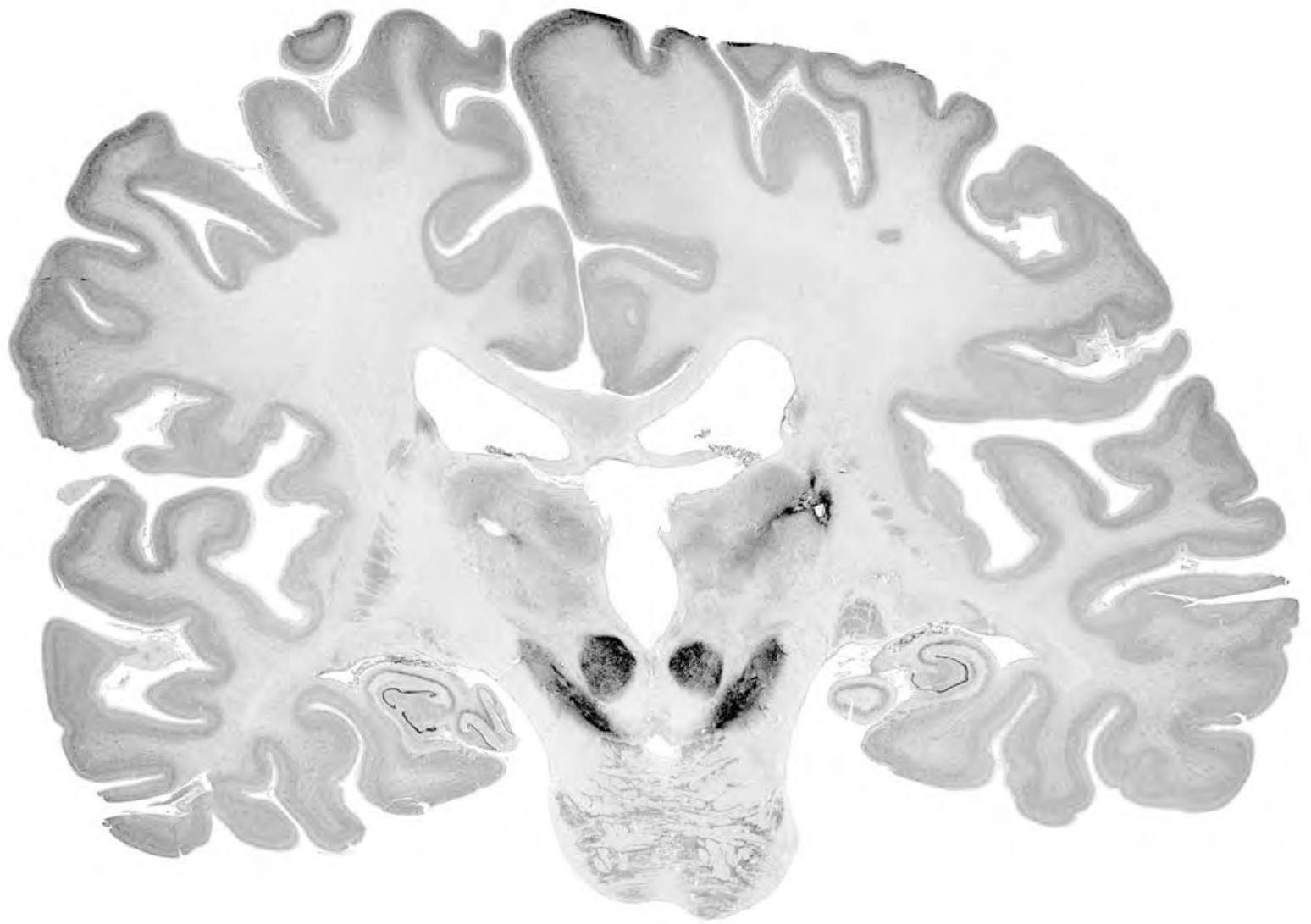
[Next Section](#)

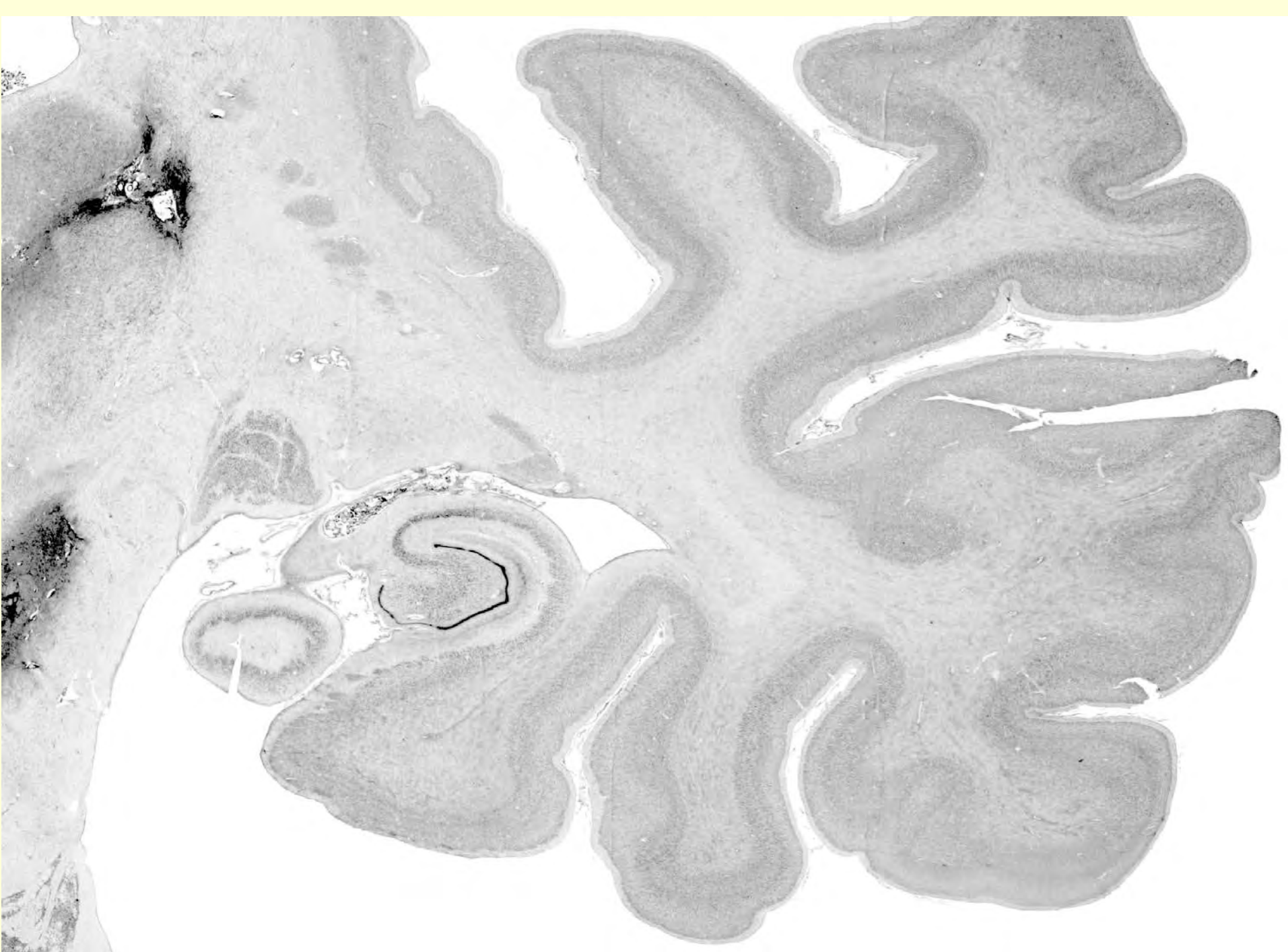


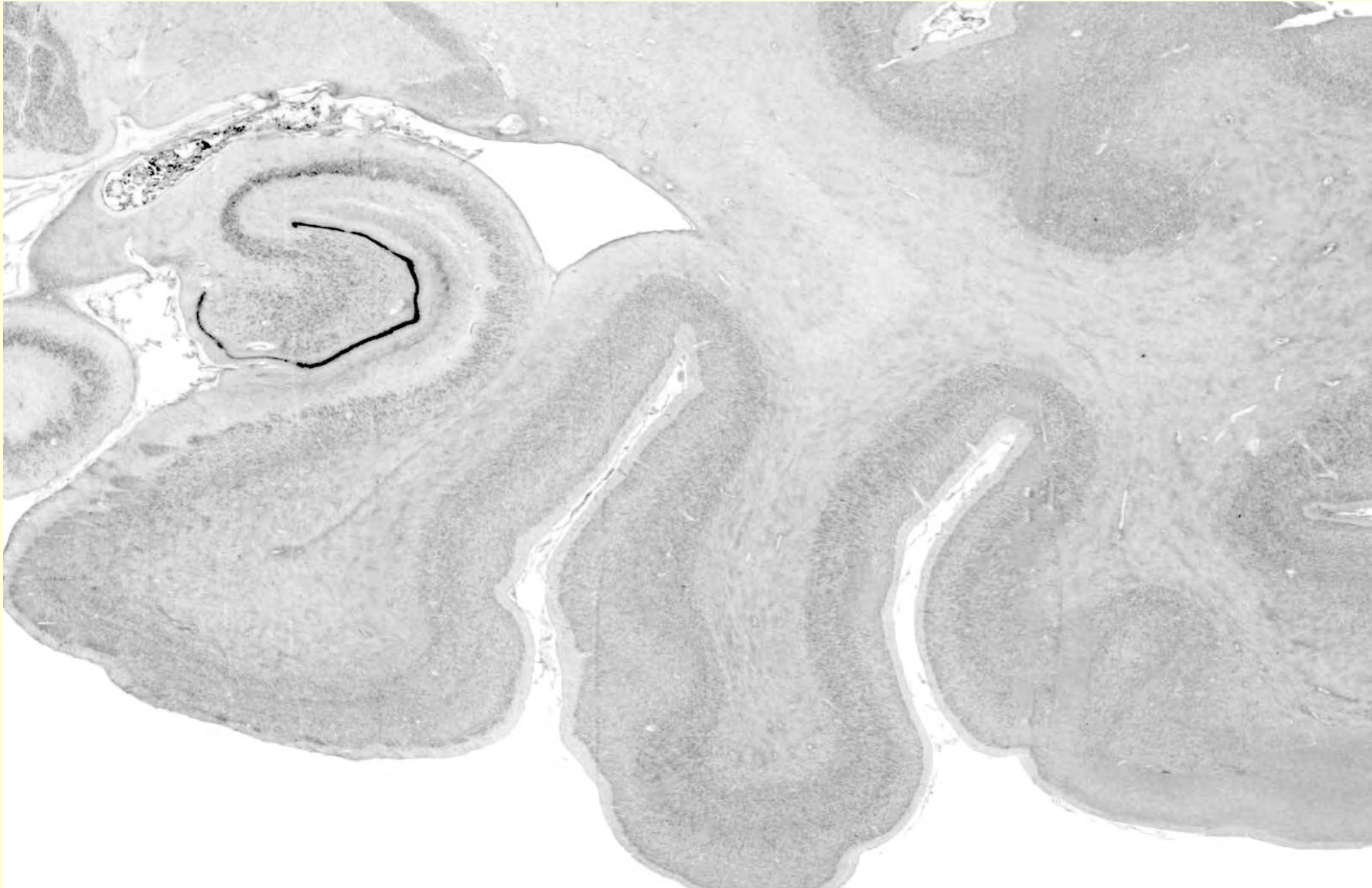
| [Loris Website](#) | [BigBrain FTP](#) |

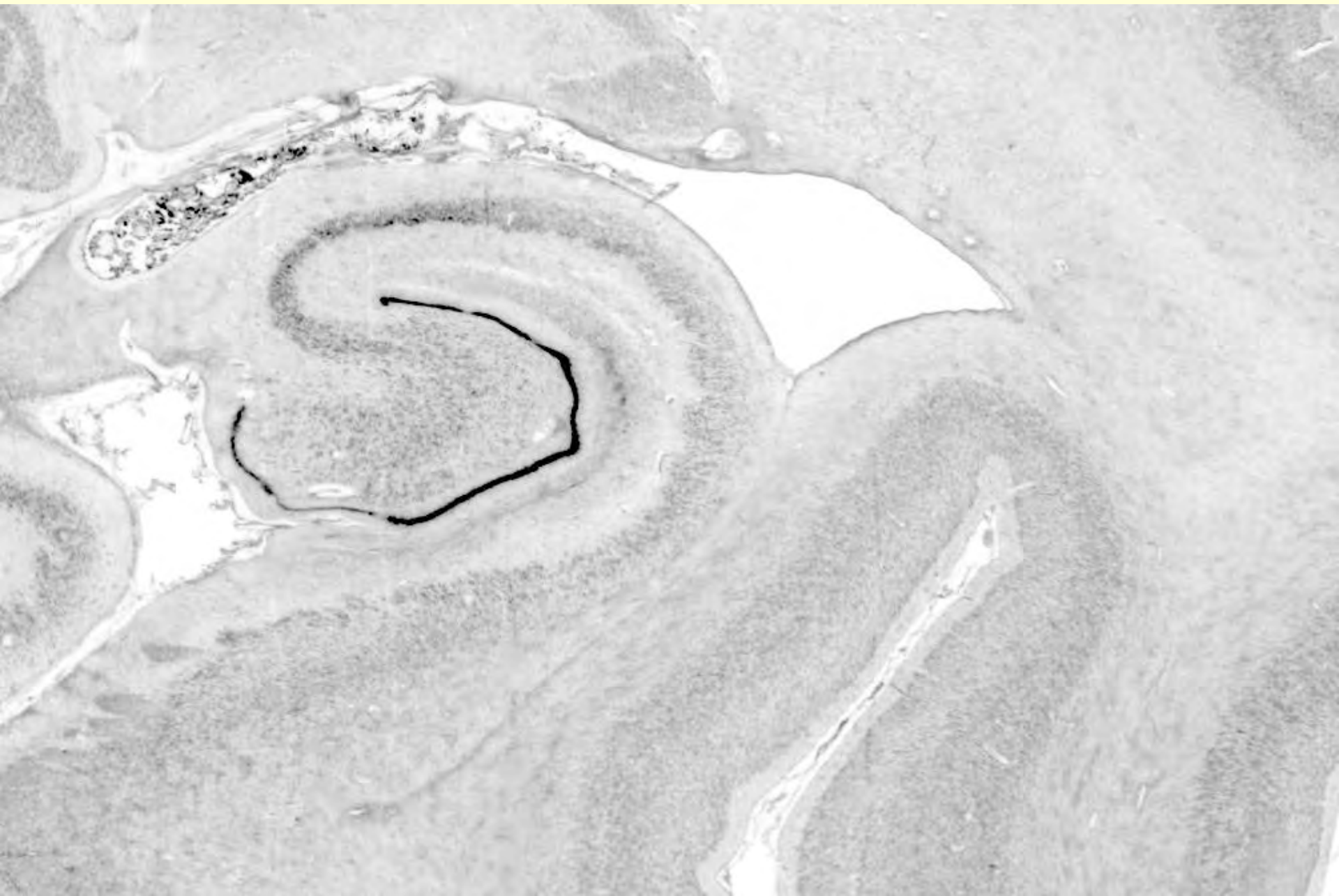
Powered by LORIS © 2017. All rights reserved.

Created by [MCIN](#)

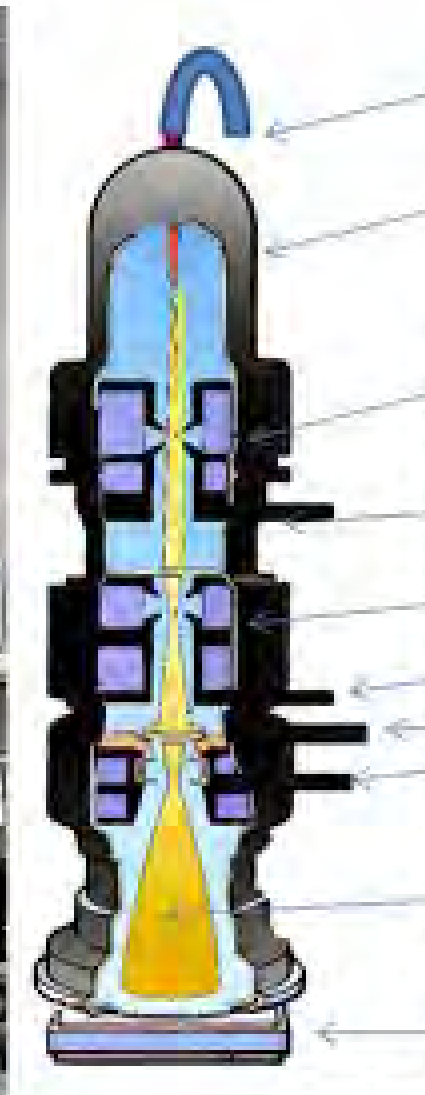








Pour grossir encore plus, il faut utiliser...



**TEM**



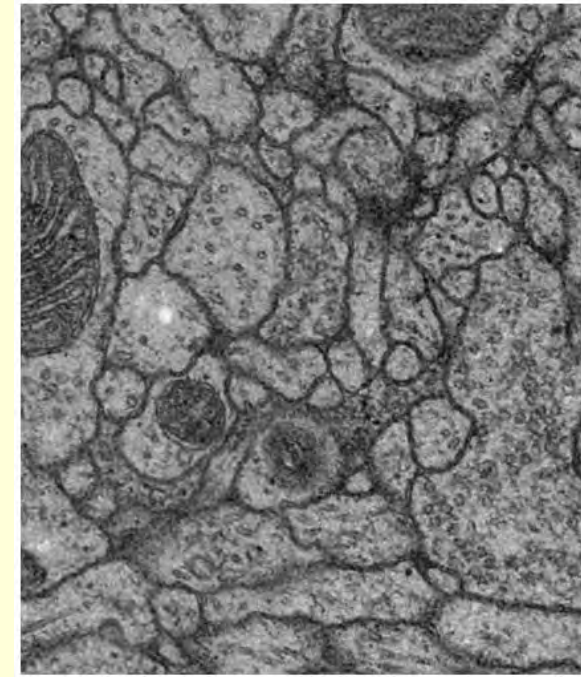
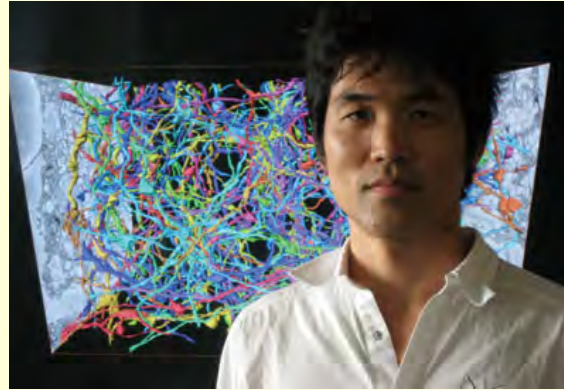
...le microscopie électronique (« Transmission Electron Microscopy » (TEM))

À l'échelle « micro » :

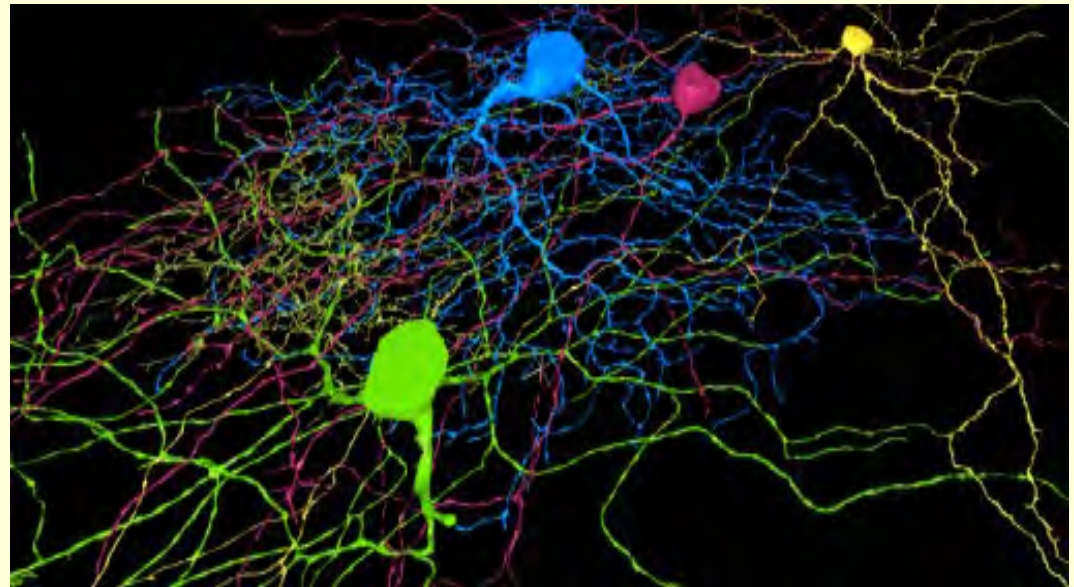
**Le BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

## Aidez à cartographier nos connexions neuronales

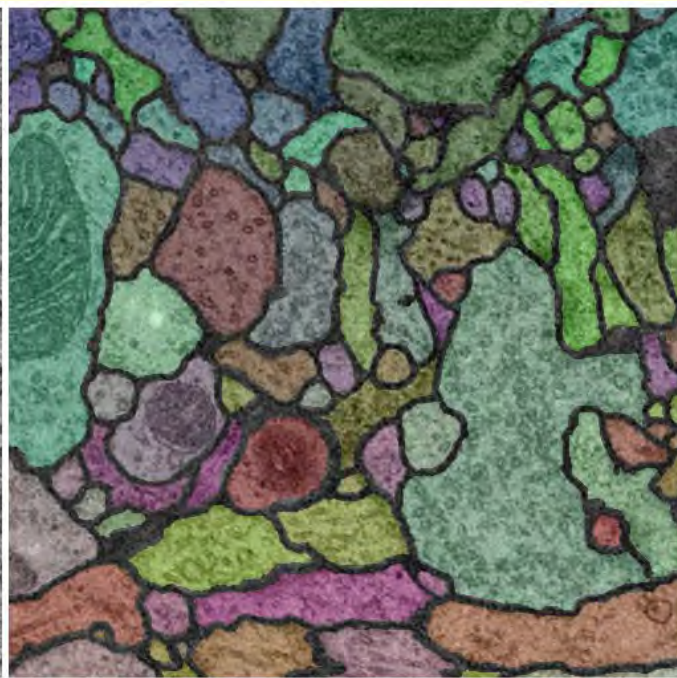
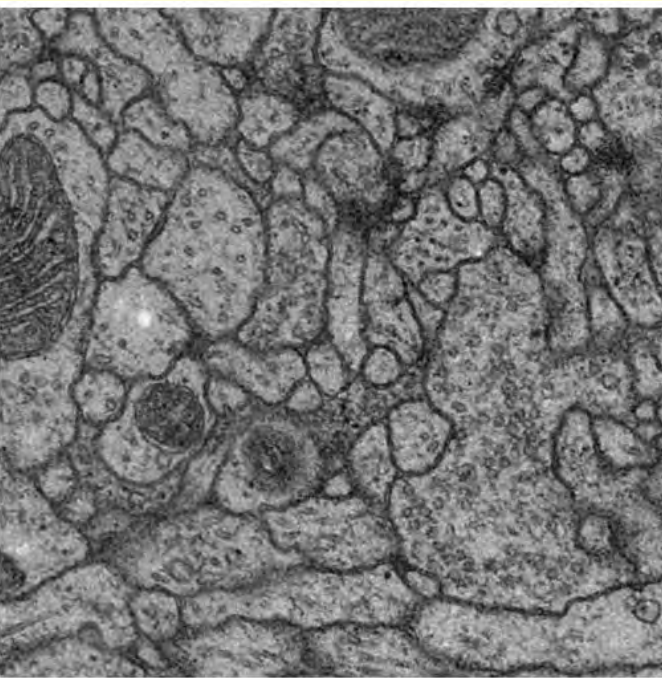
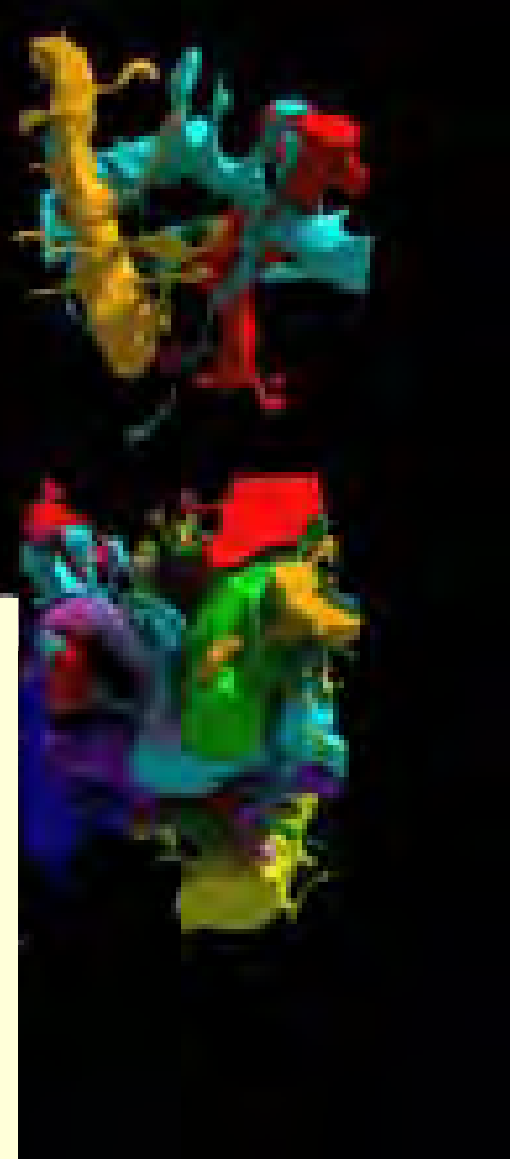
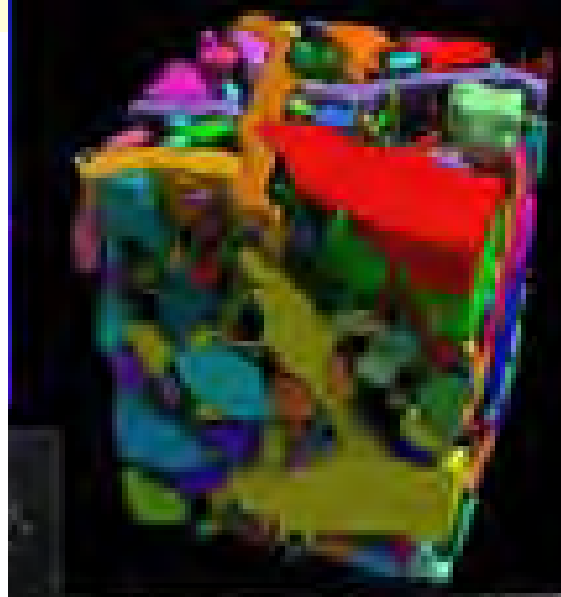
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2013/06/10/aidez-a-cartographier-nos-connexions-neurones/>



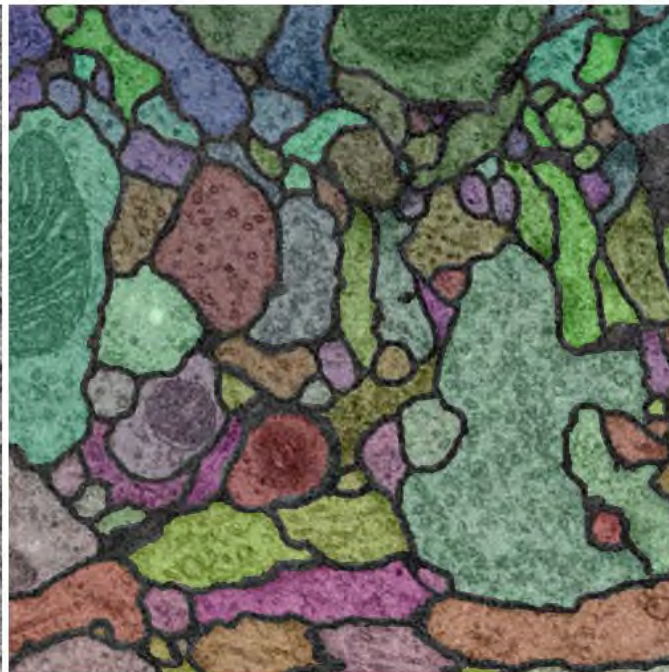
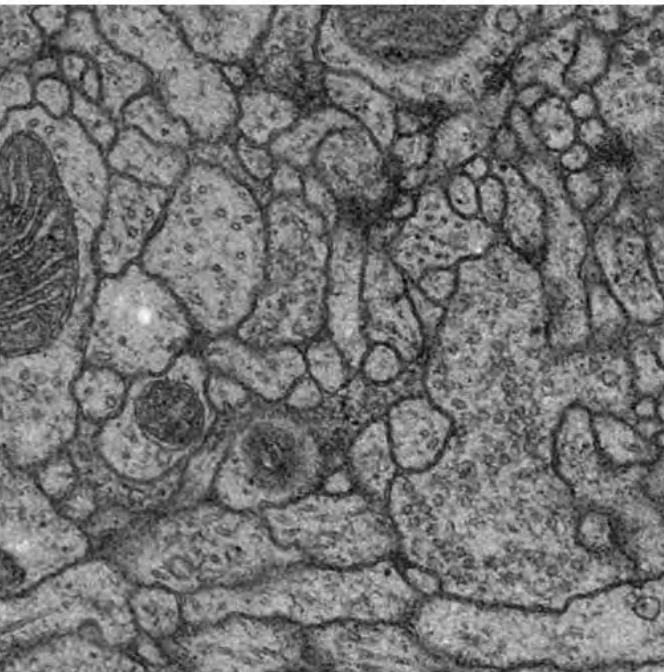
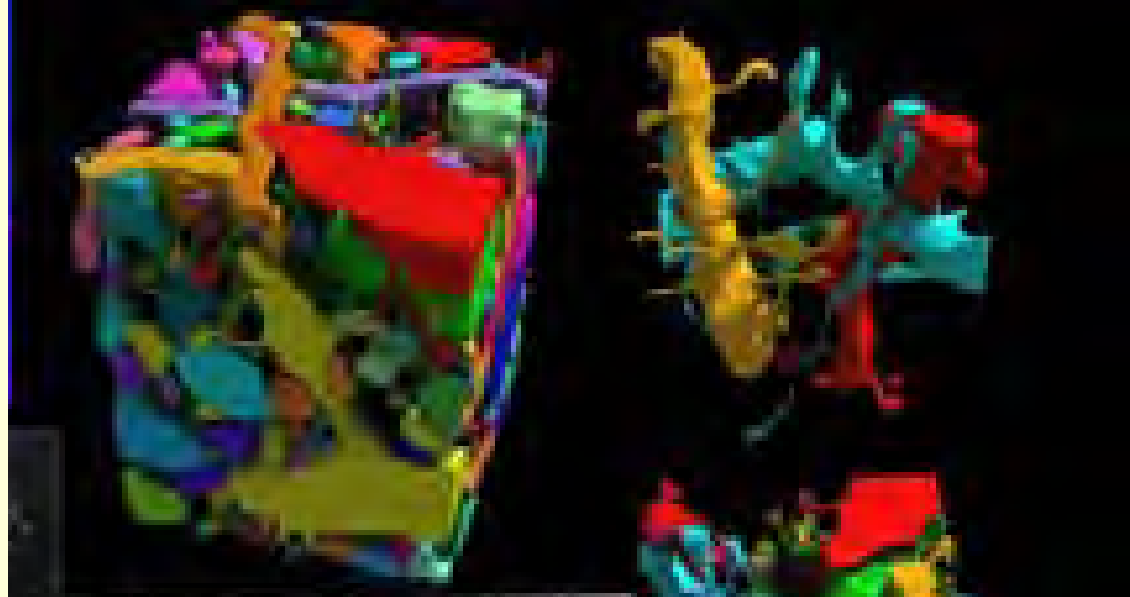
« **EyeWire** », mené par **Sebastian Seung**, que l'on pourrait traduire par « le câblage de l'œil », se concentre uniquement sur un sous-groupe de **cellules ganglionnaires de la rétine** appelées « cellules J » et fait appel au public.







C'est de ce point de vue **microscopique** (c'est-à-dire où précisément, et comment, les axones et les épines dendriques se connectent) que Seung va critiquer par exemple le Blue Brain Project de Markram.



Sebastian Seung, Brain Science Podcast, Episode 85

<http://brainsciencepodcast.com/bsp/sebastian-seung-explores-brains-wiring-bsp-85.html>

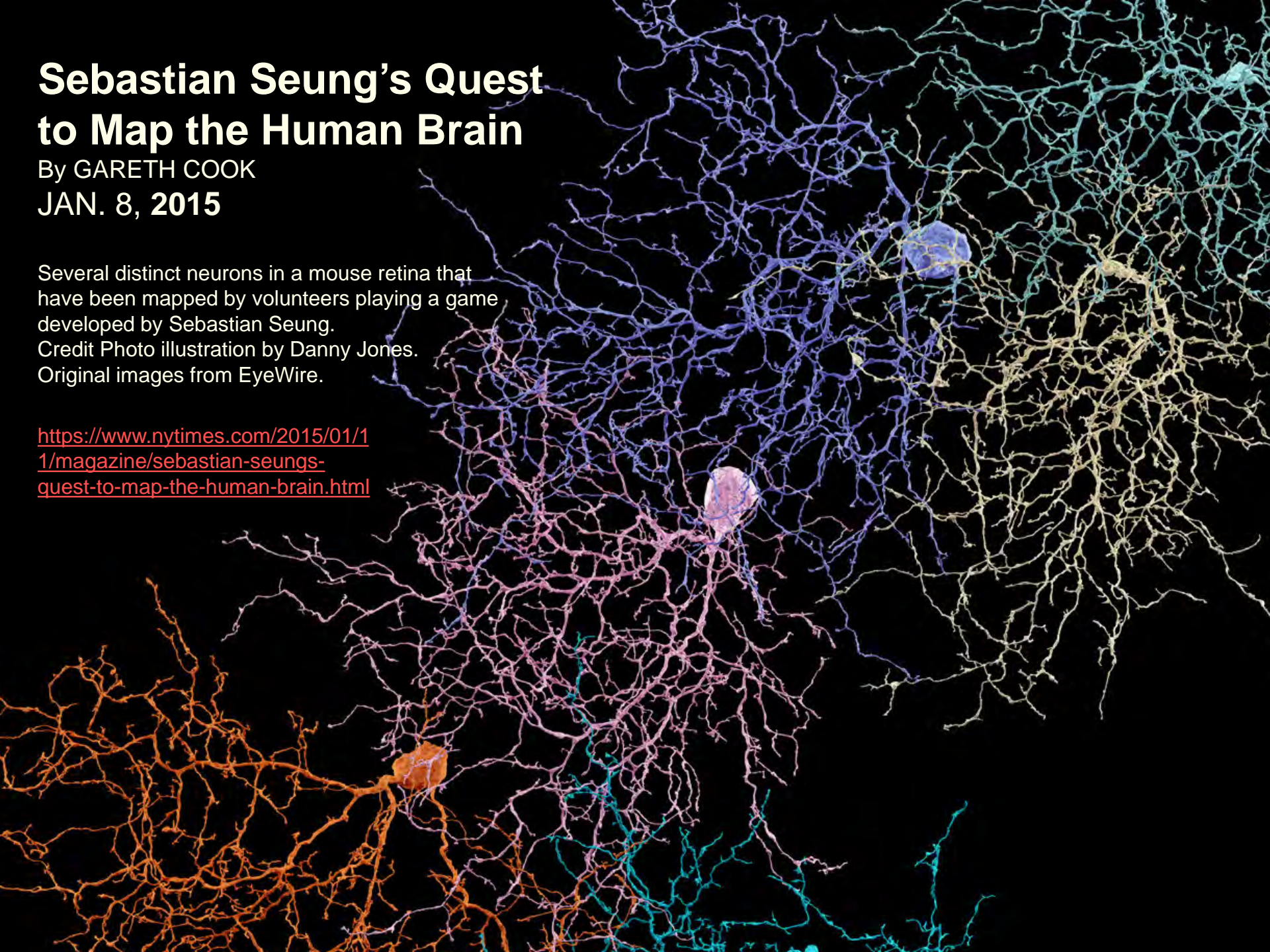
# Sebastian Seung's Quest to Map the Human Brain

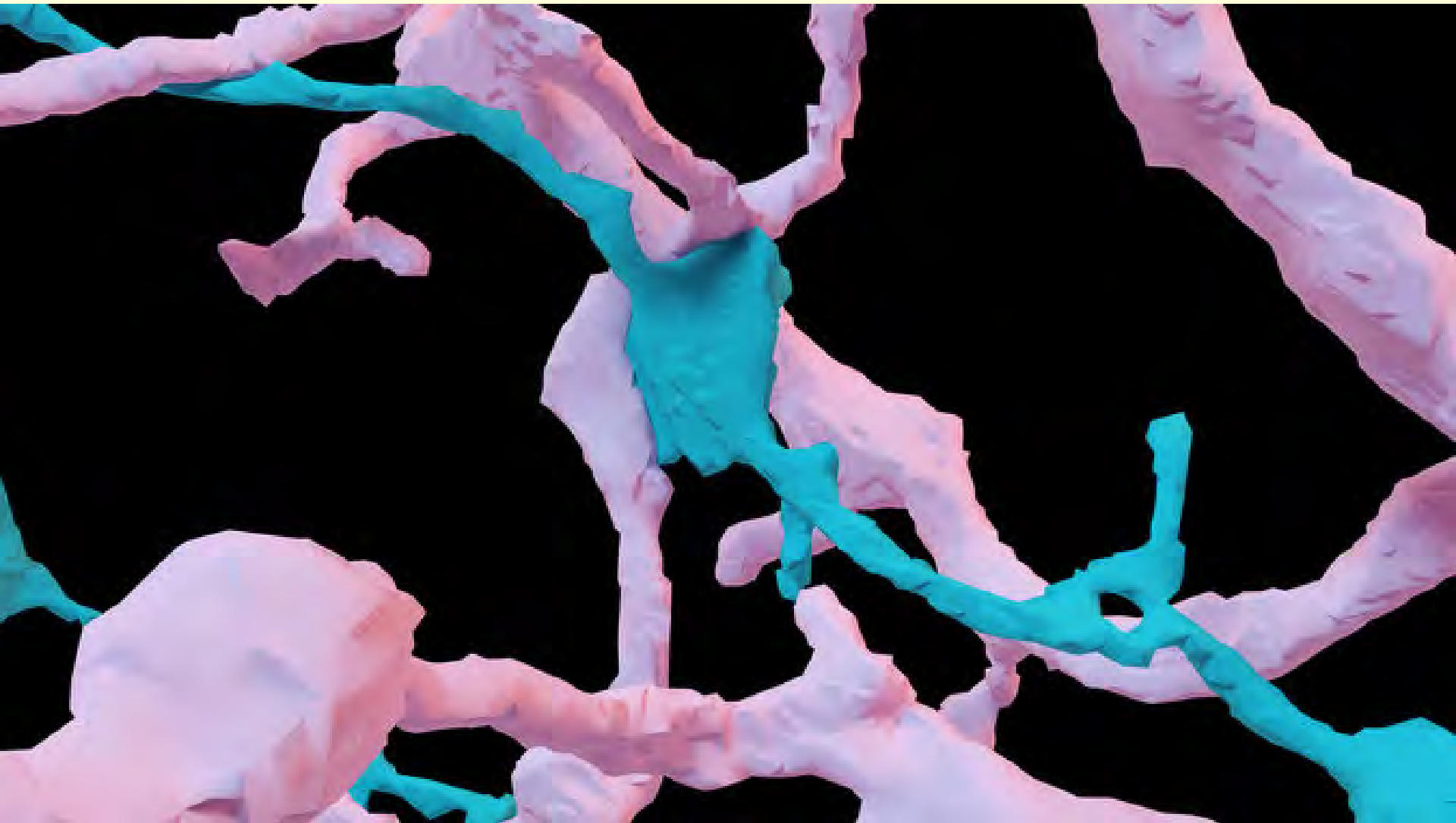
By GARETH COOK

JAN. 8, 2015

Several distinct neurons in a mouse retina that have been mapped by volunteers playing a game developed by Sebastian Seung.  
Credit Photo illustration by Danny Jones.  
Original images from EyeWire.

<https://www.nytimes.com/2015/01/11/magazine/sebastian-seungs-quest-to-map-the-human-brain.html>





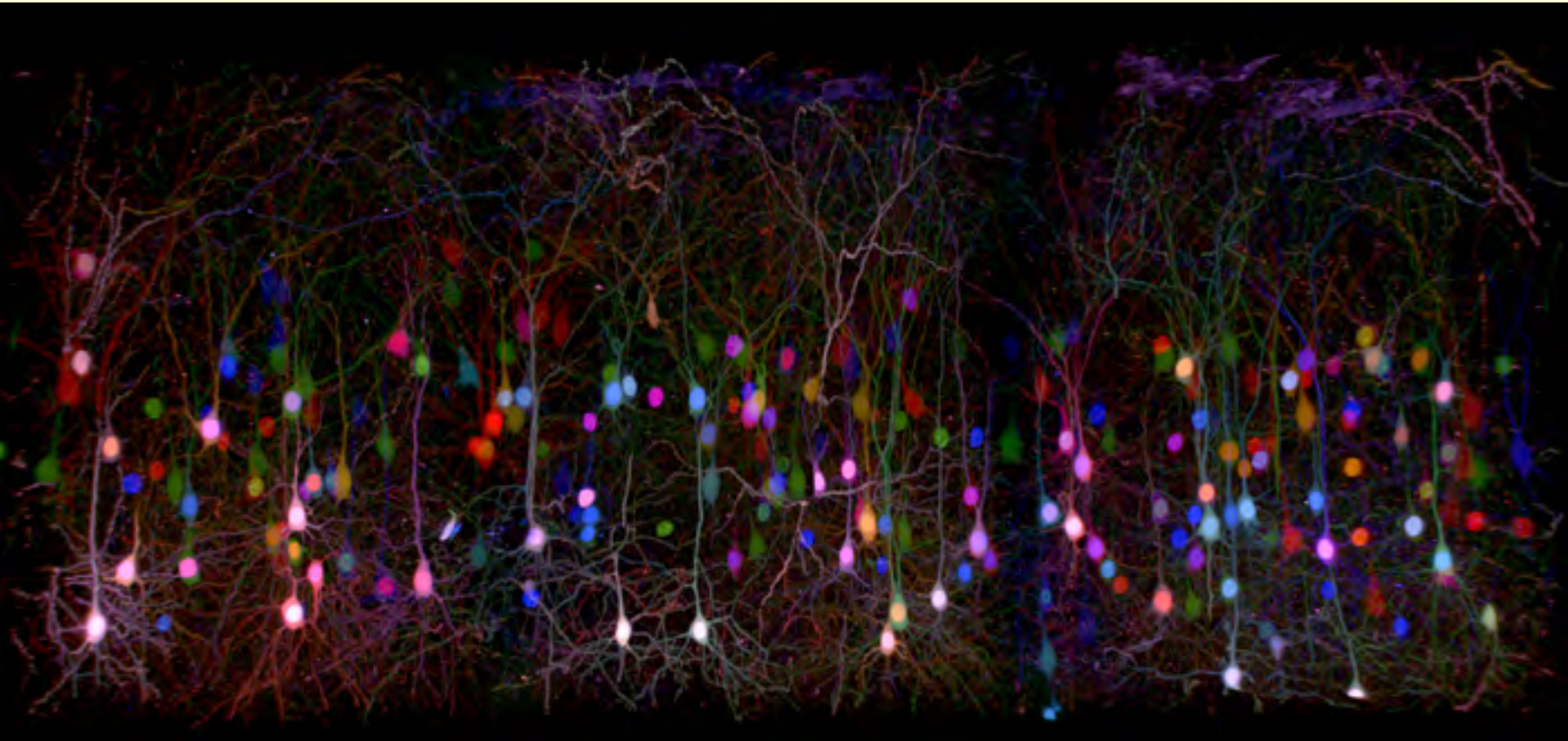
Two neurons, mapped by EyeWire players, making contact at a synapse. Credit Photo illustration by Danny Jones. Original images from EyeWire.

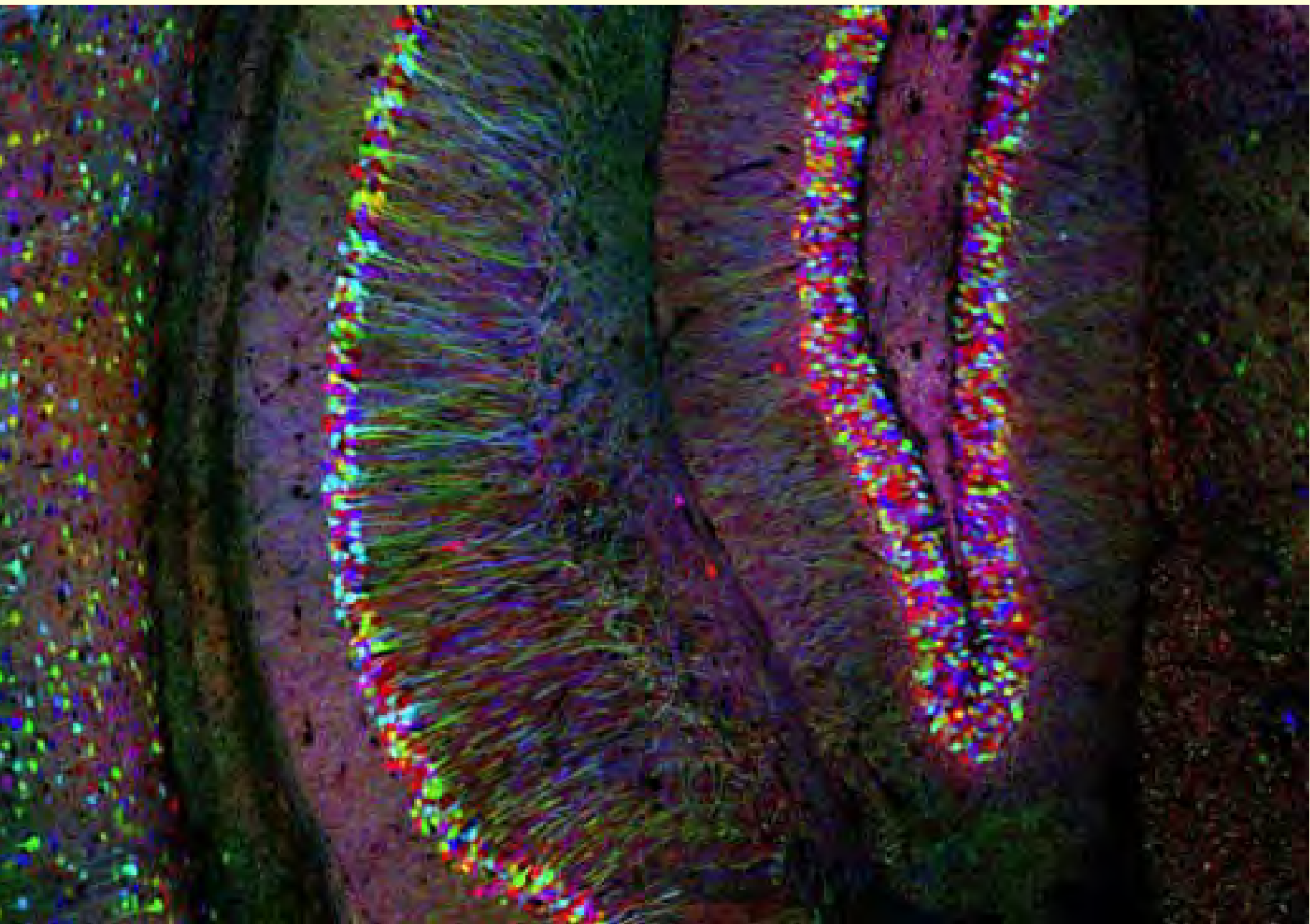
<https://www.nytimes.com/2015/01/11/magazine/sebastian-seungs-quest-to-map-the-human-brain.html>

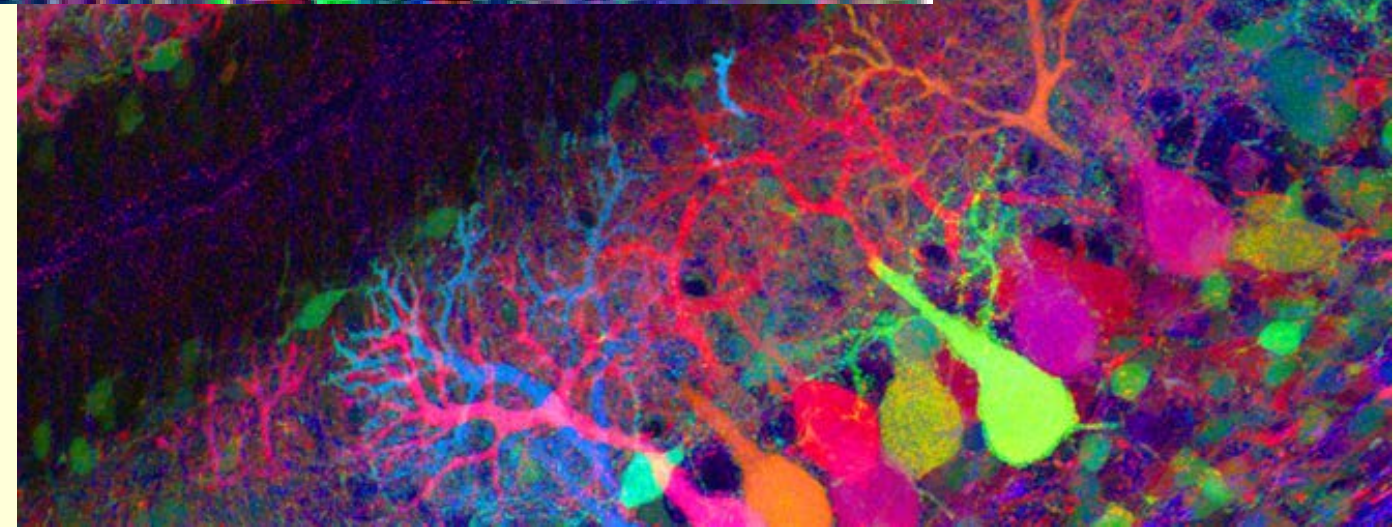
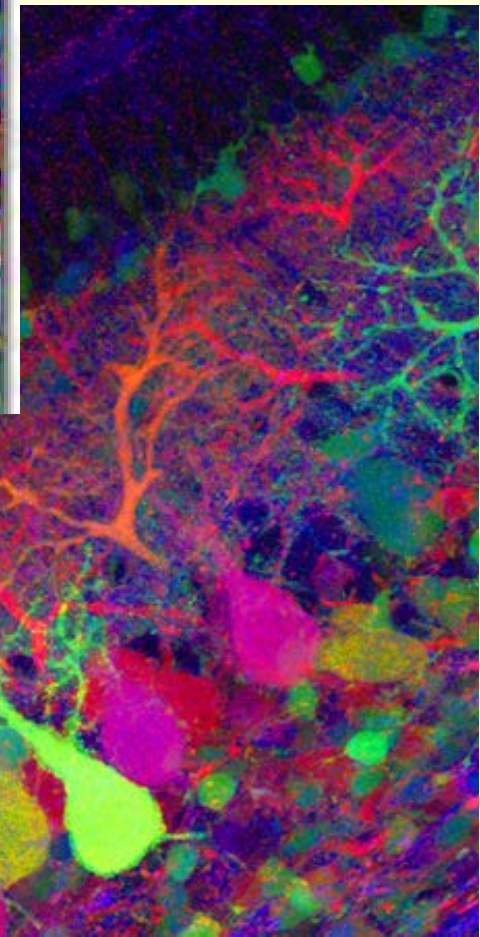
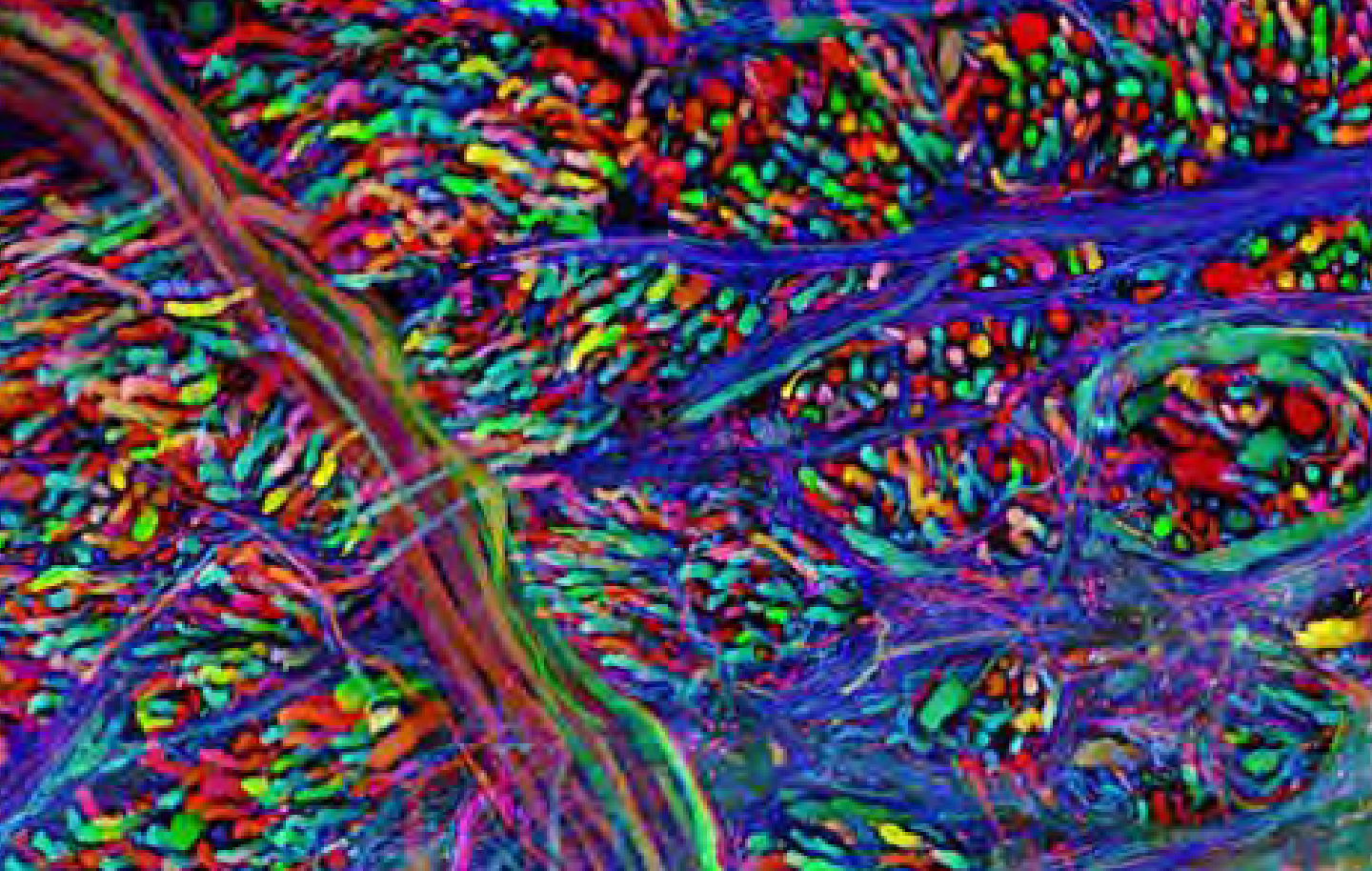
C'est aussi la démarche de :  
**Jeff Lichtman**, *Professor of  
Molecular and Cellular Biology*  
Harvard University

<http://www.hms.harvard.edu/dms/neuroscience/fac/lichtman.php>

Avec sa coloration **Brainbow**,





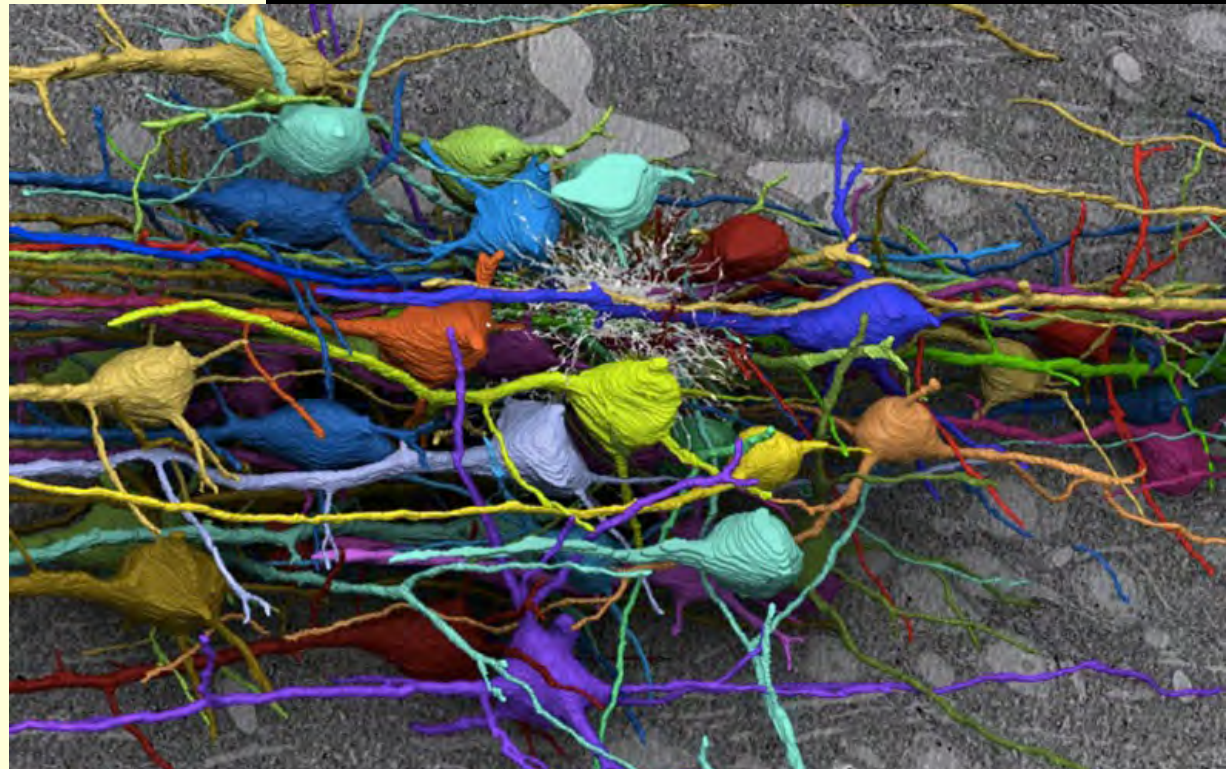


C'est aussi la démarche de :  
**Jeff Lichtman**, *Professor of  
Molecular and Cellular Biology*  
Harvard University

<http://www.hms.harvard.edu/dms/neuroscience/fac/lichtman.php>

Avec sa coloration **Brainbow**,  
mais aussi :

*“In addition we have  
developed automated  
tools to map neural  
connections  
(connectomics) at  
**nanometer resolution**  
using a new method of  
serial electron  
microscopy.”*





Lundi, **15 septembre 2014**

## **Des synapses microscopiques et des microscopes gigantesques**

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/09/15/des-synapses-microscopiques-et-des-microscopes-gigantesques/>

[...] Lichtman rappelle en outre que les scientifiques de sa génération ont vécu à une époque de grandes idées théoriques qui ont pu foisonner parce qu'il y avait peu de données accessibles sur le cerveau. Ce n'est que dans un deuxième temps que l'on cherchait des indices empiriques pour confirmer ces grandes théories.

Lundi, **15 septembre 2014**

## **Des synapses microscopiques et des microscopes gigantesques**

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/09/15/des-synapses-microscopiques-et-des-microscopes-gigantesques/>

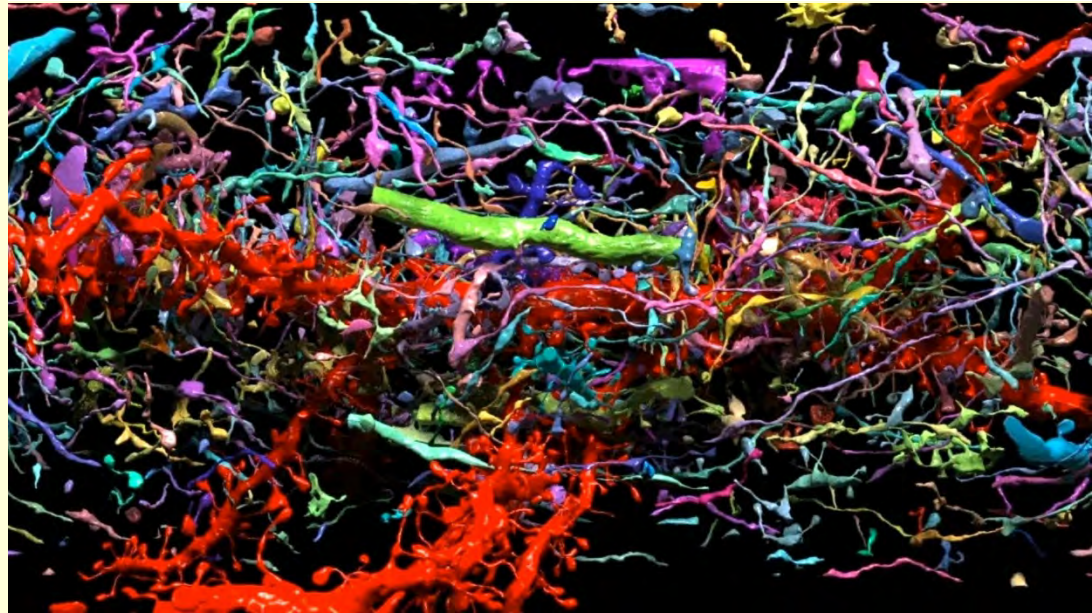
[...] Lichtman rappelle en outre que les scientifiques de sa génération ont vécu à une époque de grandes idées théoriques qui ont pu foisonner parce qu'il y avait peu de données accessibles sur le cerveau. Ce n'est que dans un deuxième temps que l'on cherchait des indices empiriques pour confirmer ces grandes théories.

Mais aujourd'hui, à l'heure des « **big data** » rendues possibles par les ordinateurs et les mastodontes à 61 faisceaux, c'est l'inférence qui redevient selon Lichtman l'approche la plus prometteuse.

Un peu comme Darwin, rappelle-t-il, qui s'est immergé pendant des années dans la diversité des formes vivantes avant de pouvoir imaginer ses idées sur l'évolution par sélection naturelle.

Lichtman de conclure :

ce sont les jeunes qui vont baigner dans cet univers foisonnant de données, qui en seront imprégnés sans idées préconçues, qui pourront peut-être en discerner de grands principes permettant de mieux comprendre cette complexité...



Cell, Volume 162, Issue 3, p648–661, **30 July 2015**

## **Saturated Reconstruction of a Volume of Neocortex**

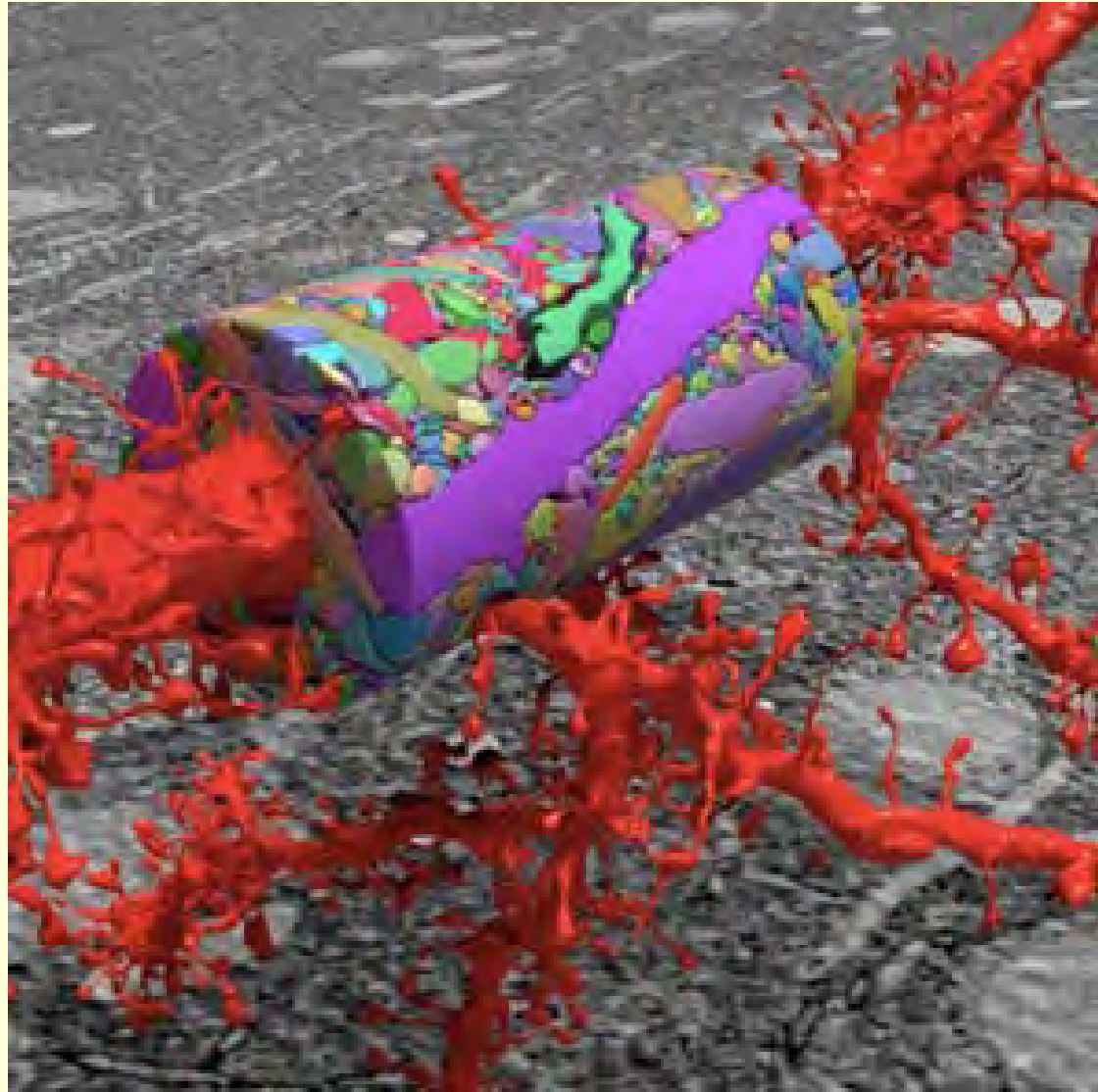
<http://www.cell.com/cell/abstract/S0092-8674%2815%2900824-7>

**Video : An incredibly detailed tour through the mouse brain :**

<http://news.sciencemag.org/brain-behavior/2015/07/detailed-video-mouse-brain-will-make-you-think-twice-about-studying>

“Without seeing the brain’s wiring on a synaptic level, some neuroscientists believe we’ll never truly understand how it works.

Others worry that a flood of data will drown the field...”



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

## **Imagerie cérébrale – Intro;**

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

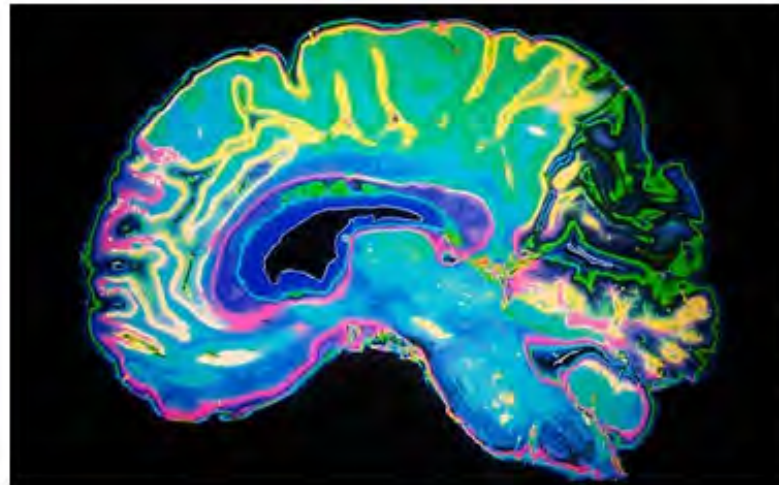
L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

## New brain scan reveals nothing at all



Scientists are he  
brain scan techn  
Oxford Universit  
images of a hum  
nothing of any s

'This is an amaz  
leading neurosci  
Greenfield, 'the  
about how the b  
with no insights  
consciousness, a  
colours.'

The images, produced using Functional Magnetic Resonance Imaging, reveal a  
including red, green, yellow and blue. 'The brain isn't really this exciting,' exp  
Greenfield, 'it's actually quite a dull grey - we just added the colours to help j

Scientists created the images by scanning the brains of subjects while they w  
weather forecast. 'We know that the human brain automatically switches off d  
explained Baroness Greenfield, 'usually at precisely the moment the forecaster  
region. These scans capture that moment of mental 'nothingness' in full and g

The development, which has been widely reported around the world, is also si  
allows journalists to publish big fancy pictures of the brain that look really imp  
or no explanatory value.

"This is an amazing discovery,  
the pictures tell us nothing  
about how the brain works,  
provide us with  
no insights into the nature of  
human consciousness, and all  
with such **lovely colours.**' [...]

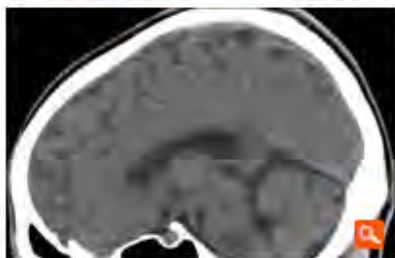
None of this helps to explain  
anything, but it does it **so**  
**much better the old black**  
**and white pictures.** [...].



## Brain scans indicate ... this blog is informative

Wednesday, March 05, 2008 - 12:09 PM

By [Soren Wheeler](#) : Senior Producer



CT scan for a healthy brain (Flickr user B1SHOP (cc: by-nc-sa))

[JOIN THE DISCUSSION \[5\]](#)

Brain scans give us a whole new way of explaining how and why we do the things we do. But while brain scans can help scientists understand how the person inside the scanner thinks, they also make those of us outside the scanner a little bit less savvy.

Deena Weisberg, a postdoc at Yale, recently published a study in *The Journal of Cognitive Neuroscience* showing that people swallow poor explanations more readily when the claim is preceded by “Brains scans indicate ...” and sprinkled with neuroscience words like “frontal lobe circuitry.” When we read those words—us non-experts, at least—our normal critical thinking instincts get pushed aside. And the neuroscience

information doesn’t even need to be relevant to have this effect. According to the study,

“Adding irrelevant neuroscience information thus somehow impairs people’s baseline ability to make judgments about explanations.”

So be on the lookout. The news these days is flooded with studies that scan people’s brain while they spend money, or tell lies, or think about loved ones. And it’s hard not to feel like we can actually “see” people thinking. But it’s important to keep in mind that these studies often have small sample sizes and are easily misinterpreted.

So we here at Radiolab promise to keep our crap-detectors working full time when we look for explanations about human behavior. But in the meantime, maybe scientists could put someone in a brain scanner while they are reading the words “brain scans indicate ...”

**TAGS:** [idea explorer](#), [the centrifuge](#)

“People swallow poor explanations more readily when the claim is preceded by “Brains scans indicate”

Comment is free

## Think brain scans can reveal our innermost thoughts? Think again

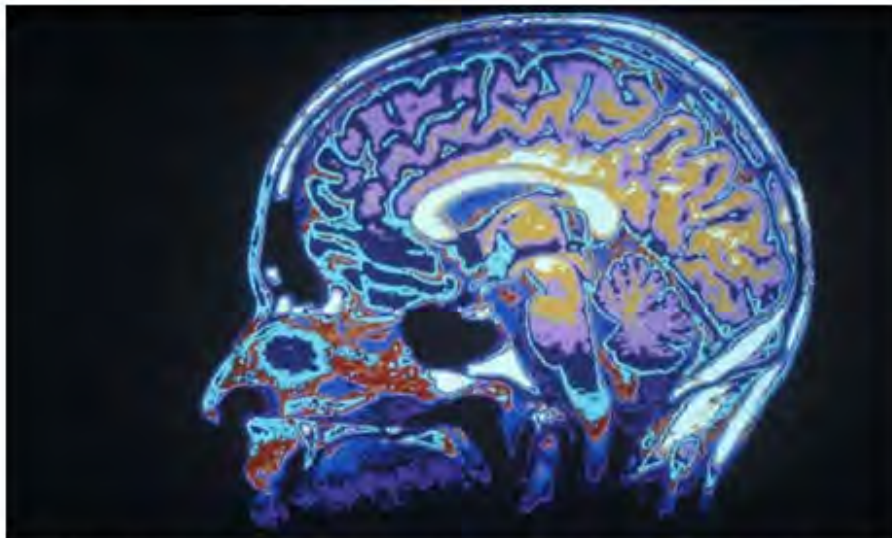
Increasing claims for neuroscience – that it can locate jealousy or Muslim fundamentalism – are ludicrous



Raymond Tallis

The Observer, Sunday 2 June 2013

 Jump to comments (306)



Brain scans cannot reveal our innermost thoughts. Photograph: Black Star /Alamy

The grip of [neuroscience](#) on the academic and popular imagination is extraordinary. In recent decades, brain scientists have burst out of the laboratory into the public forum. They are everywhere, analysing and explaining every aspect of our humanity, mobilising their expertise to

[...] Few people realise how **indirect** is the relationship between what the scan detects and what is happening in the brain.



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

**L'imagerie par résonance magnétique (IRM)**

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

# 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,

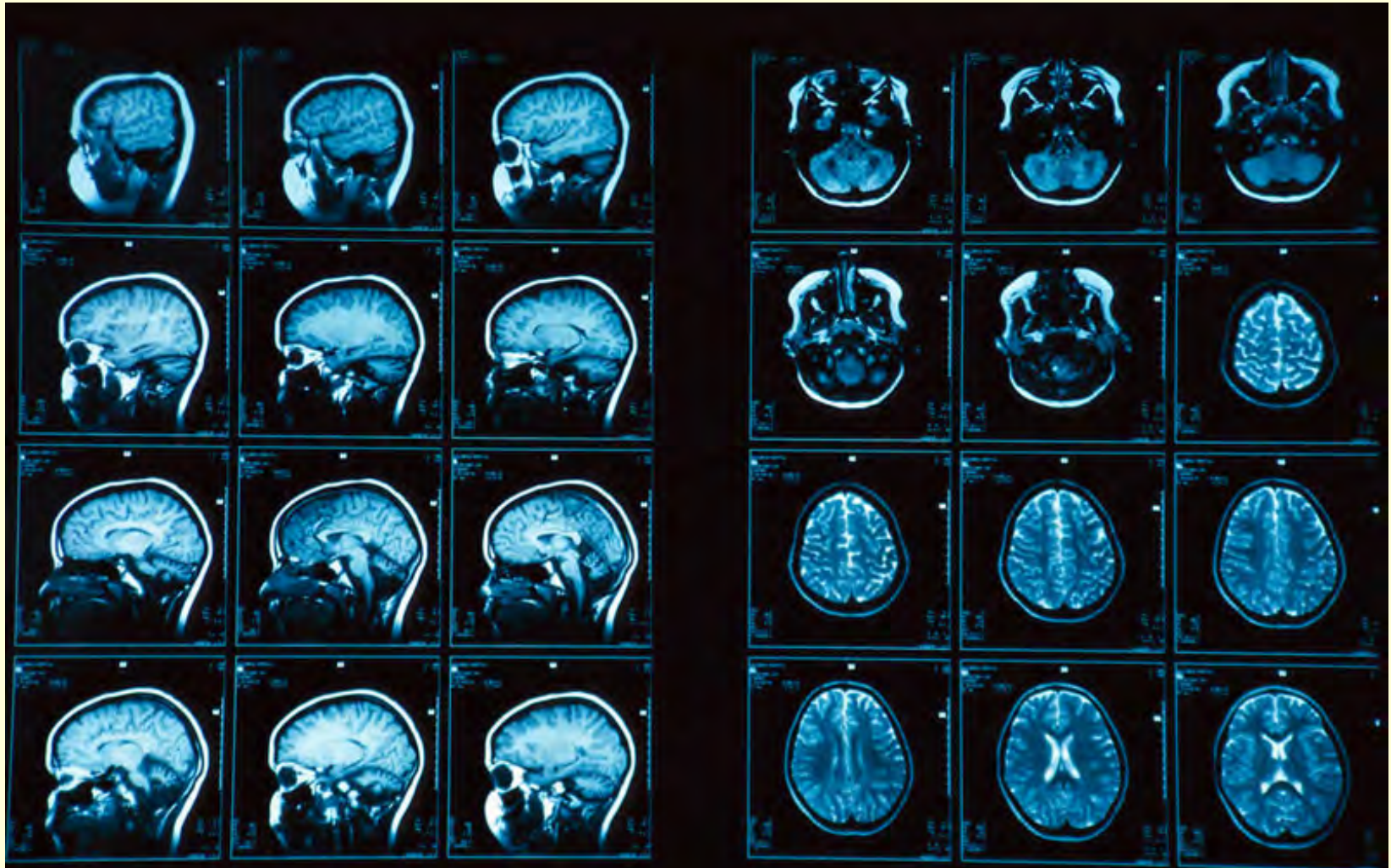
en particulier de l'eau qui constitue environ les trois quart de la masse du corps humain.



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



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

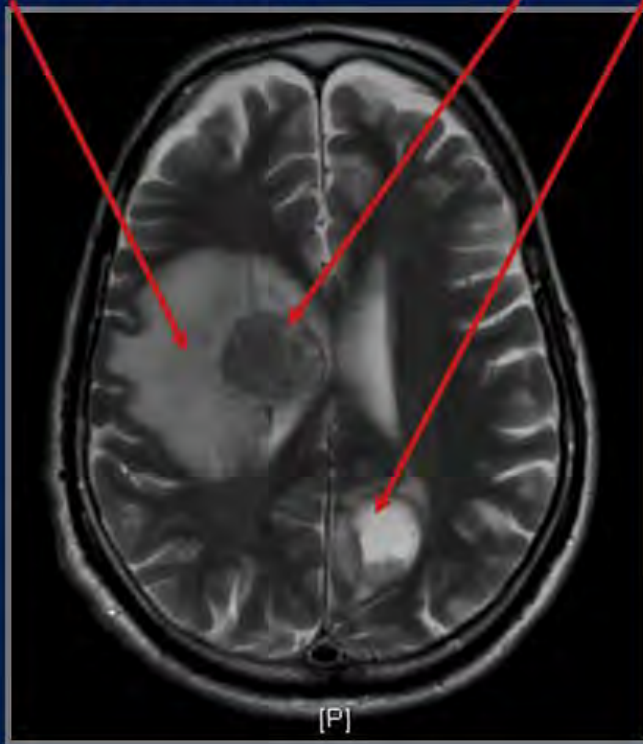


# Brain Metastases on MRI Images

---

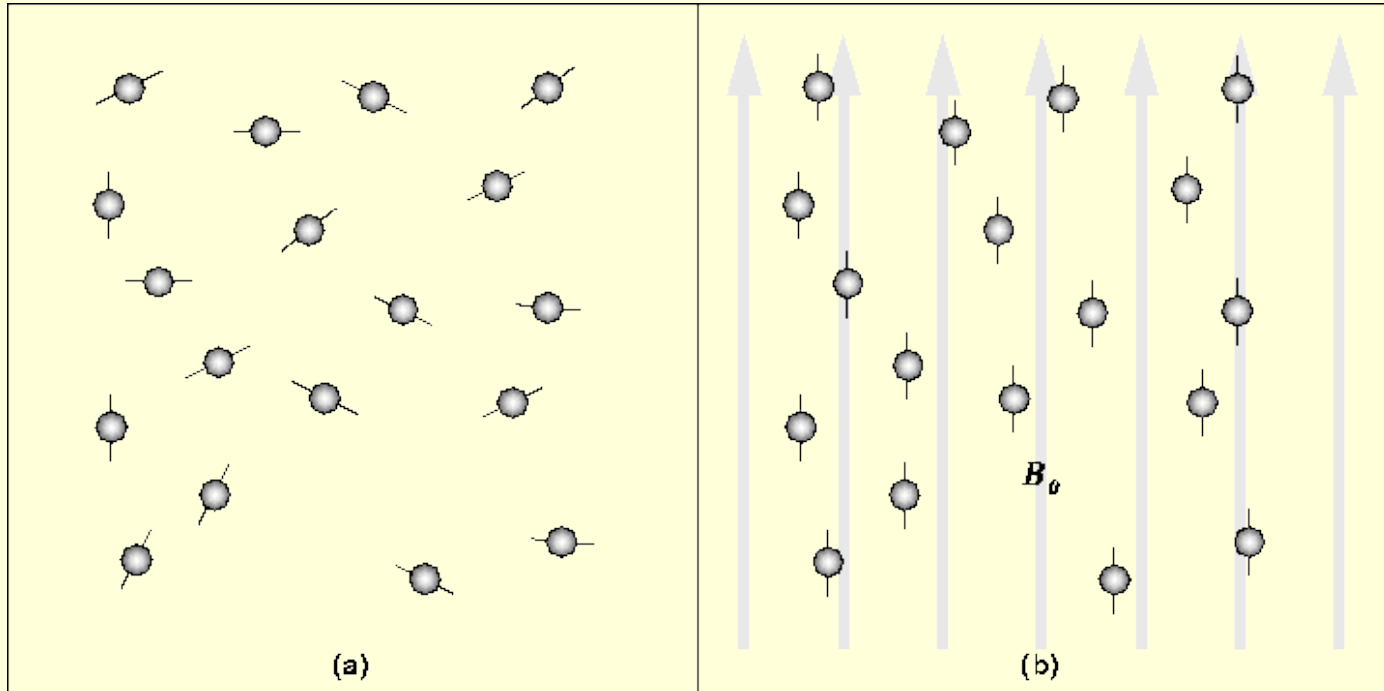
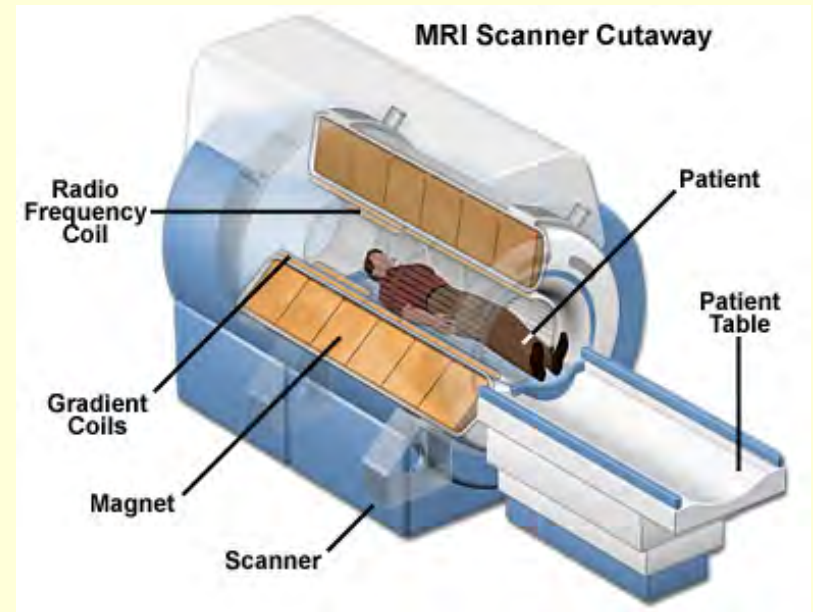
Edema (swelling)

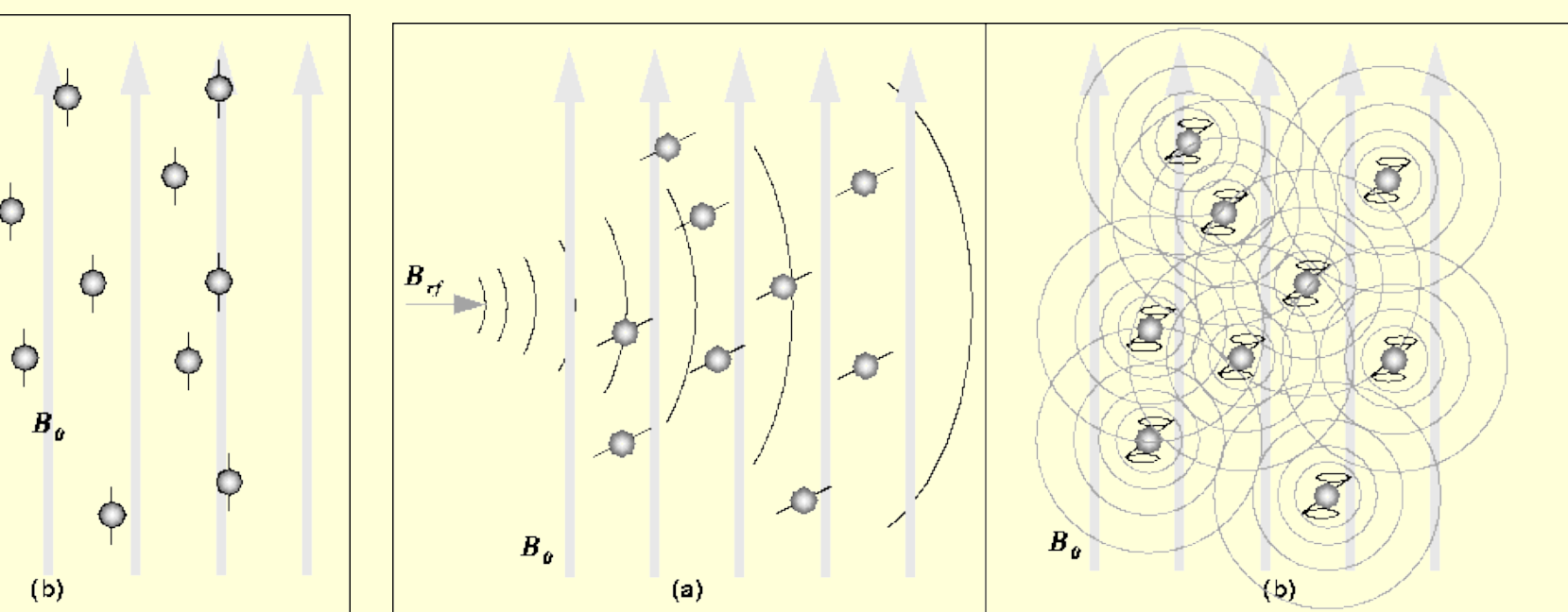
Brain metastases



## Principe de fonctionnement :

- le **champ magnétique** de l'appareil de résonance magnétique **va aligner** celui, beaucoup plus faible, de chaque proton des **atomes d'hydrogène** contenus dans l'eau des différents tissus de l'organisme;





- la région dont on veut avoir une image est ensuite bombardée par des **ondes radios**;
- à l'arrêt des ondes radios, les protons retournent à leur alignement original en **émettant un faible signal radio** (la fameuse «résonance magnétique»);
- l'intensité de la résonance magnétique est **proportionnelle à la densité des protons dans le tissu**, et par conséquent à son taux d'hydratation;
- des capteurs spéciaux relaient cette information à un ordinateur qui combine ces données pour créer des images de coupe du tissu dans différentes orientations.



Le sujet reçoit les consignes et est introduit dans le scan d'IRMf.



Au bout de quelques minutes, l'ordinateur est en mesure de produire des images structurales en [IRM](#) de coupes sagittales (à gauche) et axiale (à droite) du cerveau du sujet.



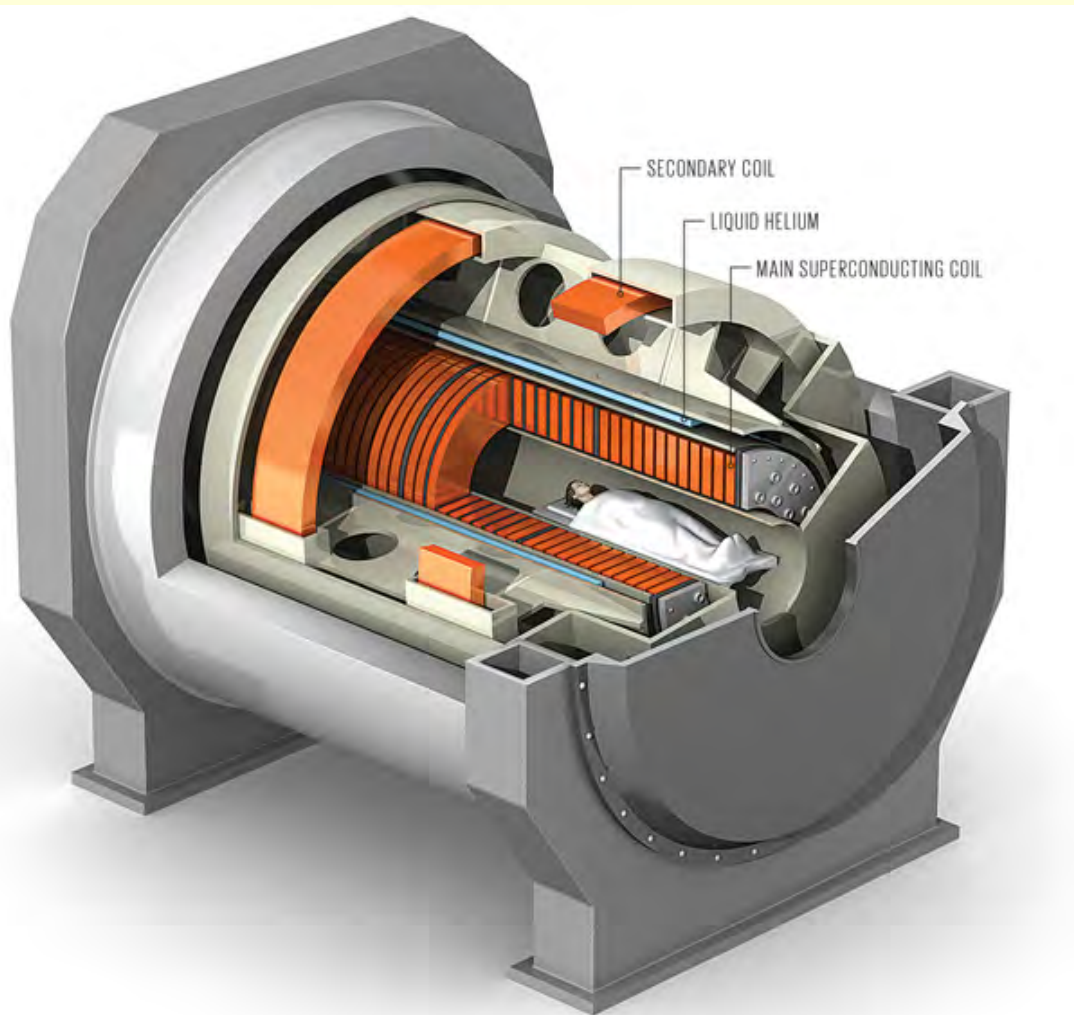


**Une coupe sagittale mettant en évidence l'intérieur de l'hémisphère cérébral gauche du sujet.**

# World's most powerful MRI gets set to come online

Oct 24, **2013** by John Hewitt

<http://phys.org/news/2013-10-world-powerful-mri-online.html>



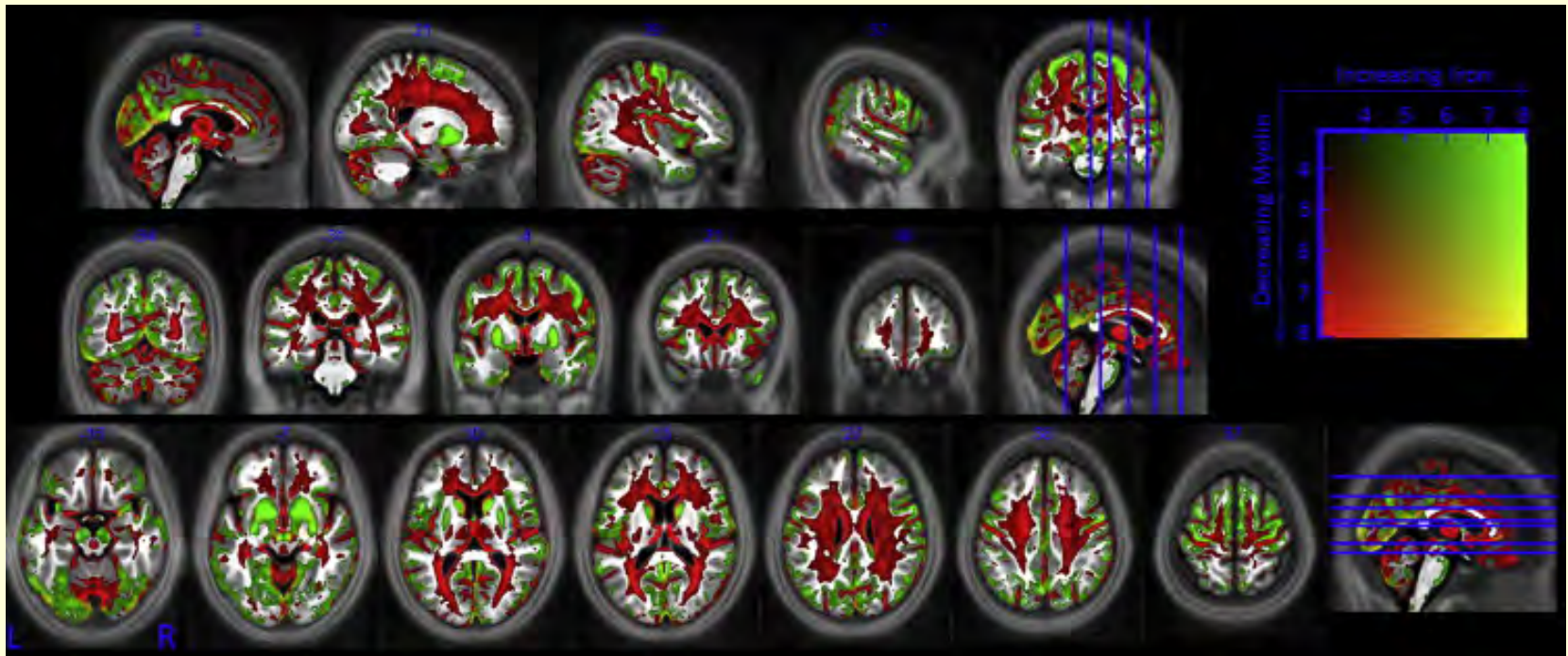
- Capable de générer **11,75 Tesla** (le record précédent était de 9,4 Tesla)
- Champ magnétique assez fort pour soulever 60 tonnes métriques (plus fort que celui du Grand Collisionneur de Hadron)
- Fera passer la taille des voxels de 1 mm à **0.1 mm** (un volume pouvant encore contenir plus de 1000 neurones)

# Mapping the effects of age on brain iron, myelination, and macromolecules – with data!

May 25, 2016

<https://neuroscience.com/2016/05/25/mapping-the-effects-of-age-on-brain-iron-myelination-and-macromolecules-with-data/>

The structure, function, and connectivity of the brain changes considerably as we age<sup>1-4</sup>. Recent advances in MRI physics and neuroimaging have led to the development of **new techniques which allow researchers to map quantitative parameters sensitive to key histological brain factors such as iron and myelination.**



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

**Tomographie par émission de positons (PET scan)**

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

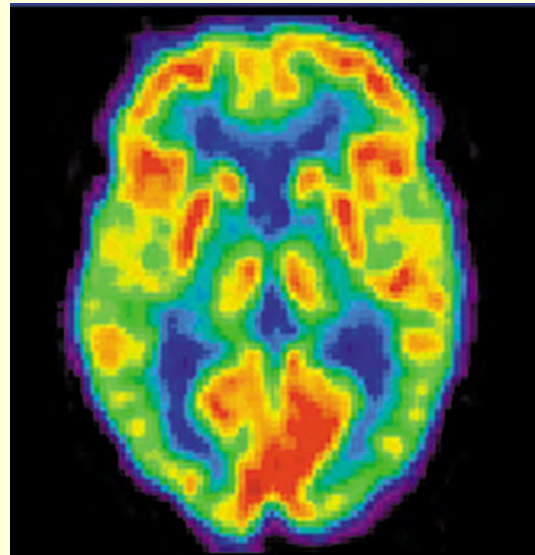
Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

# 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**.



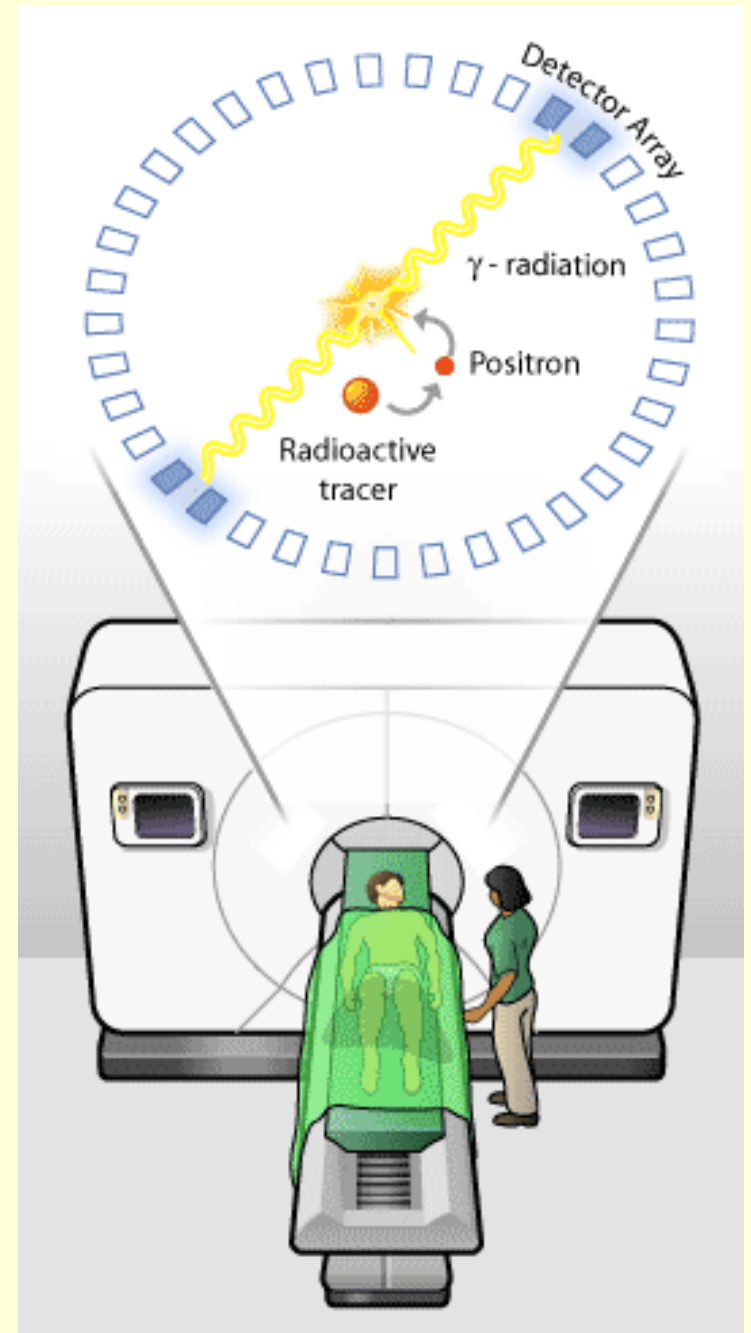
Répartition des neurotransmetteurs, de leurs récepteurs, etc.

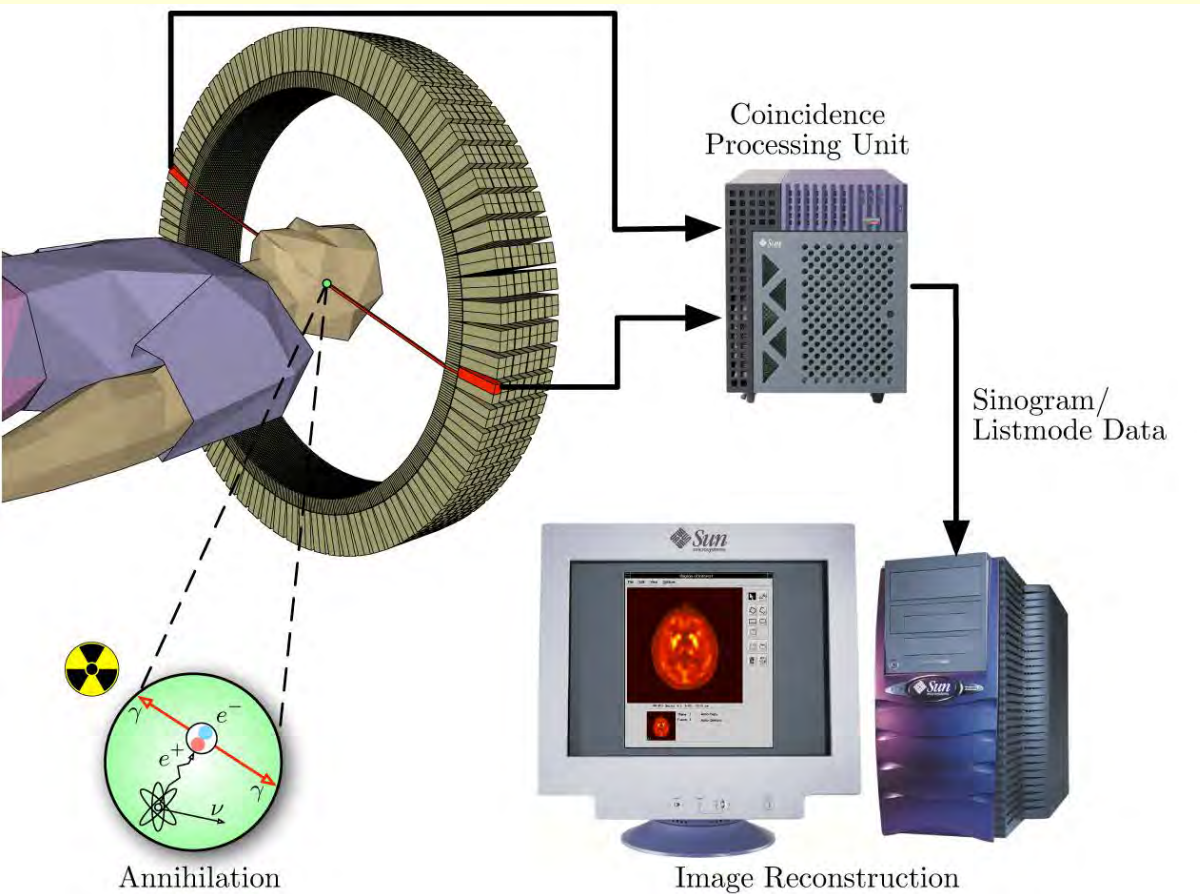
Les fameux **positons** de la TEP proviennent de la dégradation d'un **noyau radioactif** incorporé dans le système sanguin du sujet.

Un positon est une particule élémentaire ayant la même masse qu'un électron mais une charge de signe opposé.

Les positons émis par la dégradation radioactive vont donc immédiatement **s'annihiler** avec les électrons des atomes voisins.

Cette annihilation produit de l'énergie qui prend la forme de **deux rayons gamma** émis dans des directions diamétralement opposées.

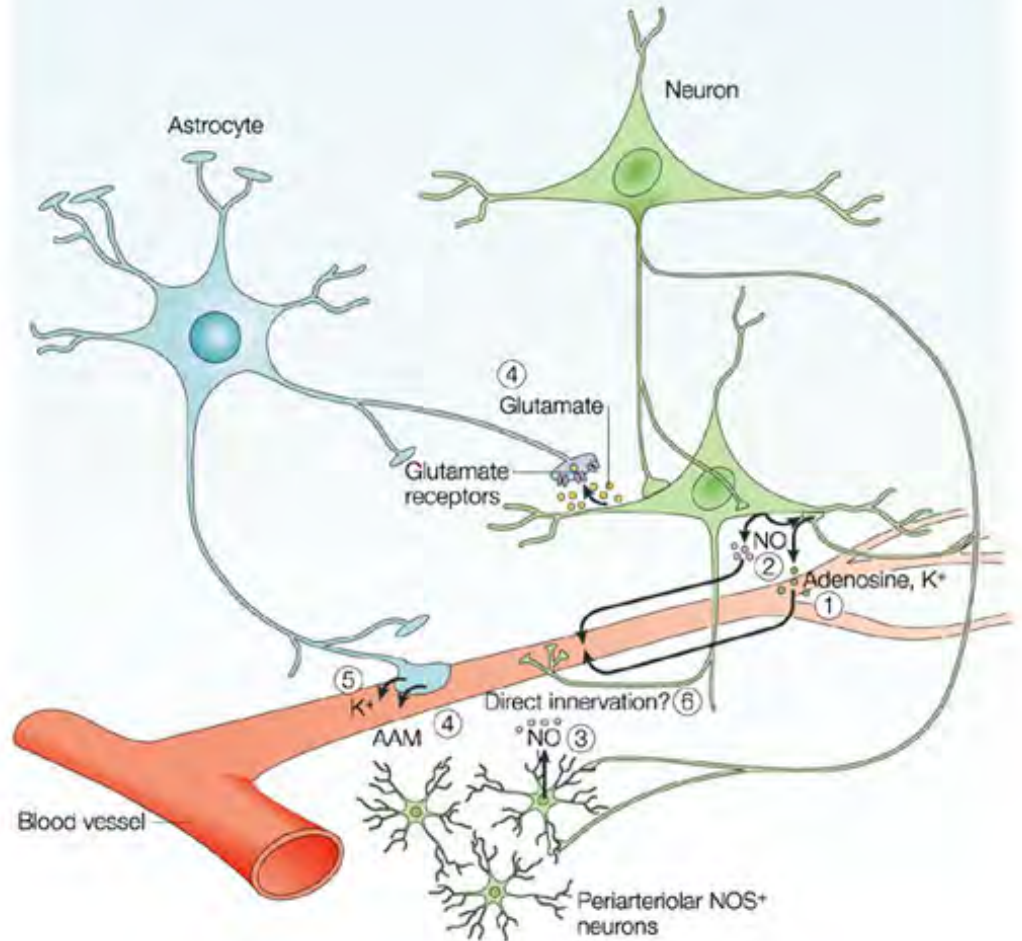




Une série de détecteurs placés autour de la tête du sujet va ensuite **enregistrer les couples de rayons gamma émis** et, grâce aux calculs faits par l'ordinateur, **identifier la position de leur lieu d'émission.**

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

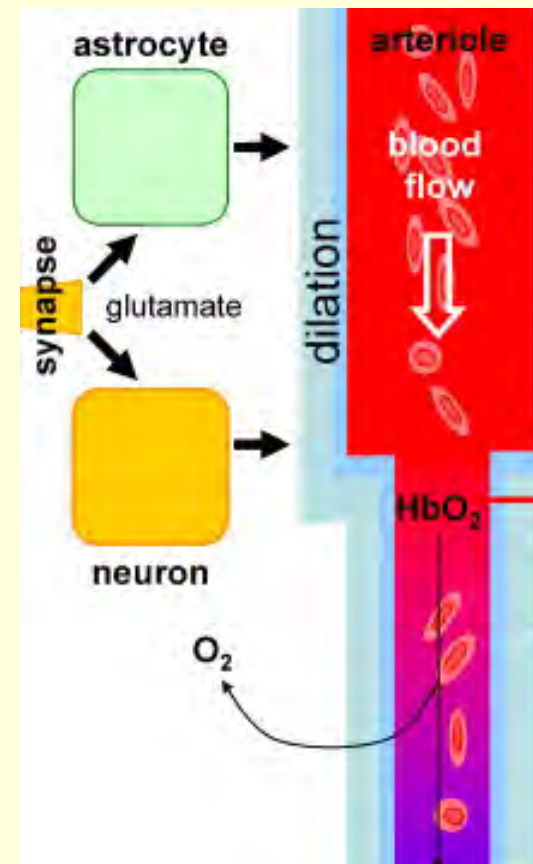
lorsqu'un groupe de  
neurones devient **plus  
actif**, une vasodilatation  
locale des capillaires  
sanguins cérébraux se  
produit automatiquement  
pour amener davantage  
de sang, et donc  
d'oxygène, vers ces  
régions plus actives.

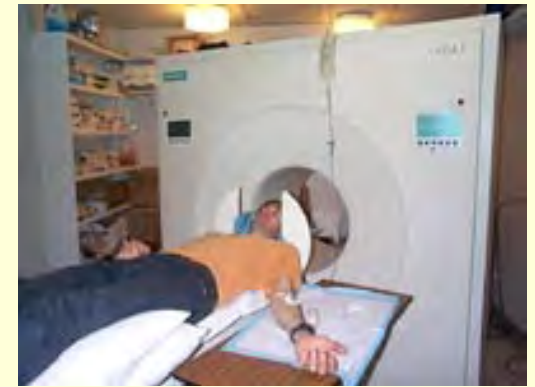




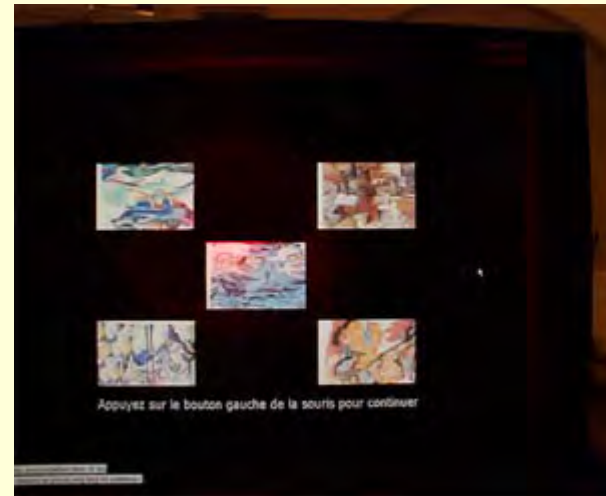
Lors d'une TEP, on doit injecter au sujet une solution contenant un **élément radioactif** qui peut être l'eau elle-même ou du glucose radioactif, par exemple.

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.





**On installe dans le bras du sujet un cathéter par où la solution d'eau radioactive sera injectée à intervalles réguliers.**



**Vue de derrière du scan qui permet de voir le moniteur où apparaissent les images associées à différentes tâches (ici, les tableaux abstraits associés à la tâche faisant intervenir la mémoire de travail).**

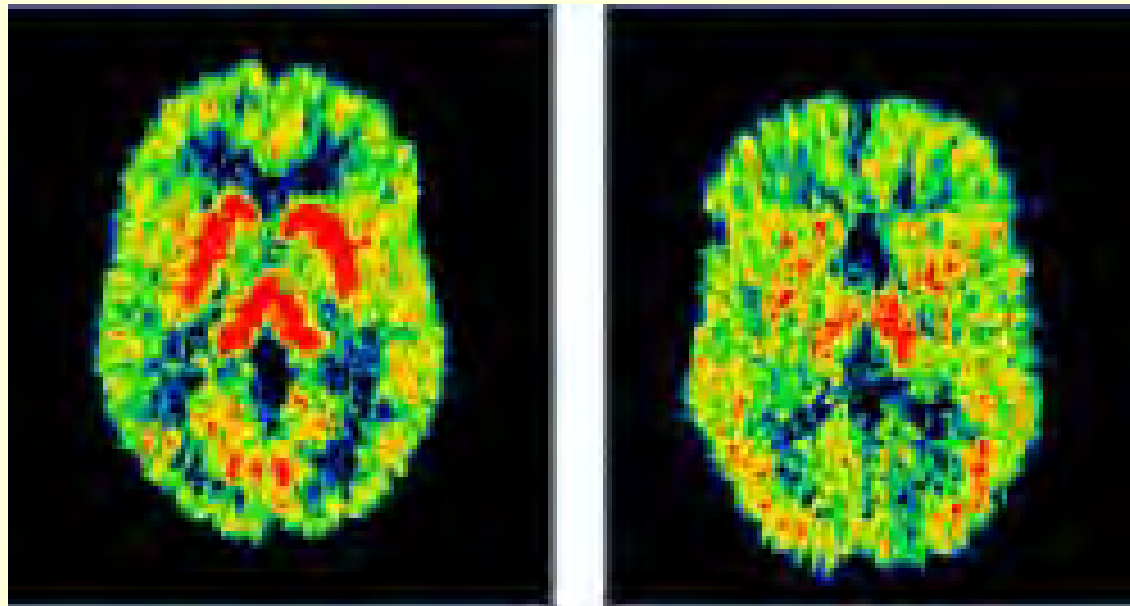
Les images produite par la TEP ne rivalisent pas avec celles de l'IRMf en terme de résolution, mais offrent souvent des contrastes de couleurs où les couleurs les plus chaudes correspondent aux zones les plus actives.



**Une écoute subjective ou analytique d'une même pièce de musique par le même sujet active préférentiellement l'hémisphère droit ou l'hémisphère gauche.**

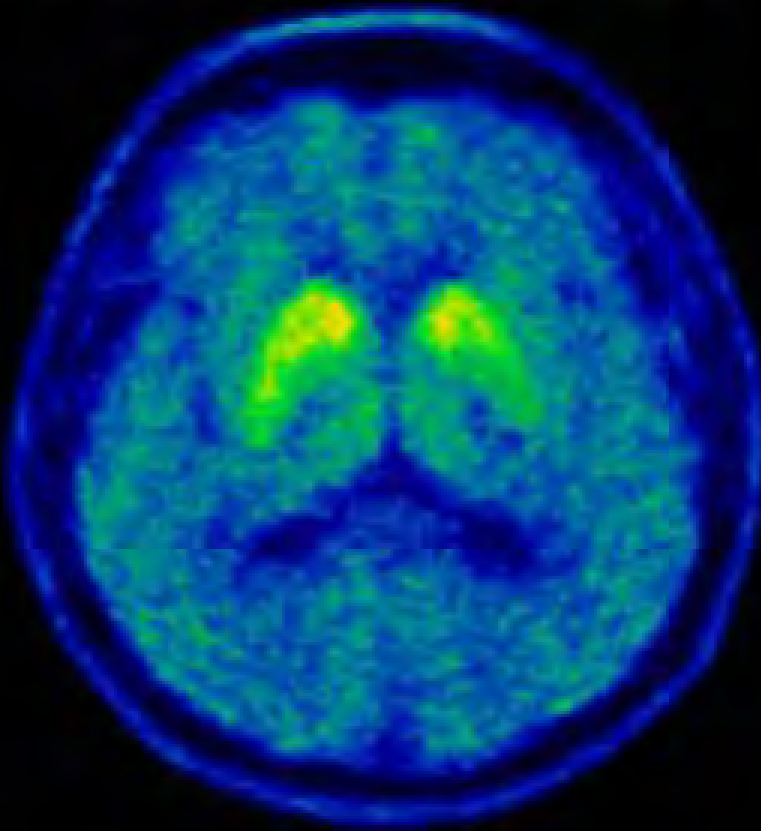
En plus de montrer l'activation fonctionnelle du cerveau ou de détecter des tumeurs ou des caillots, la particularité de la TEP est de permettre d'inclure l'isotope radioactif dans certaines substances dont on veut connaître l'utilisation métabolique par certaines régions cérébrales.

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.

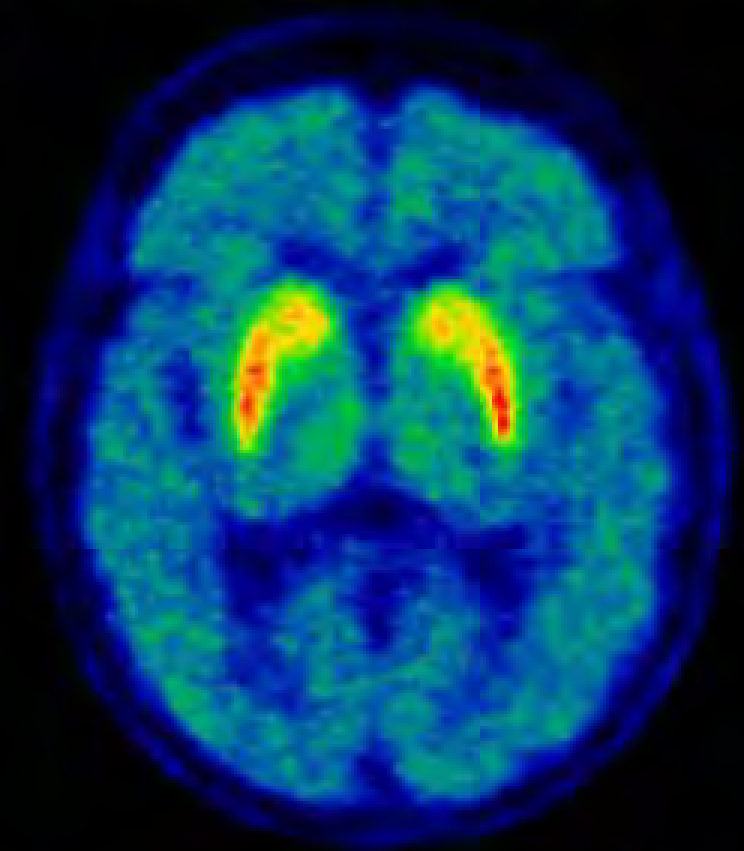


L'image de gauche montre la TEP du cerveau d'un sujet normal. À droite, la TEP révèle un taux de sérotonine (un neurotransmetteur) plus faible chez un sujet atteint de dépression sévère.

**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.

## ***Quelques limitations***



Comme la demie-vie des éléments radioactifs employés doit être courte (environ deux minutes), ceux-ci doivent être **produits sur place**, ce qui implique des coûts assez élevés et limite l'accessibilité des scans à TEP.

Le temps efficace pour tester une tâche est relativement court (moins d'une minute) à cause de la dégradation rapide de la source de radioactivité.

Après chaque tâche, le sujet doit attendre plusieurs minute pour que le niveau de radioactivité émis soit négligeable avant de recevoir une nouvelle dose pour la tâche suivante.

Les doses de radioactivité reçues par un sujet durant une session de TEP sont peu élevées, mais on ne permet tout de même qu'une seule session par année à un même sujet.

# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

**Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)**

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

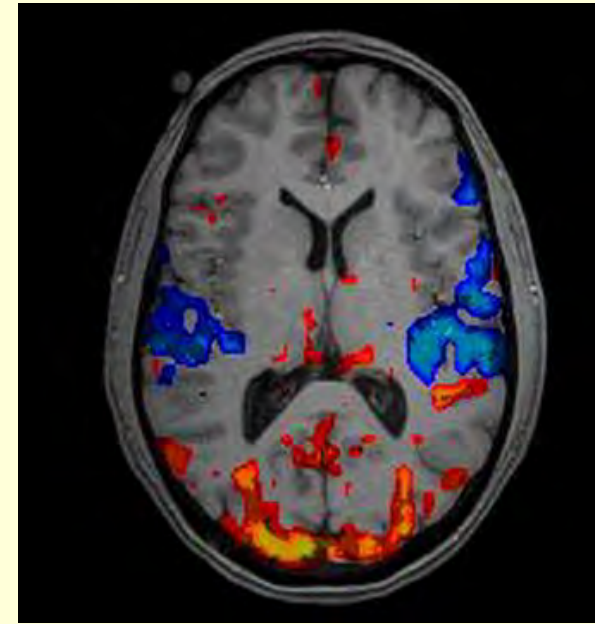
Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

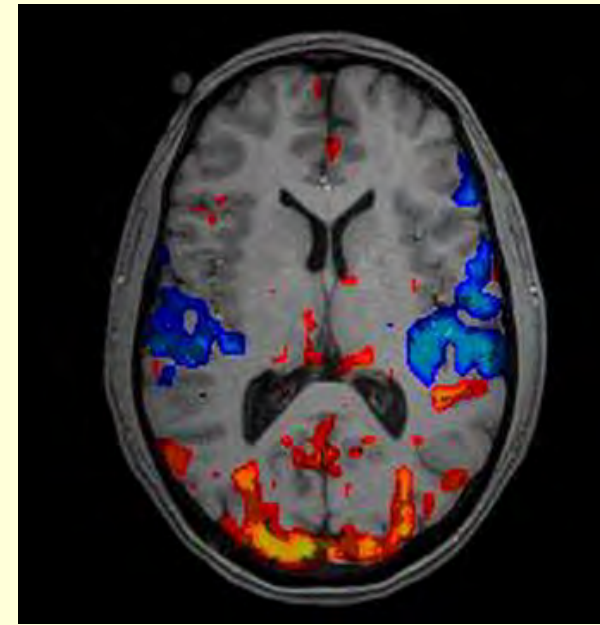
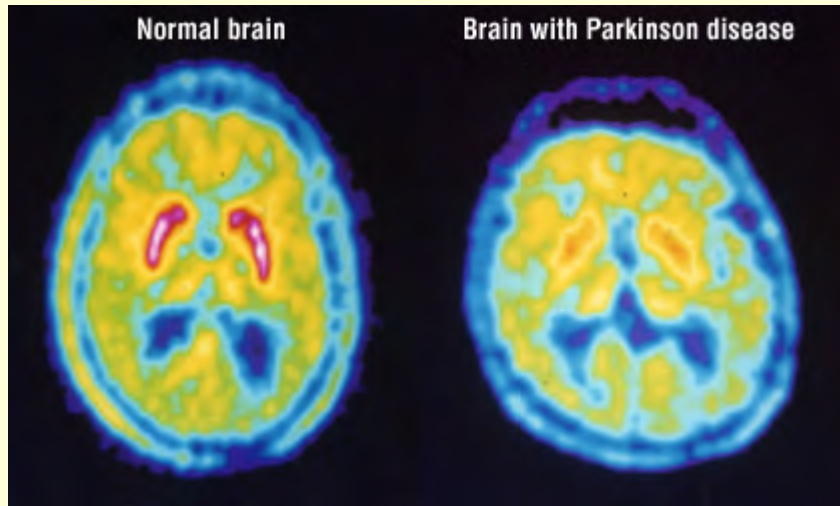
# Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ( IRMf )

- À partir des années **1990**
- nous renseigne sur l'**activité** des différentes régions cérébrales (et pas seulement en surface comme l'EEG)
- 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**.





Peut être utilisée sans l'injection de substance dans l'organisme du sujet (contrairement au PET scan).

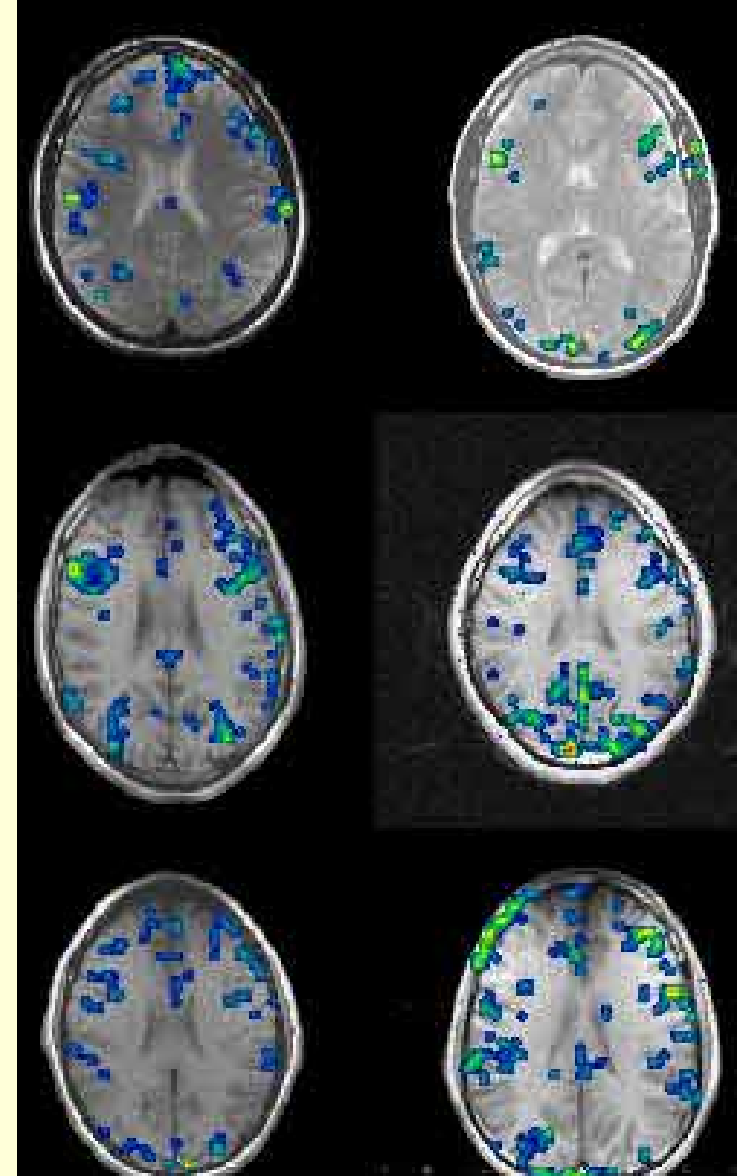


Peut être utilisée sans l'injection de substance dans l'organisme du sujet (contrairement au PET scan).

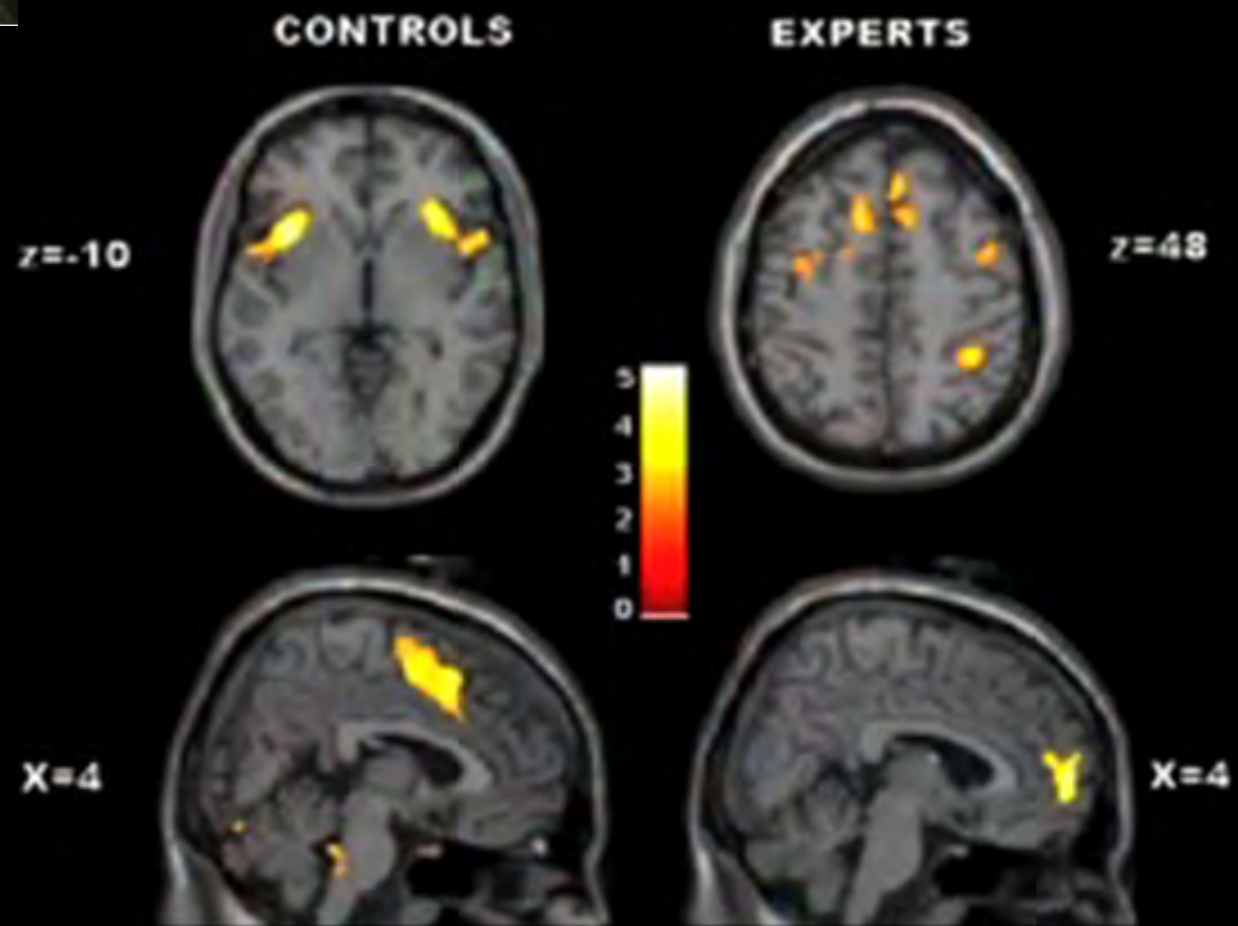
Peut fournir une image **structurelle** et **fonctionnelle** du même cerveau, facilitant ainsi les correspondances anatomo-fonctionnelles.

La **résolution spatiale** est de l'ordre du millimètre (de **3 mm** (pour les machine à 3 Tesla) à **1 mm** pour celles à 7 Tesla)

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)



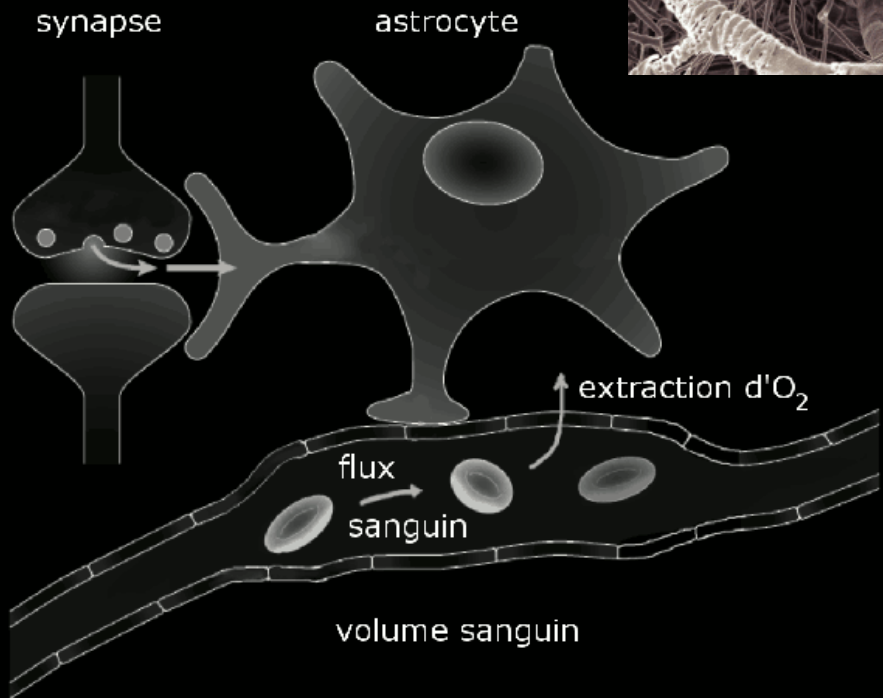
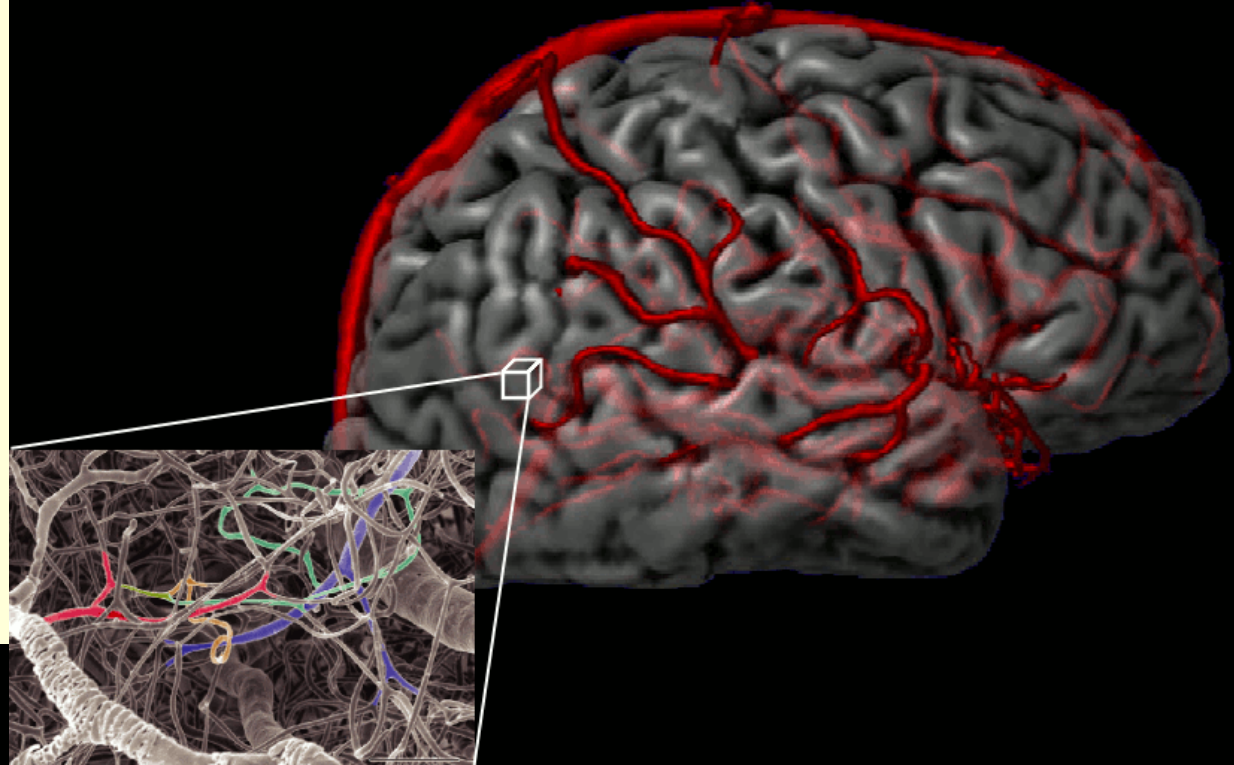
**Résonance magnétique fonctionnelle** durant le test de Stroop pour six sujets différents démontrant la **grande variabilité** entre les participants.



## Tirée de Pierre Bellec

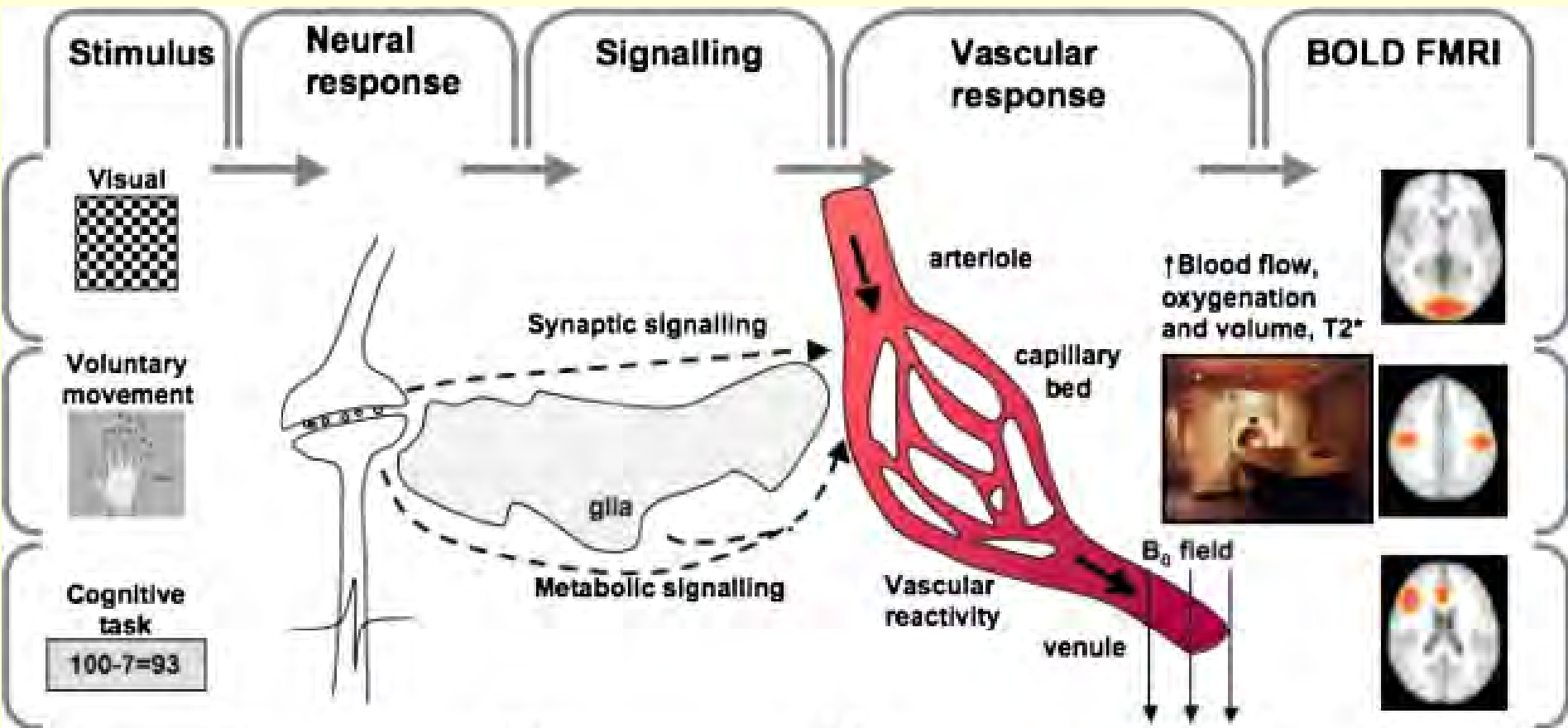
[https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwir7vTM45rLAhXJ2D4KHf0cAG8QFgg4MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.bic.mni.mcgill.ca%2Fusers%2Fpbellec%2Fdata%2Freview\\_lsni.pdf&usq=AFQjCNGBiKg\\_wv2IF4DtIlo-0Avlsu1E\\_A&sig2=ty0vWUO22VVjepAAr\\_hCbw&cad=rja](https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwir7vTM45rLAhXJ2D4KHf0cAG8QFgg4MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.bic.mni.mcgill.ca%2Fusers%2Fpbellec%2Fdata%2Freview_lsni.pdf&usq=AFQjCNGBiKg_wv2IF4DtIlo-0Avlsu1E_A&sig2=ty0vWUO22VVjepAAr_hCbw&cad=rja)

(Figure adaptée de Harrison, 2002 and Pike, MNI; Heeger et Ress, 2002, Nature reviews neuroscience, 3 : 142-151.



Le principe sur lequel s'appuie l'IRMf (tout comme la TEP d'ailleurs) part de l'observation que 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.

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



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

L'IRMf n'est qu'une mesure **indirecte** des  
processus physiologique dont les rapports  
avec l'activité neuronale sont complexes  
(pas une véritable mesure quantitative).

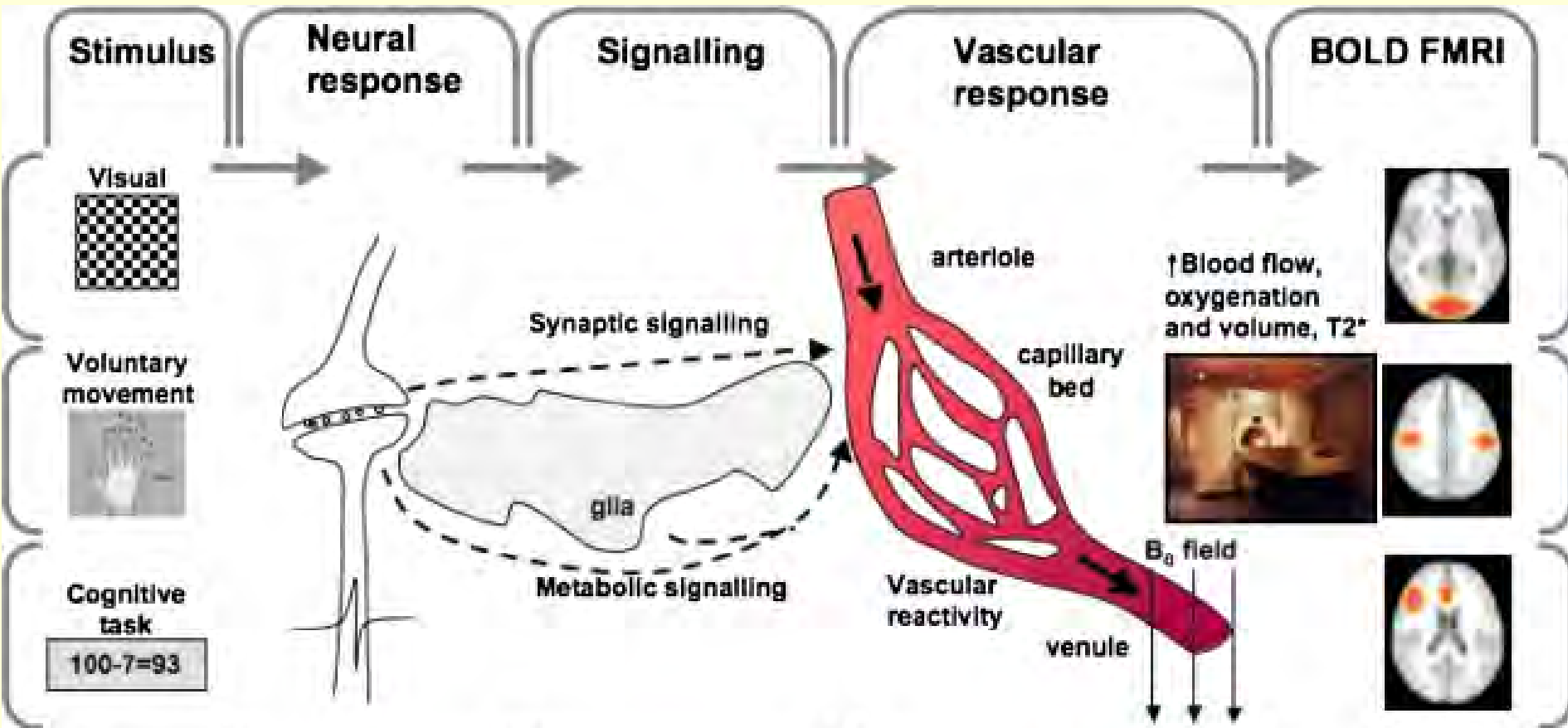
Neurophysiological and metabolic  
basis of the BOLD signal



How to interpret fMRI and compare it to other methods

S.F.W. Neggers

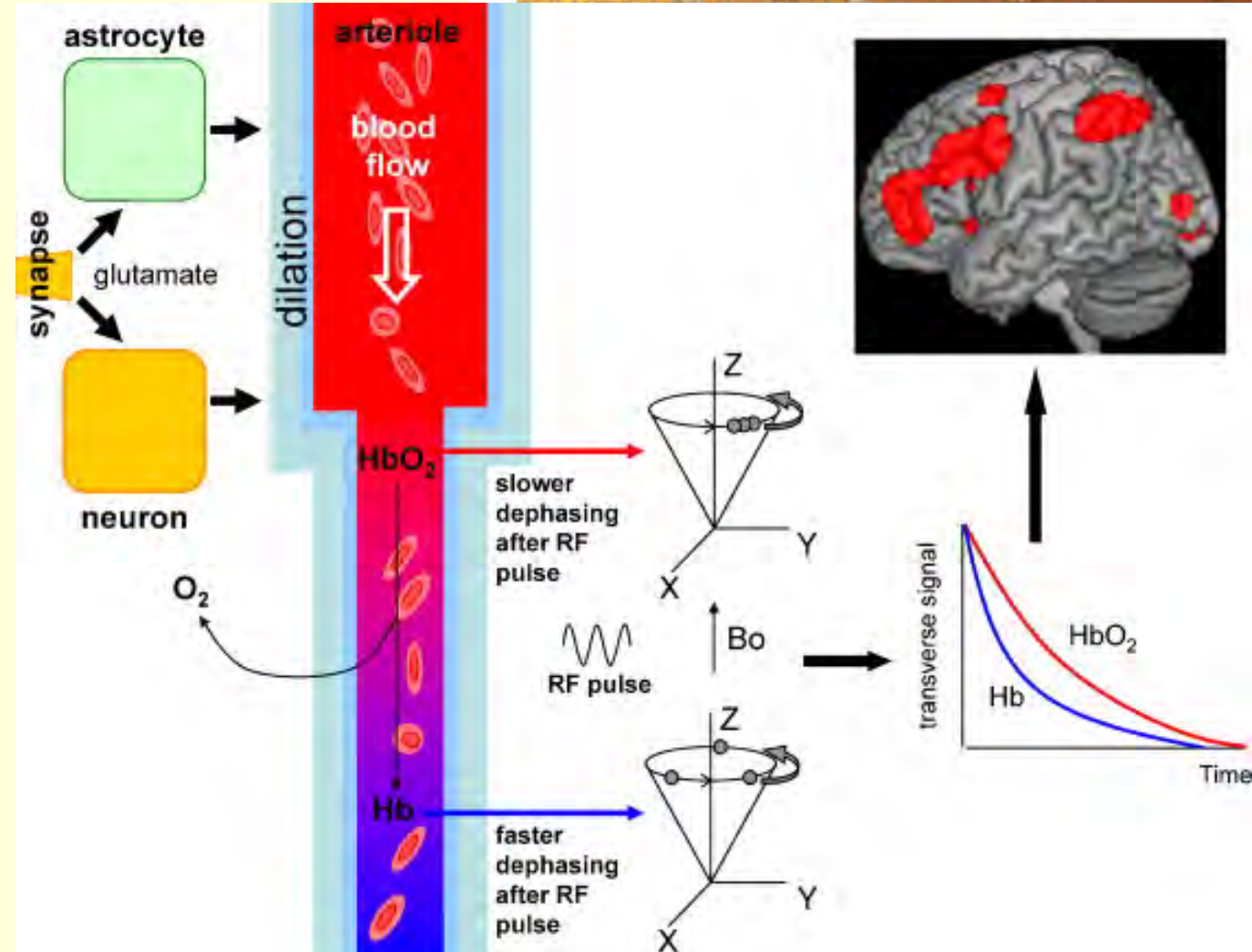
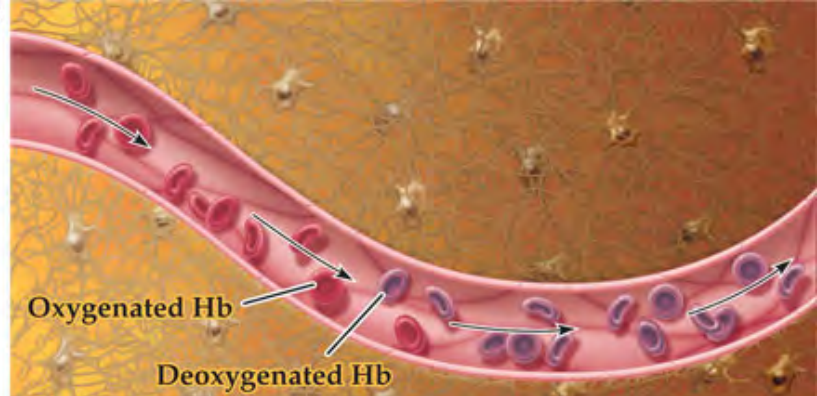
Rudolf Magnus Institute for Neuroscience, Division of Brain Research  
University Medical Center Utrecht  
(b.neggers@umcutrecht.nl)



Or l'**hémoglobine**, cette protéine possédant un atome de fer qui transporte l'oxygène, a des **propriétés magnétiques différentes** selon qu'elle transporte de l'oxygène ou qu'elle en a été débarrassée par la consommation des neurones les plus actifs.

(on l'appelle alors la **désoxy-hémoglobine**)

(A)



**La relation entre les “local field potentials” des neurones et leurs potentiels d’action avec le signal BOLD a été examinée par des expériences où l’on faisait à la fois de l’électrophysiologie et de l’IRMf dans le système visuel du singes anesthésiés et alertes.**

La réponse BOLD reflète principalement les inputs et le traitement local dans une région cérébrale donnée, et moins ses outputs.

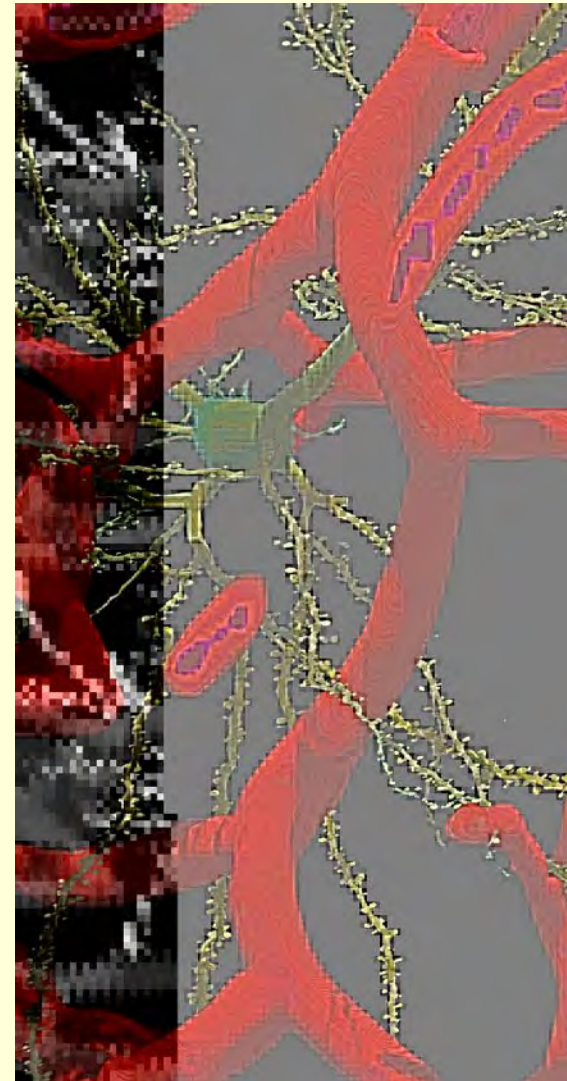
Autrement dit, elle reflète plus l’activité présynaptique que celle des potentiels d’action (Logothetis et al, 2001).

“These studies found that the BOLD responses reflect input and intracortical processing rather than pyramidal cell output activity. “

## What We Can and What We Can’t Do with fMRI

Logothetis 2012

[https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj kudSGg9PPAhXBFz4KHZmnDiQQFggeMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.sfn.org%2F~%2Fmedia%2FSfn%2FDocuments%2FShort%2520Courses%2F2012%2520Short%2520Course%2520I%2FSCII%2520%2520What%2520We%2520Can%2520and%2520What%2520We%2520Can%2520Do%2520with%2520fMRI.ashx&usg=AFQjCNFdi3ZEpf3F6Nv4ySUFuD9J2\\_PR5Q&sig2=m44tBmq98CA-\\_8otmiJiUw](https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj kudSGg9PPAhXBFz4KHZmnDiQQFggeMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.sfn.org%2F~%2Fmedia%2FSfn%2FDocuments%2FShort%2520Courses%2F2012%2520Short%2520Course%2520I%2FSCII%2520%2520What%2520We%2520Can%2520and%2520What%2520We%2520Can%2520Do%2520with%2520fMRI.ashx&usg=AFQjCNFdi3ZEpf3F6Nv4ySUFuD9J2_PR5Q&sig2=m44tBmq98CA-_8otmiJiUw)



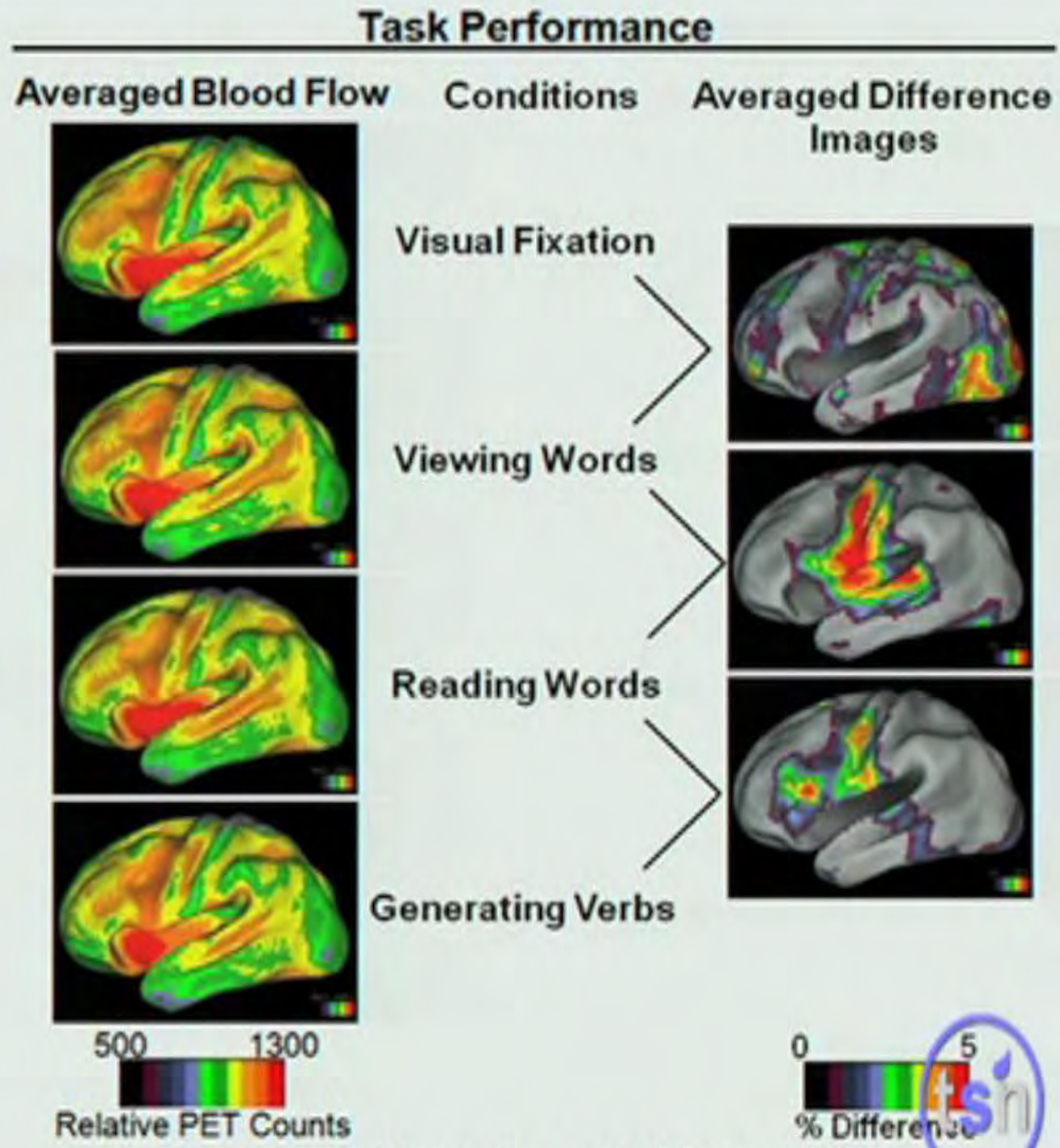


Et bien sûr, c'est toujours **une activité différentielle issue d'une soustraction** entre un état contrôle et l'état de lors d'une tâche.

« 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>



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

**Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale**

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

Parce que **le ratio signal / bruit est plutôt bas** avec l'IRMf :

- on peut manquer des choses, par exemple un petit groupe de neurones étant actifs dans une zone plus large qui ne l'est pas; ou l'inverse, un petit groupe de neurones moins actifs dans une zone très activée.
- on doit faire les expériences sur plusieurs sujets et utiliser des **méthodes statistiques** pour identifier ce qui est significatif dans les fluctuations observées. Cela veut donc dire qu'il y aura plusieurs façons d'analyser les données et de les interpréter. Ce qui fait dire à certains que : "If you try them all, you're going to find something"...
- ces méthodes statistiques peuvent être mal comprises ou mal utilisées;  
**Par exemple :**

# POWER FAILURE: WHY SMALL SAMPLE SIZE UNDERMINES THE RELIABILITY OF NEUROSCIENCE

Katherine Button et al.

*Nature Reviews Neuroscience*, avril **2013**

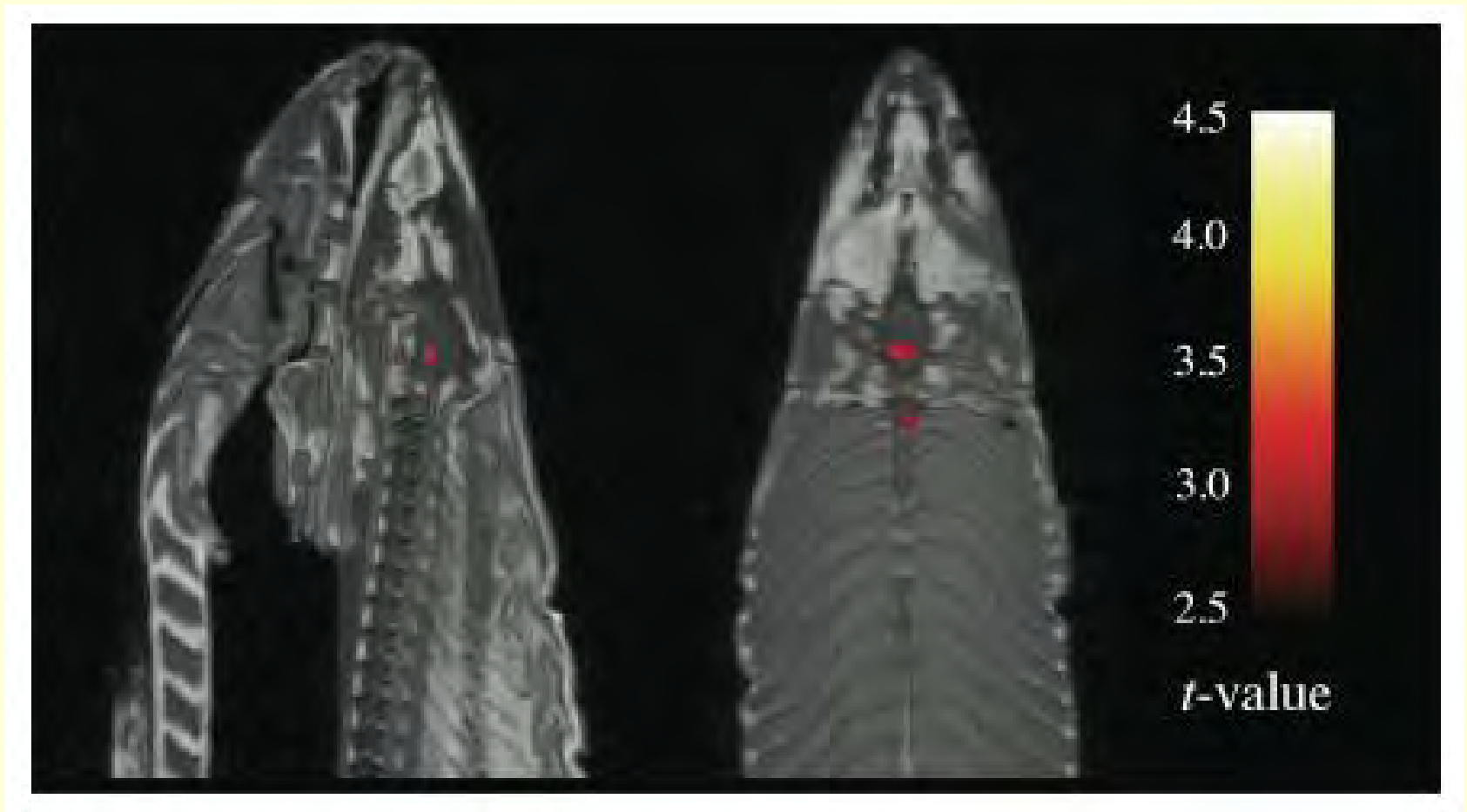
Le nombre de sujets participant aux études d'imagerie cérébrale serait en général **trop petit** pour assurer la fiabilité du phénomène décrit.

Selon l'analyse de Button, sur 48 expériences d'imagerie publiées durant l'année 2011, la plupart n'aurait une puissance statistique qu'avoisinant les **20 %**.

Autrement dit, il n'y aurait **qu'une chance sur cinq** que l'activation cérébrale suspectée soit mise en évidence de manière fiable.

Bref, si les premières études d'imagerie ont pu identifier les circuits cérébraux de comportements simples avec de petits échantillons de sujets seulement, les effets recherchés aujourd'hui sont beaucoup plus subtils et nécessiteraient des échantillons autrement plus grands.

Et finalement :

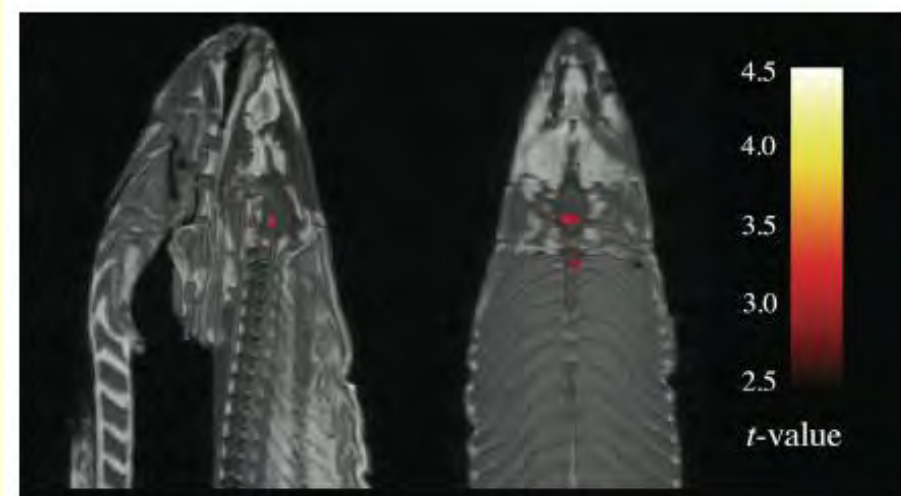


Et finalement :

L'une des critiques les plus médiatisées, de par son caractère impertinent et provocateur : l'histoire du saumon mort dont certaines régions du cerveau et de la moelle épinière **s'activaient en réponse à des stimuli sociaux conçus pour des humains !**

En réalité, il n'y avait évidemment pas d'activation cérébrale, mais la méthodologie et les calculs faits par l'appareil de résonance magnétique fonctionnel (IRMf) faisaient apparaître des taches de couleur au niveau du cerveau.

Alors qu'il devait servir de simple test pour **calibrer les contrastes de l'appareil**, le célèbre saumon mort allait devenir le caillou dans le soulier que l'IRMf traîne encore aujourd'hui...



# Progress and Problems in Brain Mapping

By Jon Lieff

October 11, 2015

[http://jonlieffmd.com/blog/human-brain/progress-and-problems-in-brain-mapping?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=b19cb8d838-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-b19cb8d838-94278693](http://jonlieffmd.com/blog/human-brain/progress-and-problems-in-brain-mapping?utm_source=General+Interest&utm_campaign=b19cb8d838-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-b19cb8d838-94278693)

« Each dot of light on fMRI (**voxel**) measures average blood flow activity in a region of **80,000 neurons** and **4 million synapses** over a second.”

Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal (2001)

<http://www.nature.com/nature/journal/v412/n6843/full/412150a0.html>

What we can do and what we cannot do with fMRI (2008)

<http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7197/abs/nature06976.html>

Limitations of MRIs for Understanding Behavior

October 25, 2015

[http://jonlieffmd.com/blog/limitations-of-mris-for-understanding-behavior?utm\\_source=General+Interest&utm\\_campaign=44bae5a5a4-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_471703a831-44bae5a5a4-94278693](http://jonlieffmd.com/blog/limitations-of-mris-for-understanding-behavior?utm_source=General+Interest&utm_campaign=44bae5a5a4-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_471703a831-44bae5a5a4-94278693)





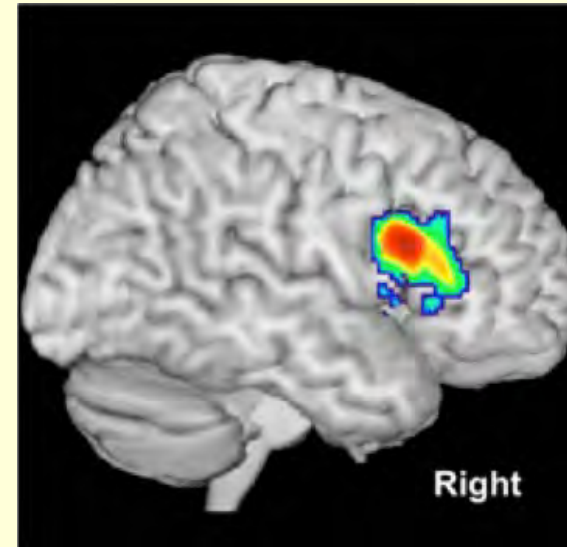
Ou encore : la « **Blobology** », la « science des tâches de couleur » !

« 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

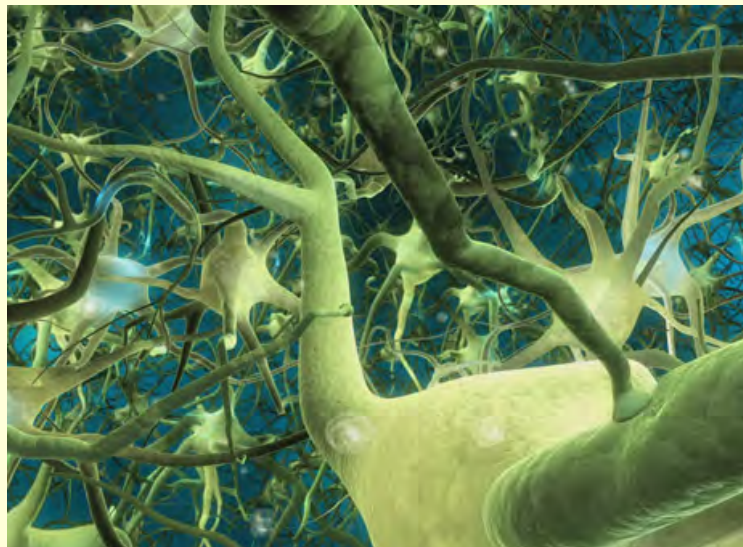
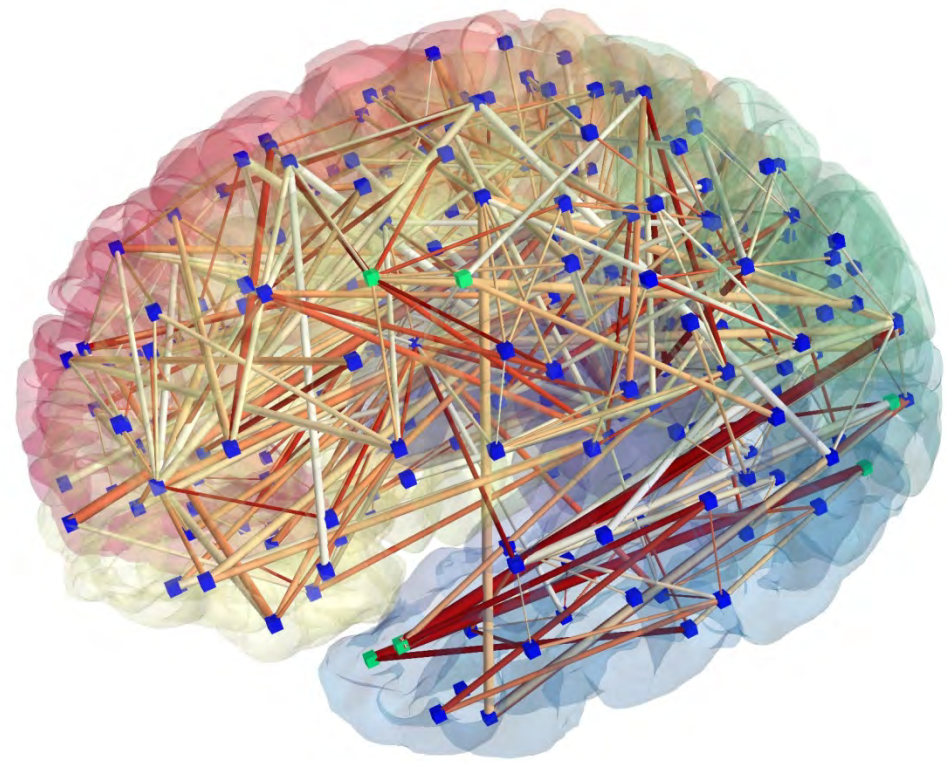
Uttal

(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.



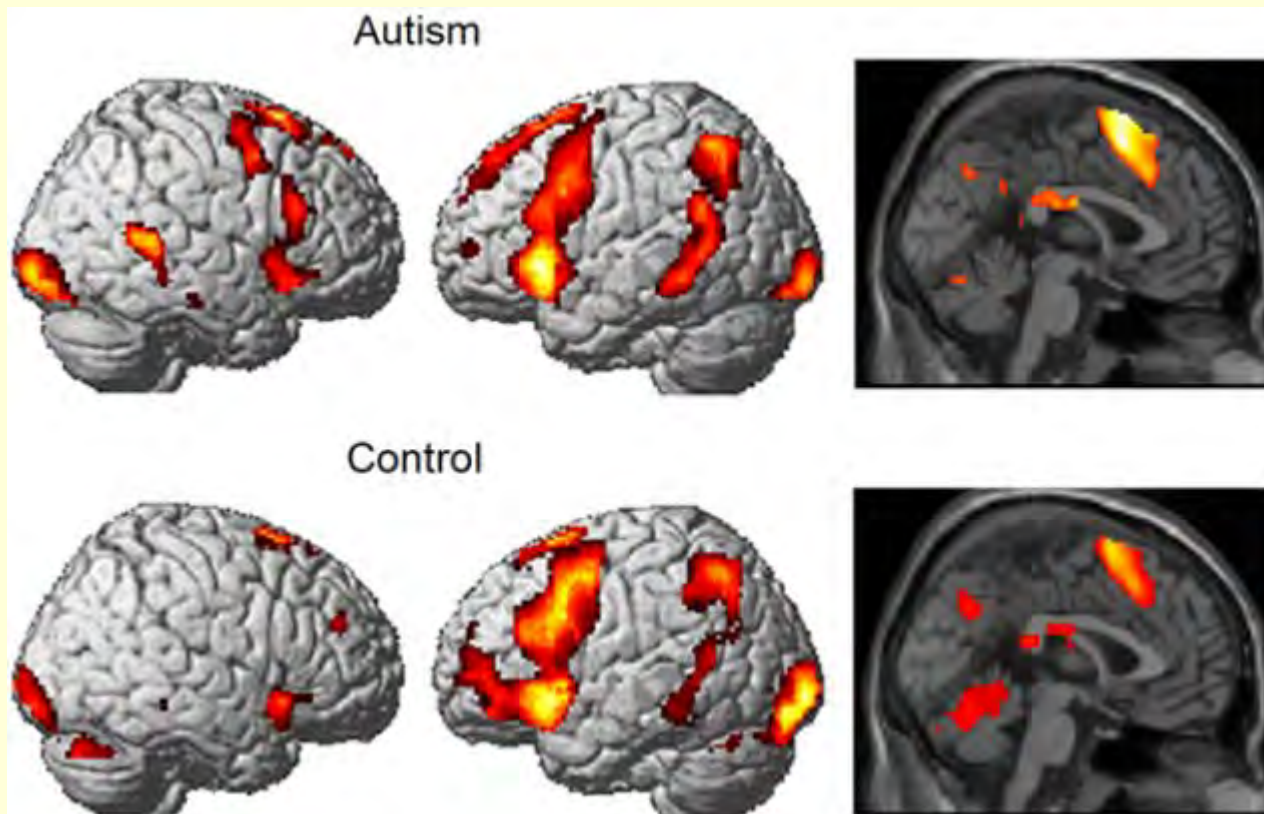
« Pour comprendre comment la cognition fonctionne, le pari actuellement est que le bon niveau d'analyse est celui de **l'interaction dynamique dans le réseau neuronal** à l'échelle microscopique. »

- William Uttal, *Mind and Brain: A Critical Appraisal of Cognitive Neuroscience.*

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.**



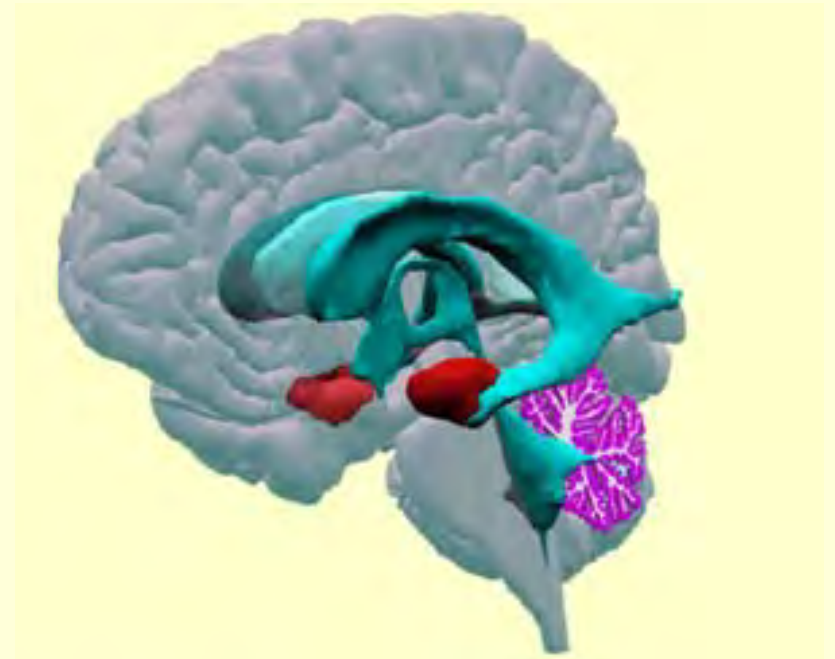
Diagnostiquer l'autisme de haut niveau & le syndrome d'Asperger à partir d'images cérébrales liées aux **pensées sociales** (PsychoMedia, décembre 2014)

<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/>

Exemple :



**Amygdale = peur ?**



Exemple :

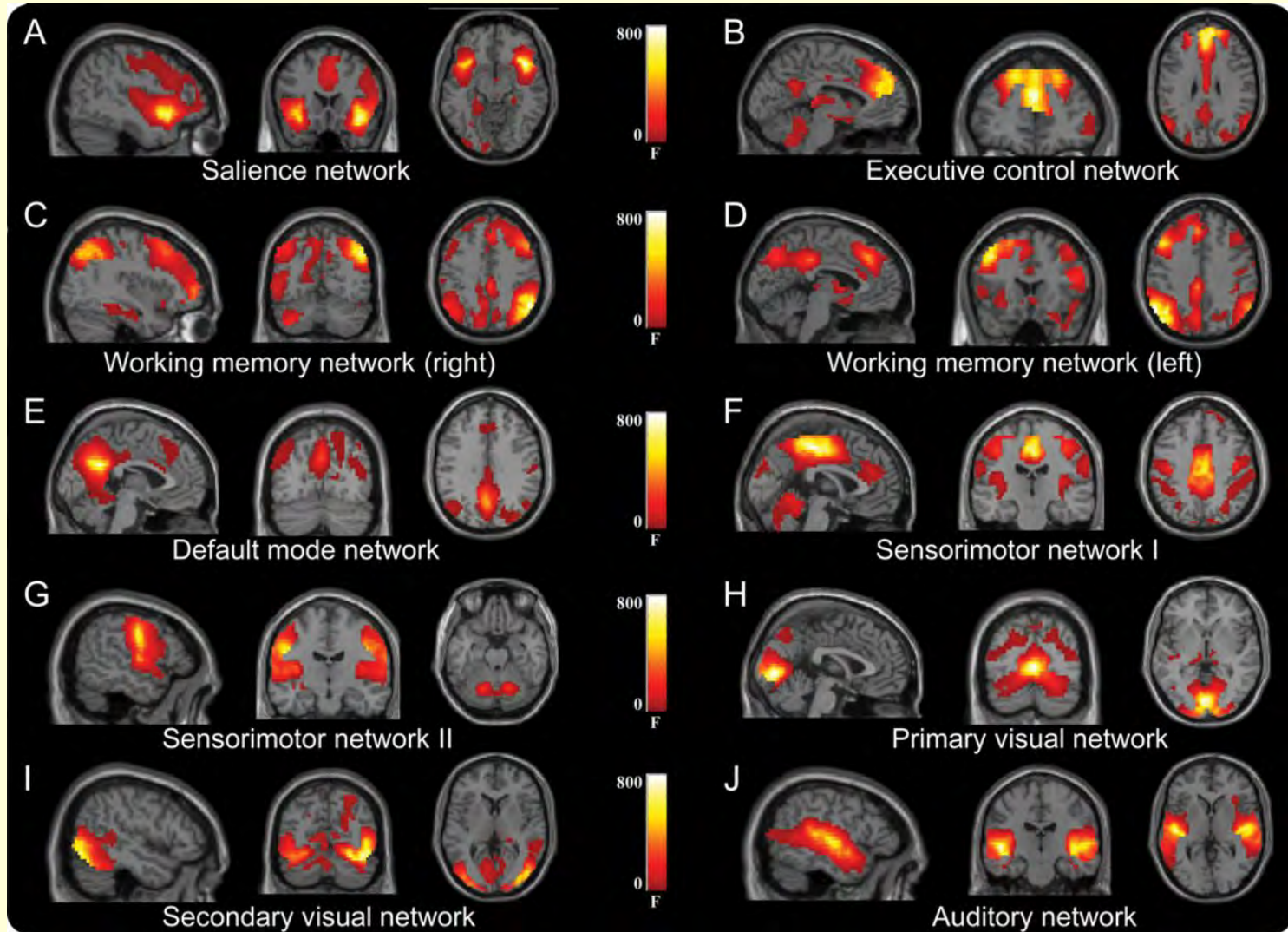


Amygdale ~~X~~ peur ?

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



Si l'amygdale peut être active dans des situations si différentes, c'est qu'elle n'agit pas seule : s'intègre dans différents circuits cérébraux impliquant plusieurs structures.





Lundi, 9 mars **2015**

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

Lundi, 7 novembre **2016**

**Le débat sur la spécialisation fonctionnelle du cerveau**

“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

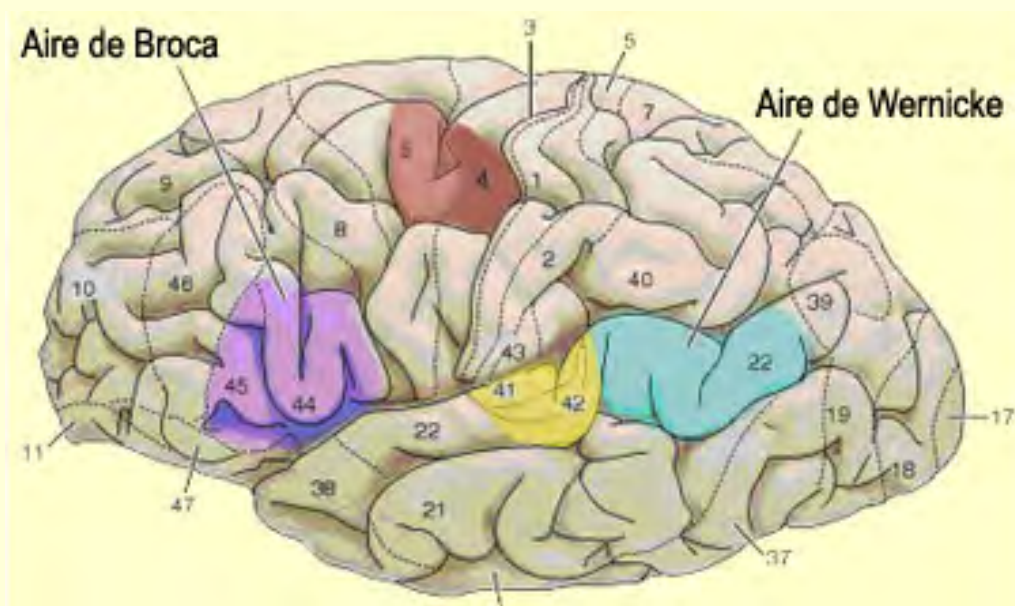
we may have a few extra fancy ones unique to humans

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...).



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



Cette étude démontre que l'aire de Broca, typiquement associée au langage, est plus fréquemment activée dans des tâches non langagières que dans des tâches liées au langage !

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.**

**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](#)



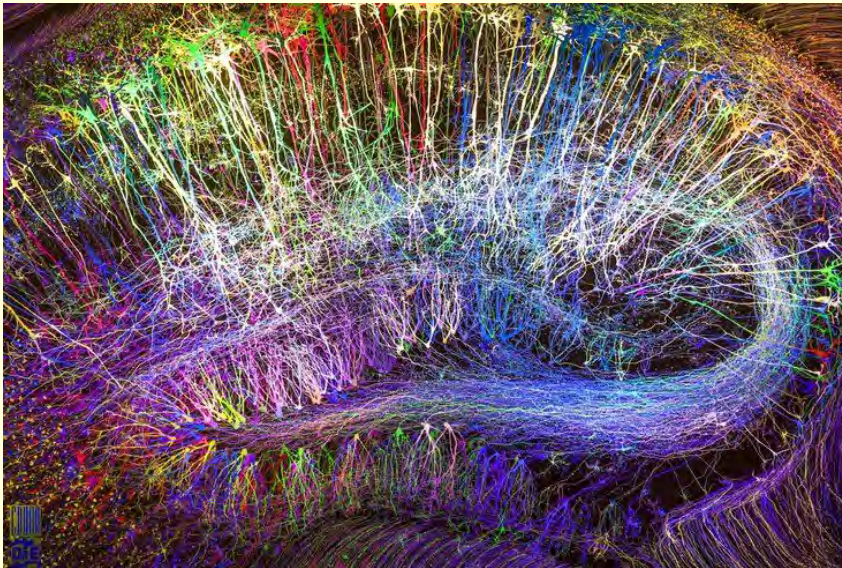
Cela dit, ce n'est pas parce qu'il y a très peu de chance de trouver des « centre de » quoi que ce soit dans le cerveau que l'on ne peut pas y trouver des structures cérébrales bien **différenciées** avec circuits neuronaux capables d'effectuer des calculs particuliers.

Car on trouve effectivement beaucoup de ces structures aux capacités computationnelles particulières mais auxquelles on ne peut accoler une étiquette fonctionnelle unique, comme les circuits de

**l'hippocampe**

ou du

**cervelet.**



# AFTER PHRENOLOGY

Neural Reuse and the Interactive Brain



MICHAEL L. ANDERSON

Dans son livre *After Phrenology : Neural Reuse and the Interactive Brain*, **Michael Anderson** nous propose d'aller au-delà de la phrénologie

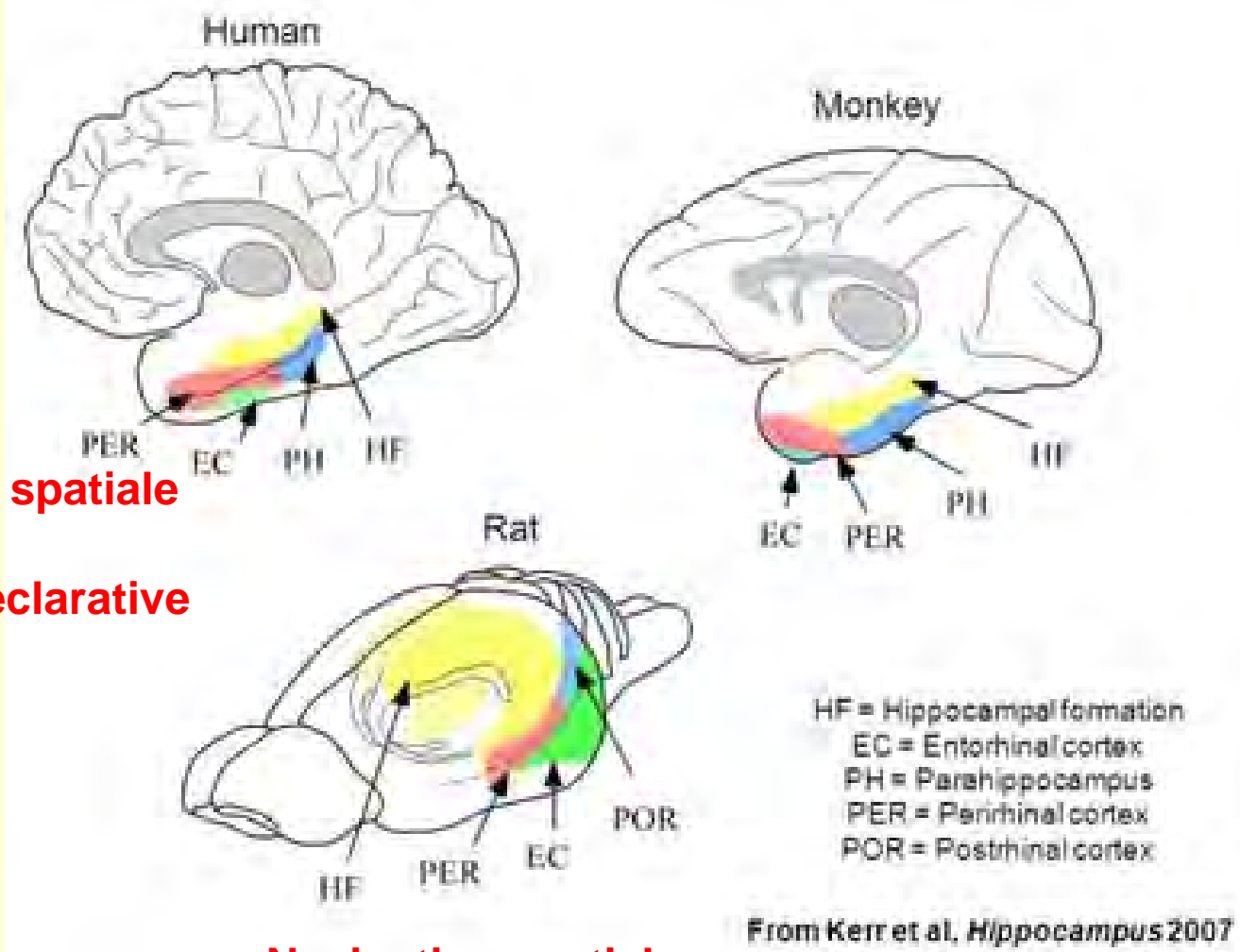
avec une approche alternative fondée sur ce qu'il appelle la « **réutilisation neuronale** »

(« neural reuse », en anglais).

Le bricolage  
de l'évolution



Navigation spatiale  
+  
Mémoire déclarative



Navigation spatiale

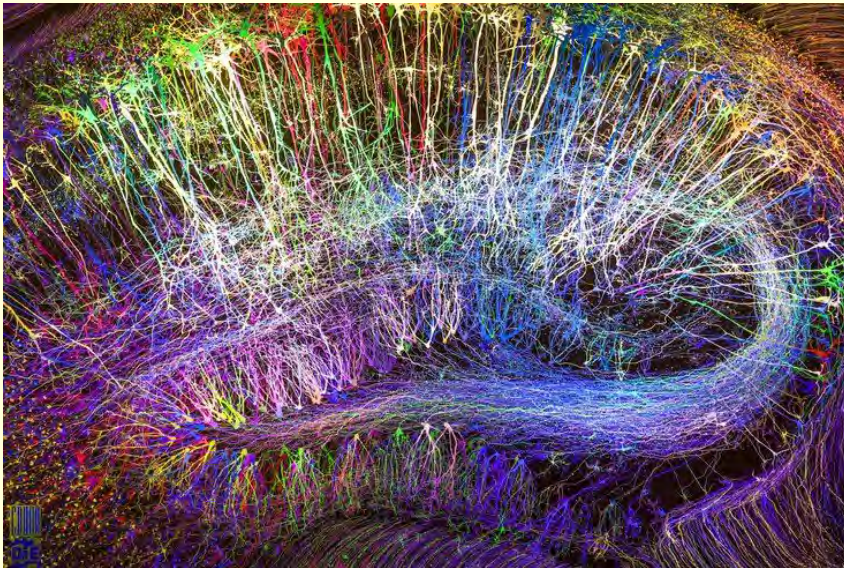
Exemple très général.

Mais Michael Anderson va plus loin...

Car s'il y a très peu de régions très spécialisées dans le cerveau

et si l'on y retrouve plutôt des structures cérébrales **différenciées** avec circuits neuronaux capables d'effectuer des calculs particuliers,

il faut que ces régions différenciées soient capable d'entrer en **collaboration** avec d'autres régions pour **former des réseaux**.



**l'hippocampe**



**cervelet.**

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

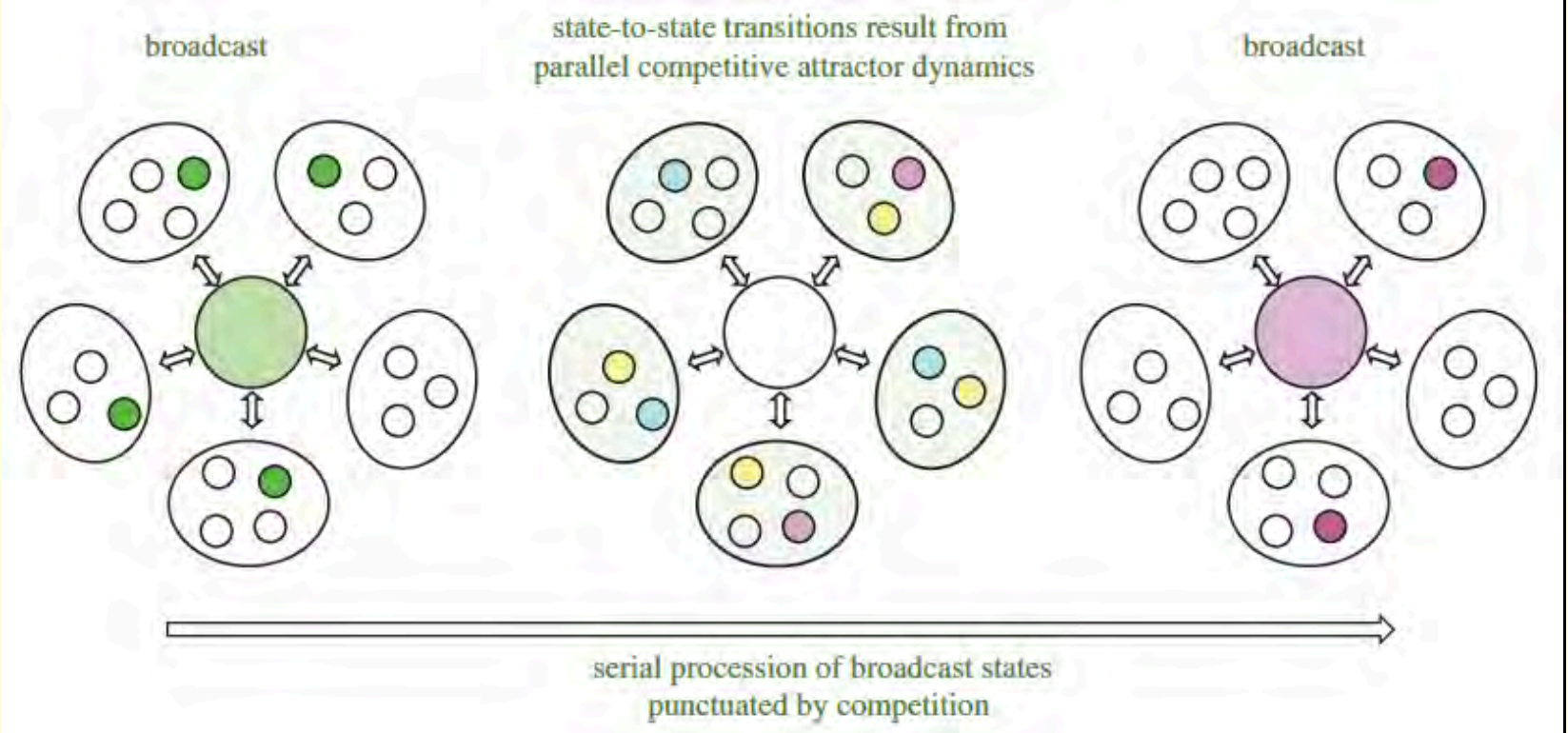
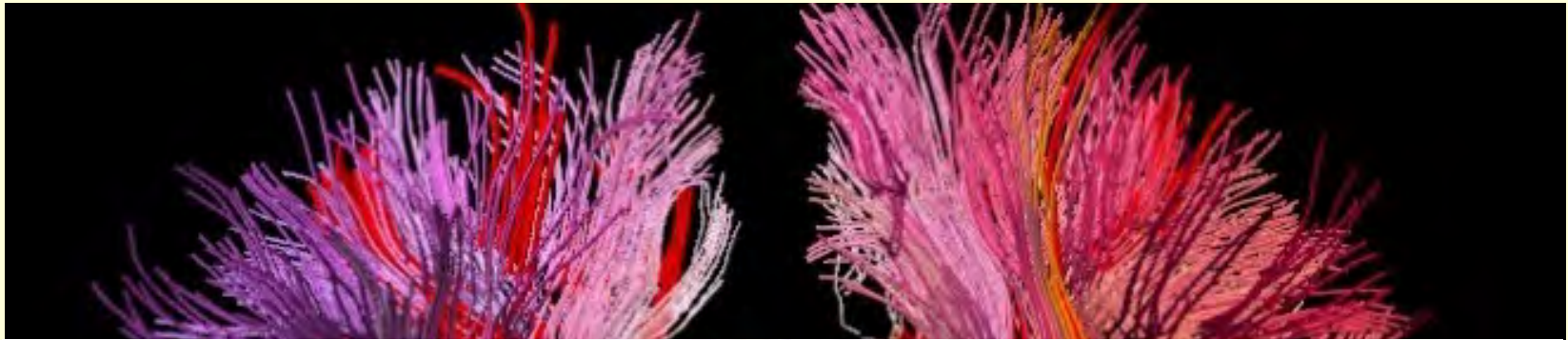
Parmi les mécanismes de recherche de coalitions, Anderson mentionne par exemple la sélection de circuits latents grâce à la **neuromodulation** qui vont permettre d'aller chercher le bon sous-ensemble de régions pour une situation donnée. [cours 7]

On pense aussi clairement ici à des phénomènes comme la **synchronisation d'activité oscillatoire** des neurones. [cours 5]



Il ne faut pas oublier 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 ne faut pas oublier 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.





# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

## **IRM de diffusion**

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

À l'échelle « macro » :

# Human Connectome Project

(<http://www.humanconnectomeproject.org/>)

Projet initié en **2010** qui aspire à cartographier le connectome humain en utilisant **plusieurs techniques**:

Diffusion-spectrum imaging (DSI)

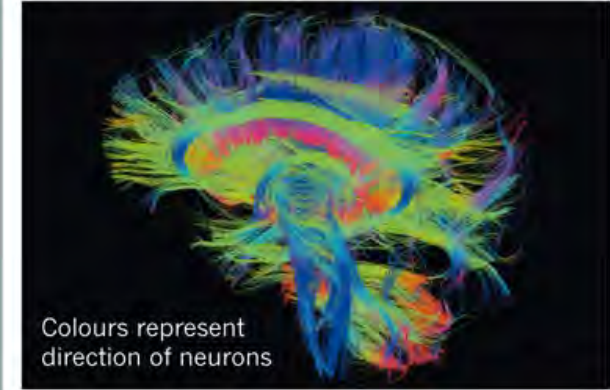
Resting-state functional MRI (rs-fMRI)

## SCANNING THE CONNECTOME

The Human Connectome Project aims to trace the brain's neural network using advanced imaging techniques, both of which rely on magnetic resonance imaging (MRI).

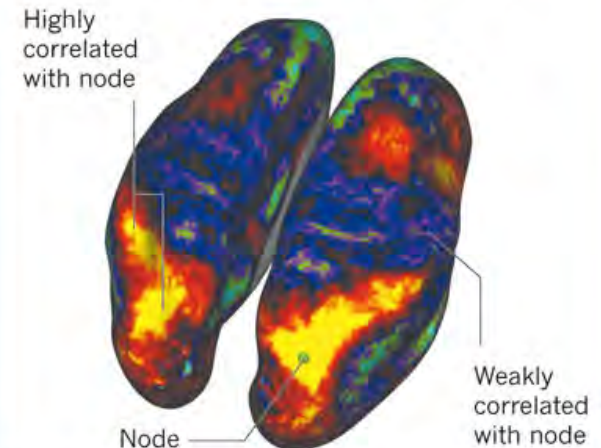
### Mapping structure

Diffusion spectrum imaging detects the movement of water molecules that flow along nerve fibres in the brain. The result is a map of the brain's neuronal network.



### Mapping function

Resting-state functional MRI maps resting brain activity, then looks for correlations between one area and another. Highly correlated areas are thought to have some kind of functional link.



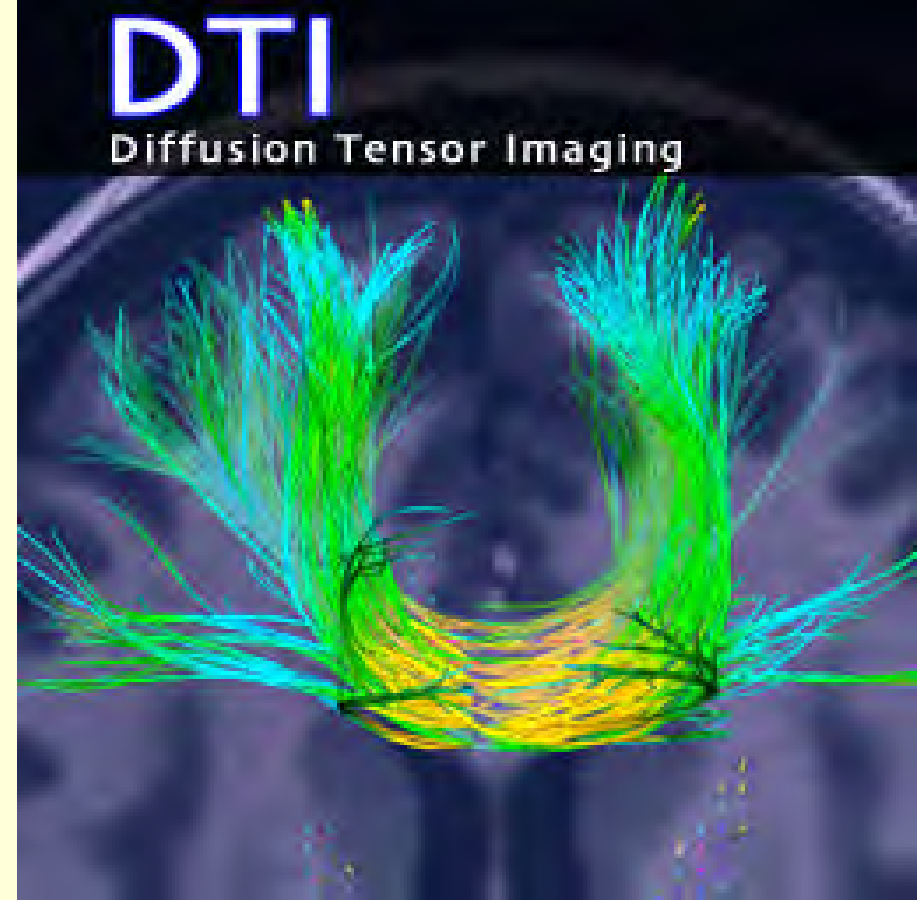
# L'IRM de diffusion

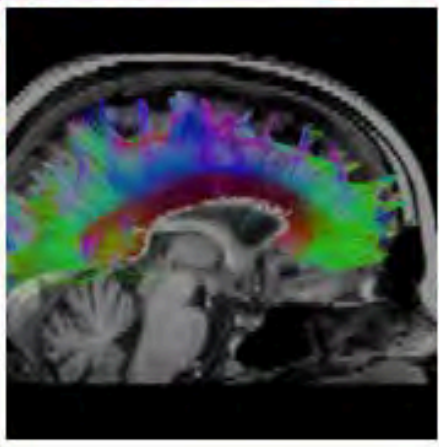
## Diffusion Tensor Imaging (DTI)

Variantes :

**diffusion weighted imaging (DWI)**

**diffusion spectrum imaging (DSI)**



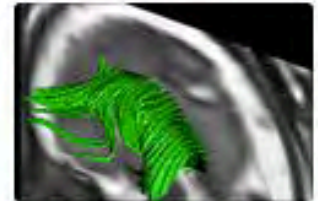


## Diffusion Imaging

13 likes

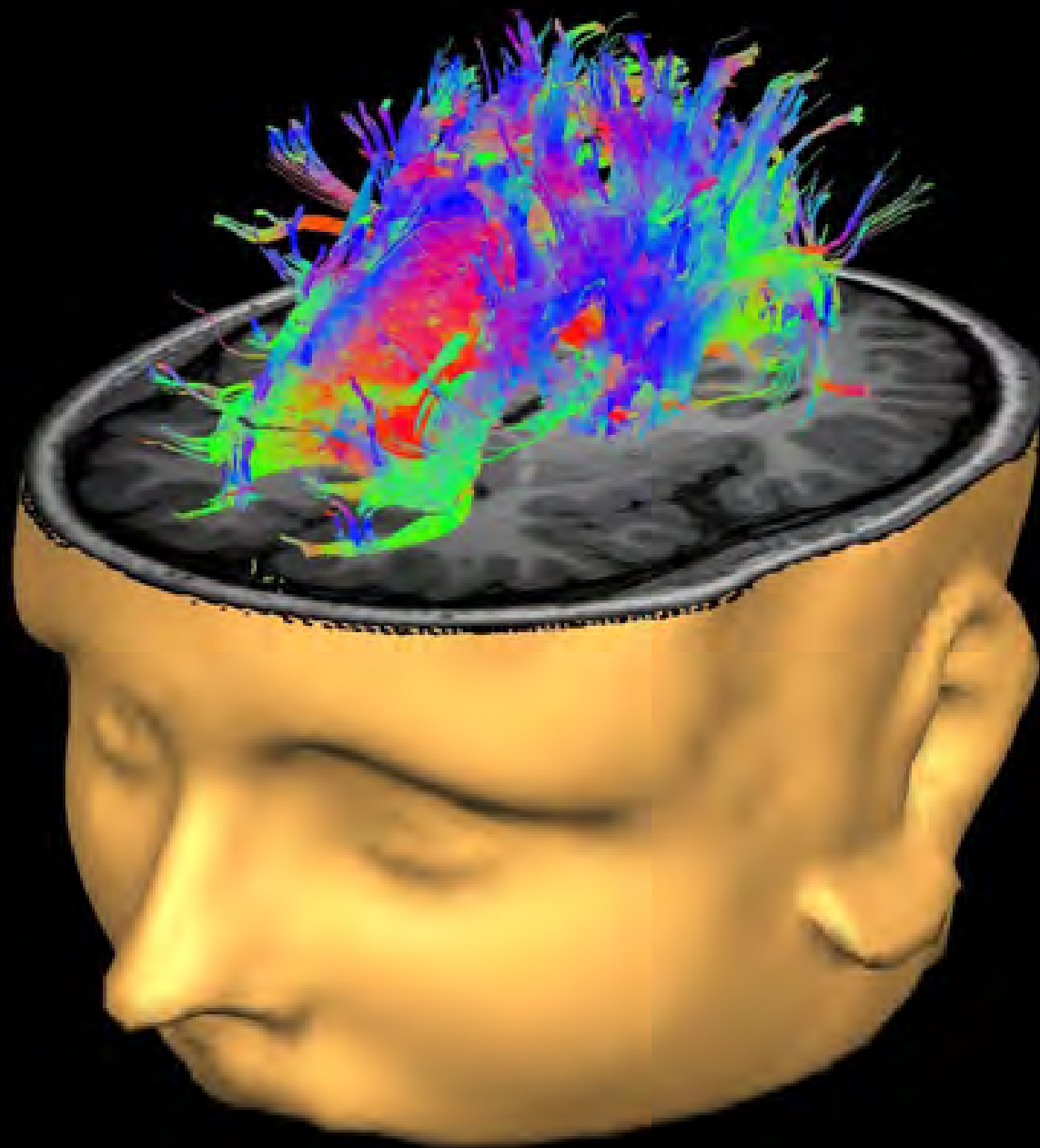
### Community [?]

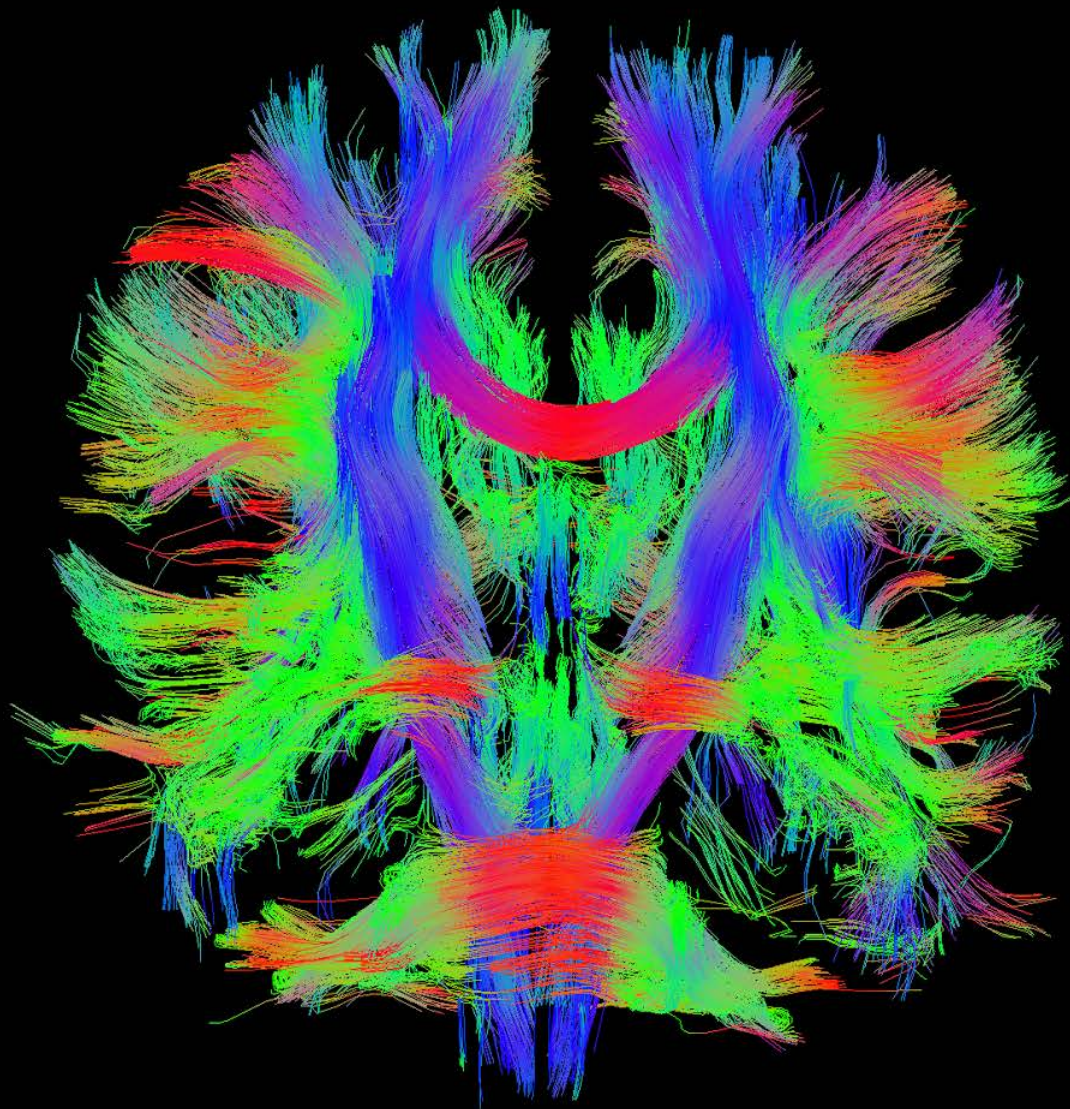
Diffusion Tensor Imaging is a cutting edge imaging technique that provides quantitative information with which to visualize and study connectivity and continuity of neural pathways in the central and peripheral nervous systems in vivo (Basser et al. 2000)



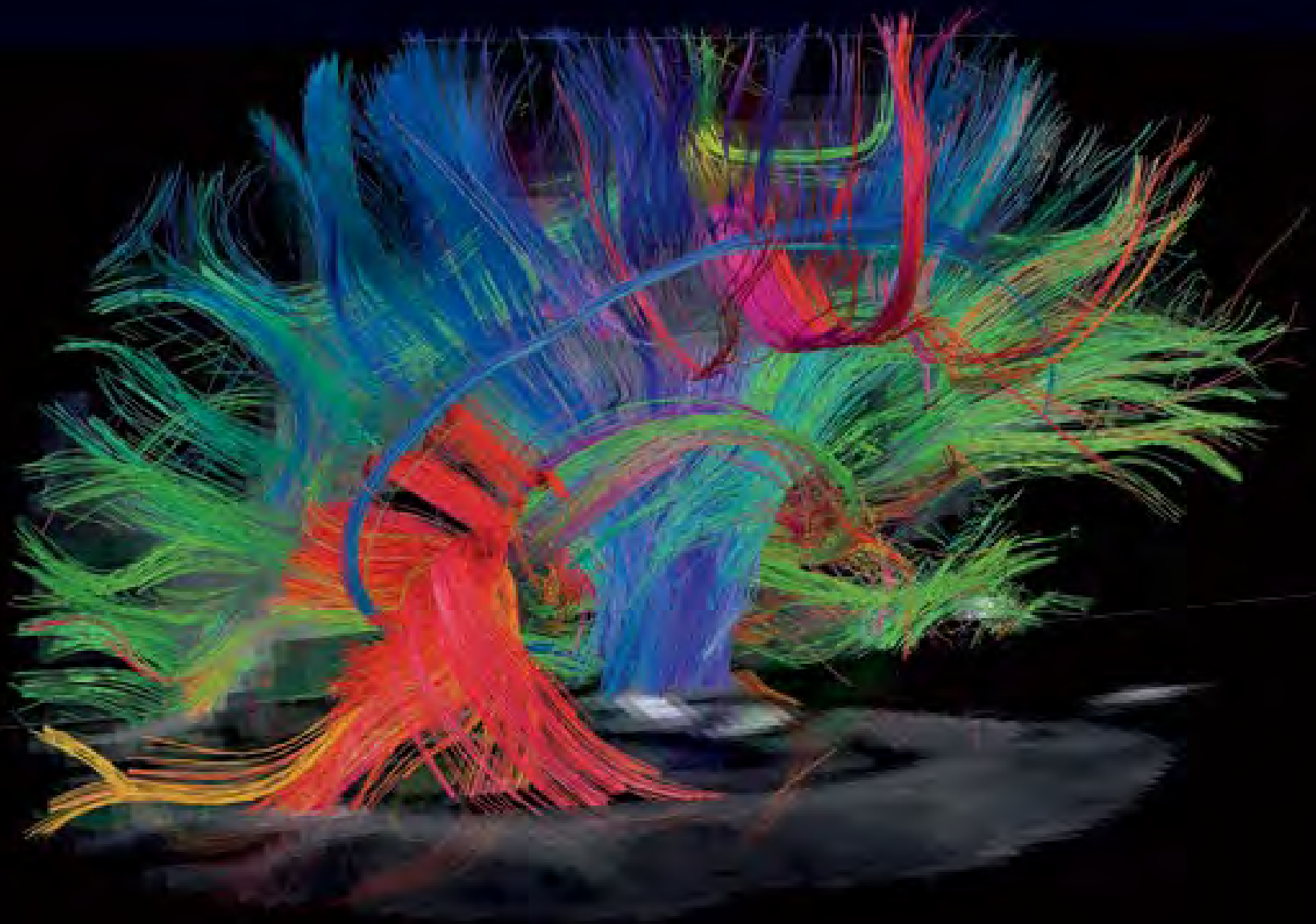
- Premières images : **1985**
- Méthode **non invasive** qui permet de visualiser les grandes connections entre différentes parties du cerveau sur une base individuelle
- Applications cliniques, en particulier pour visualiser les voies nerveuses lésées par des ACVs ou des pathologies impliquant la matière blanche.

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

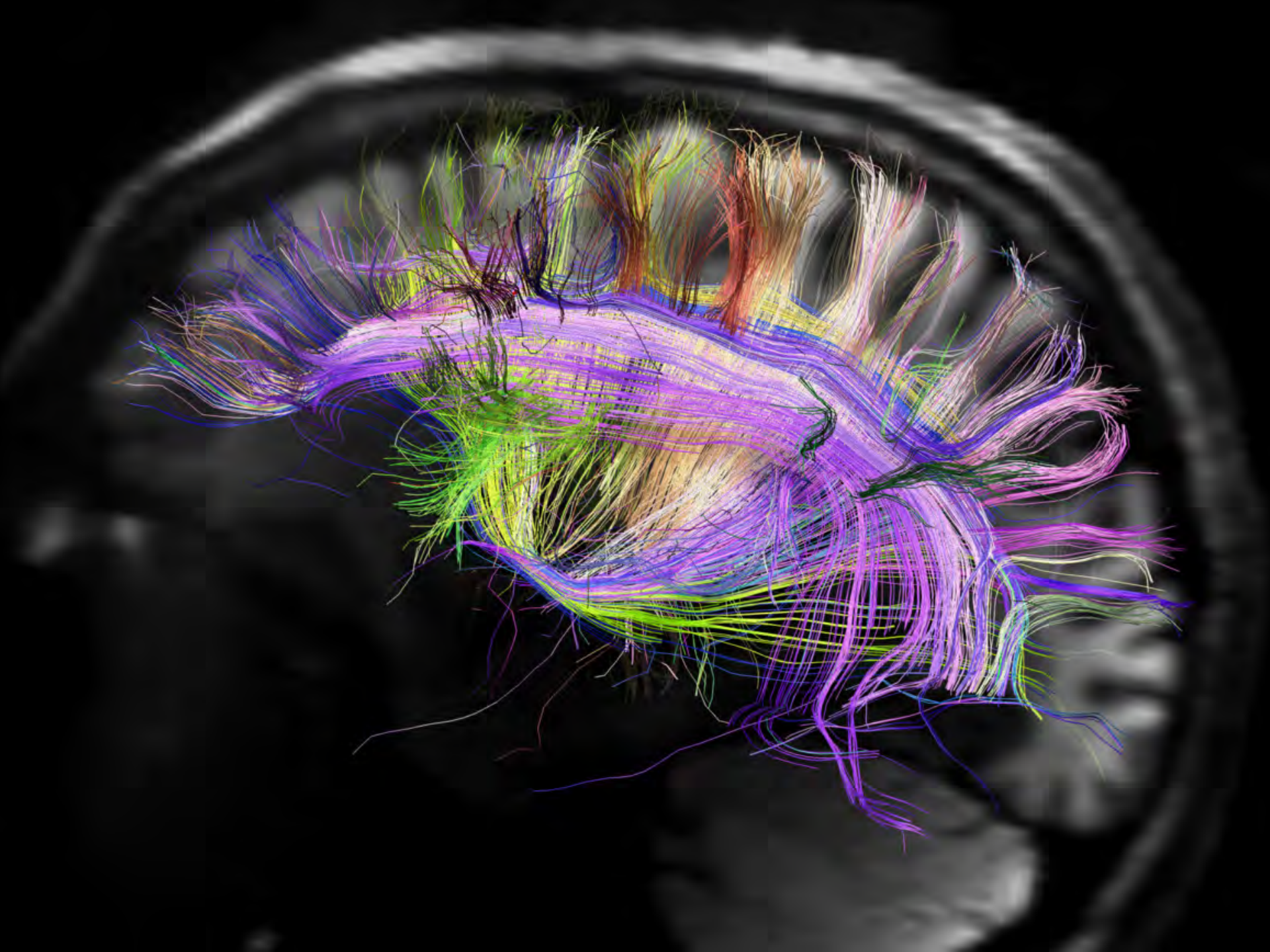




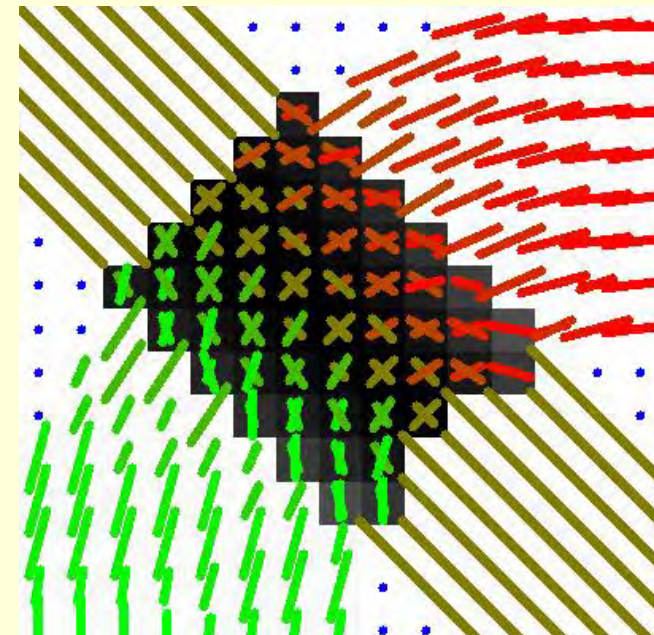
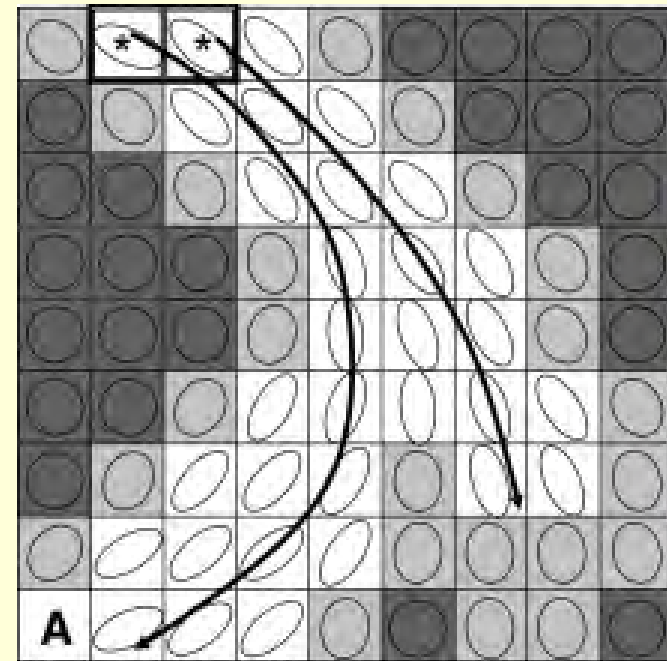








# Principe à la base de l'imagerie de diffusion



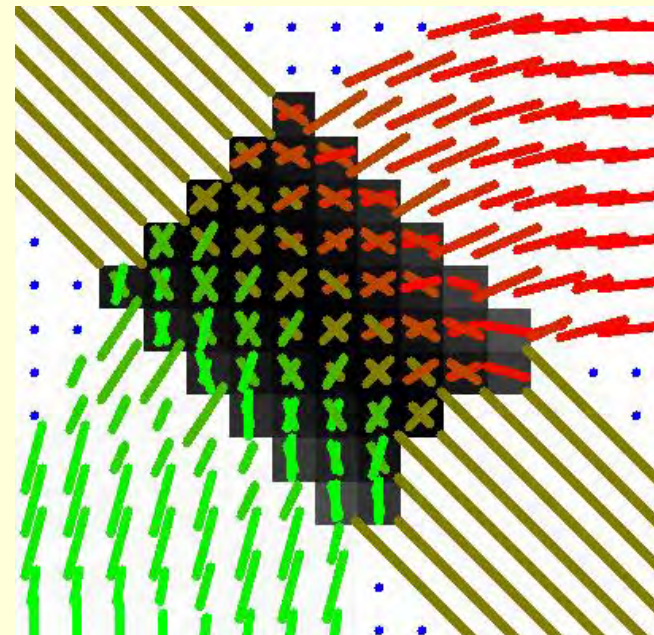
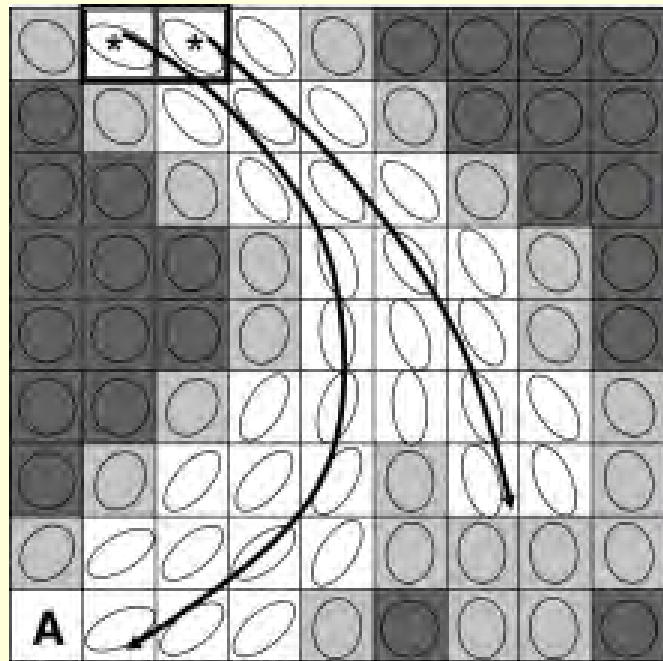
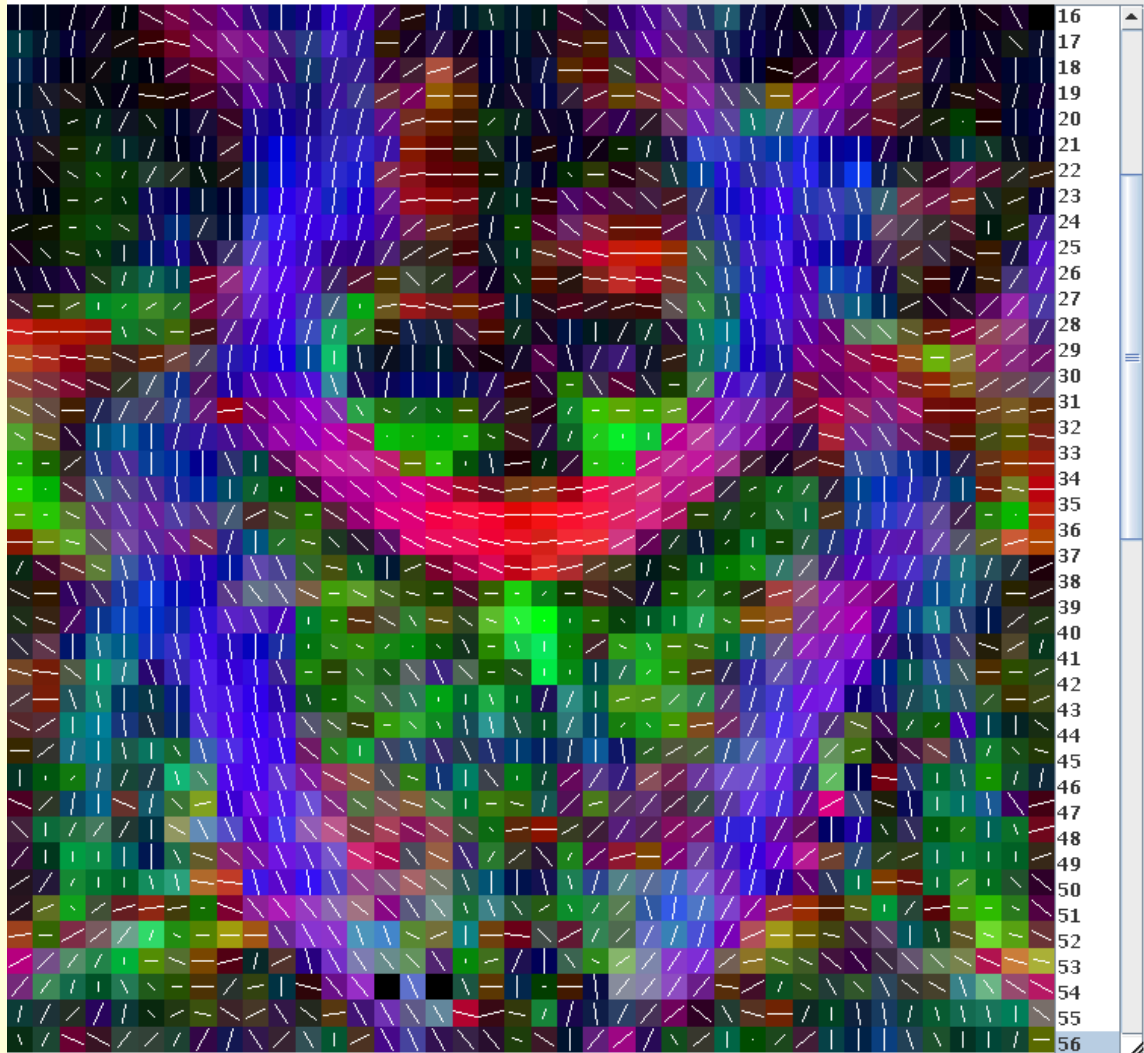
PD Orientation Viewer

AXIAL CORONAL SAGITTAL SAVE RGB

Show vectors Zoom

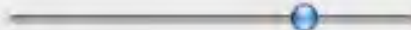
74 56 37  
-0.293338 0.759015 0.581248 (0.135361)

Grey gamma 0.7  
RGB gamma 1.0



Show vectors

Zoom



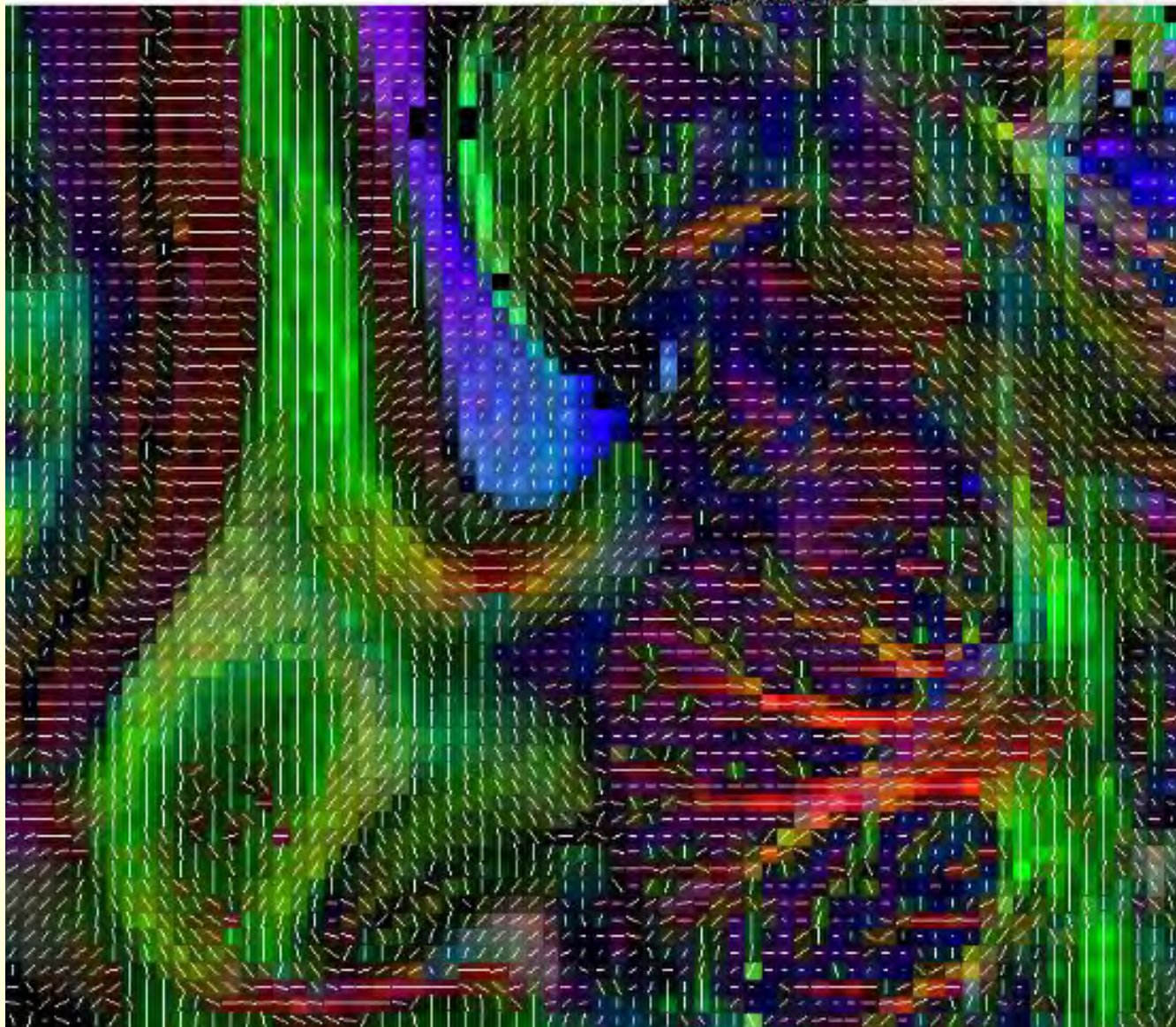
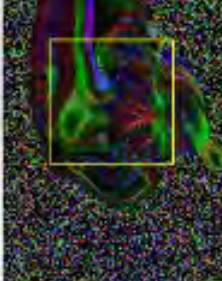
RGB gamma



1.0

96 137 0

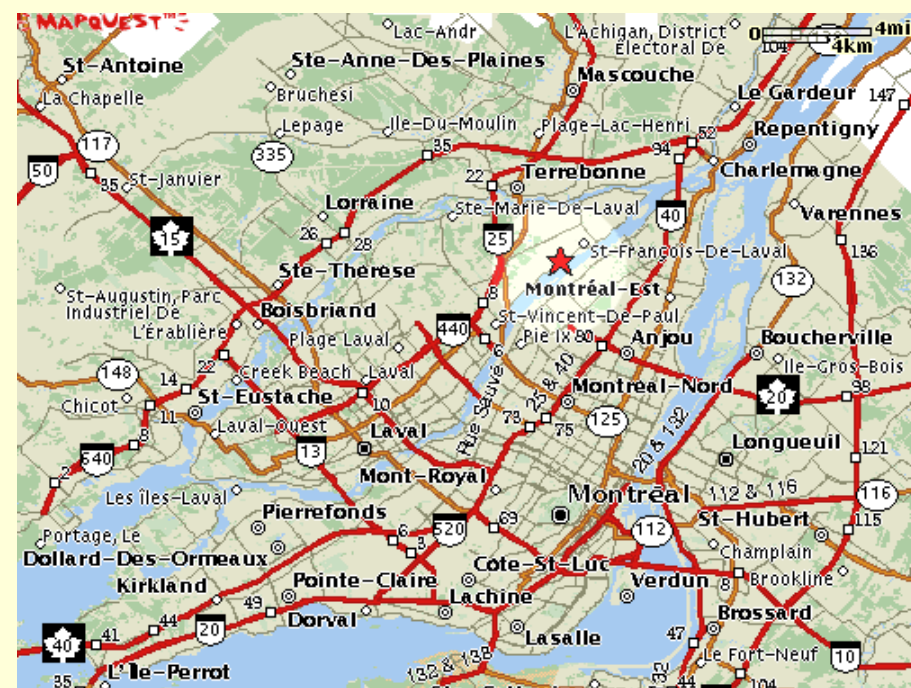
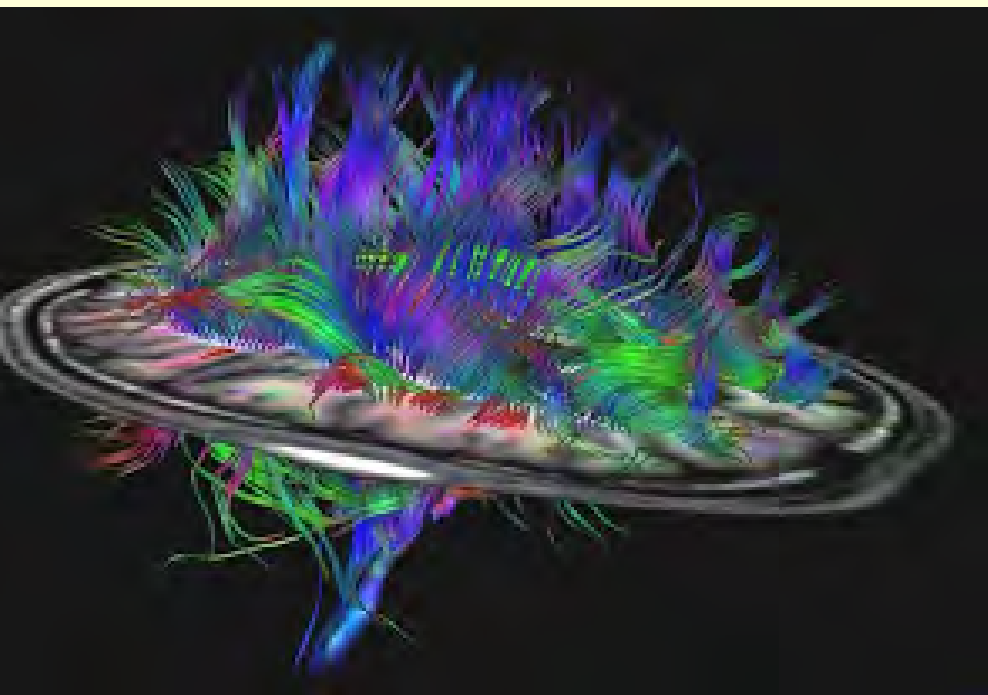
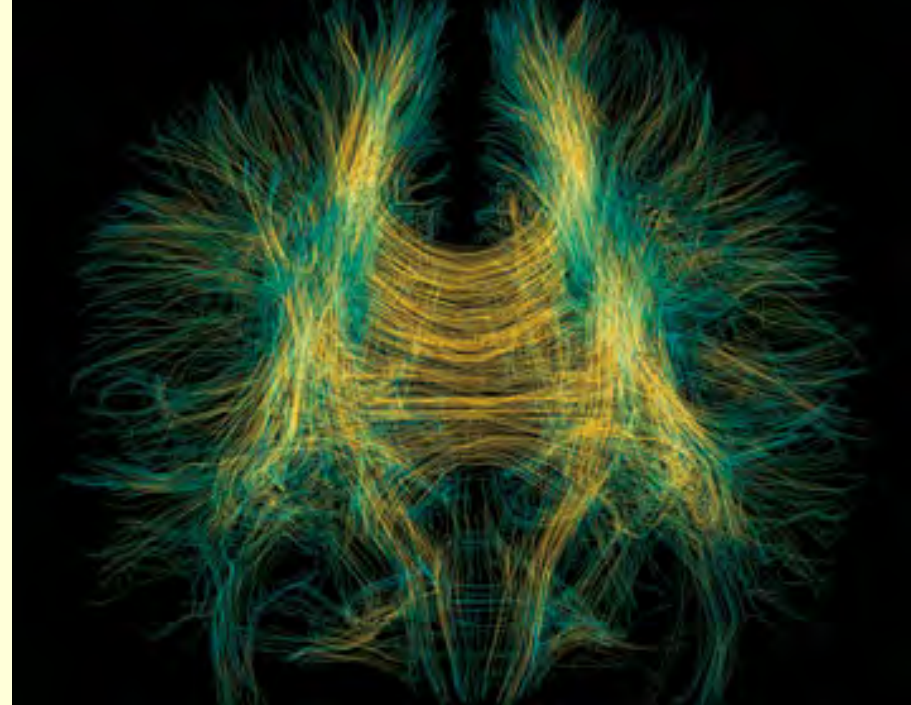
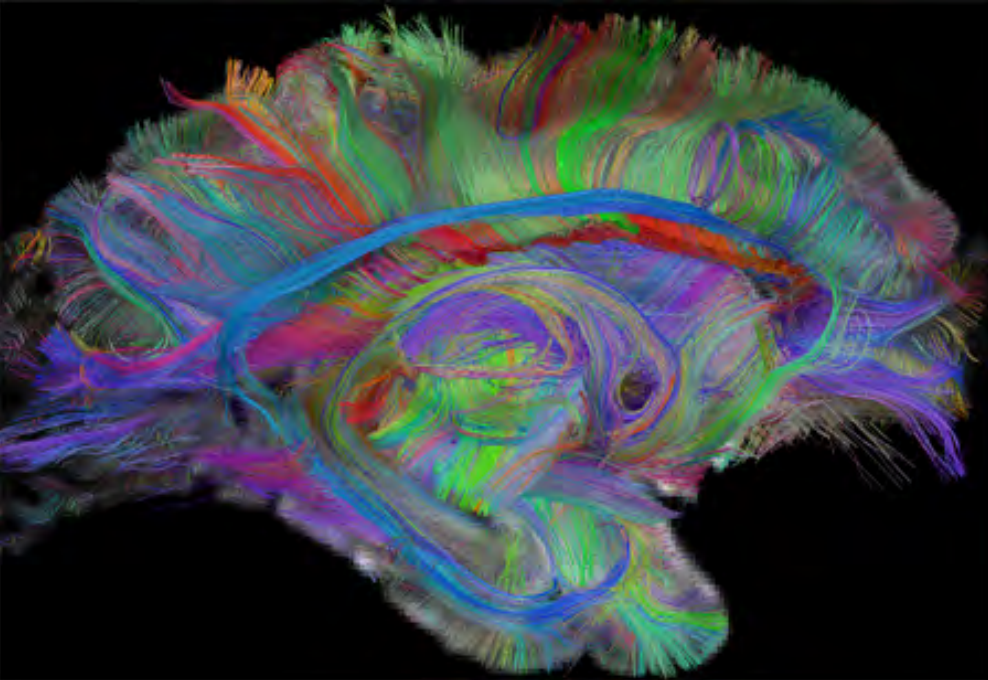
0.704768 0.176565 -0.687114 (0.000000)



- 0
- 1
- 2



Courtesy of VJ Wedeen and LL Wald, Martinos Center, Harvard Medical School, Human Connectome Project



# 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.

[...] – an intricate, multi-layered grid of cross-hatched neural highways. What’s more, it looks like **our brains share this grid pattern with many other species.**”

<http://www.massgeneral.org/about/pressrelease.aspx?id=1447>



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

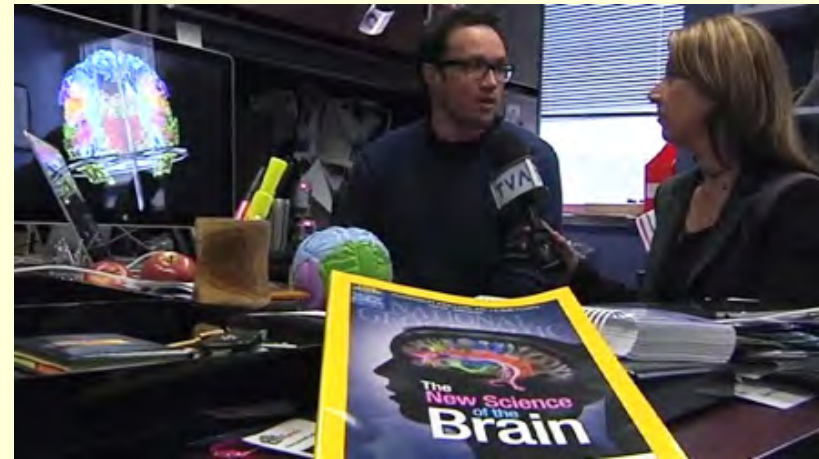
27 janvier **2014**

<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 ]

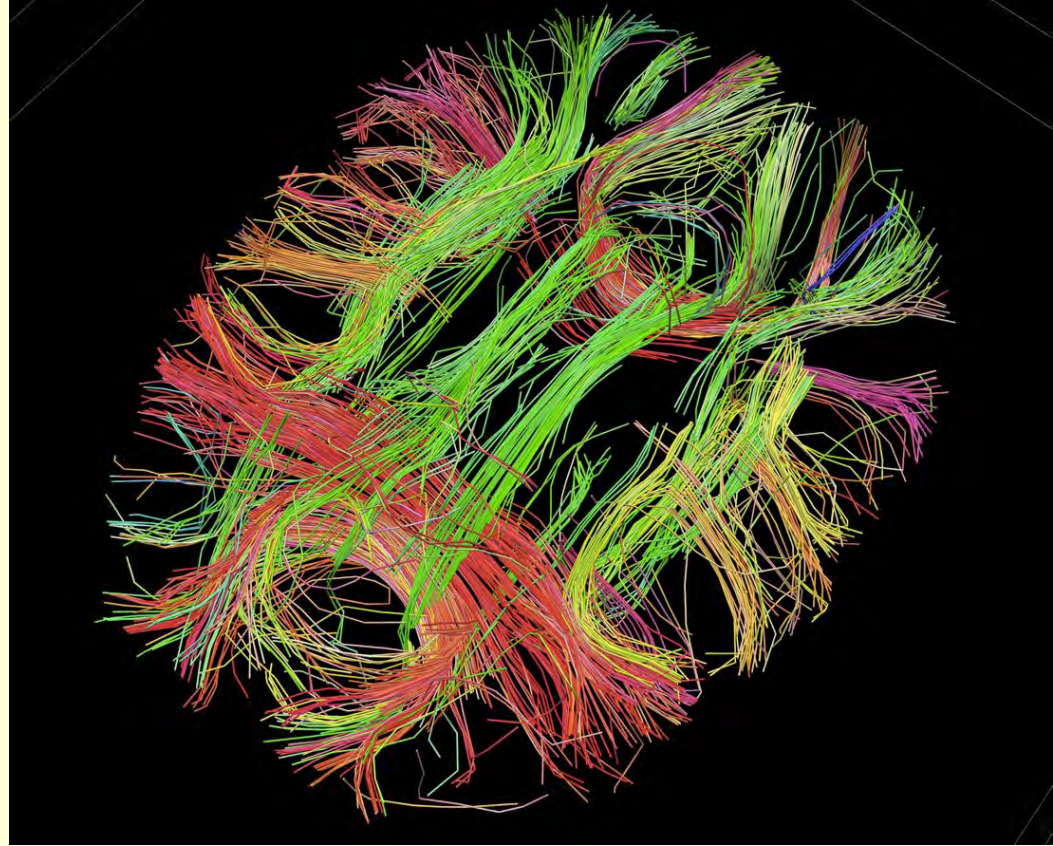
**Sherbrooke Connectivity Imaging Lab > Videos**  
[http://scil.dinf.usherbrooke.ca/?page\\_id=468&lang=en](http://scil.dinf.usherbrooke.ca/?page_id=468&lang=en)



Maxime Descôteaux et David Fortin



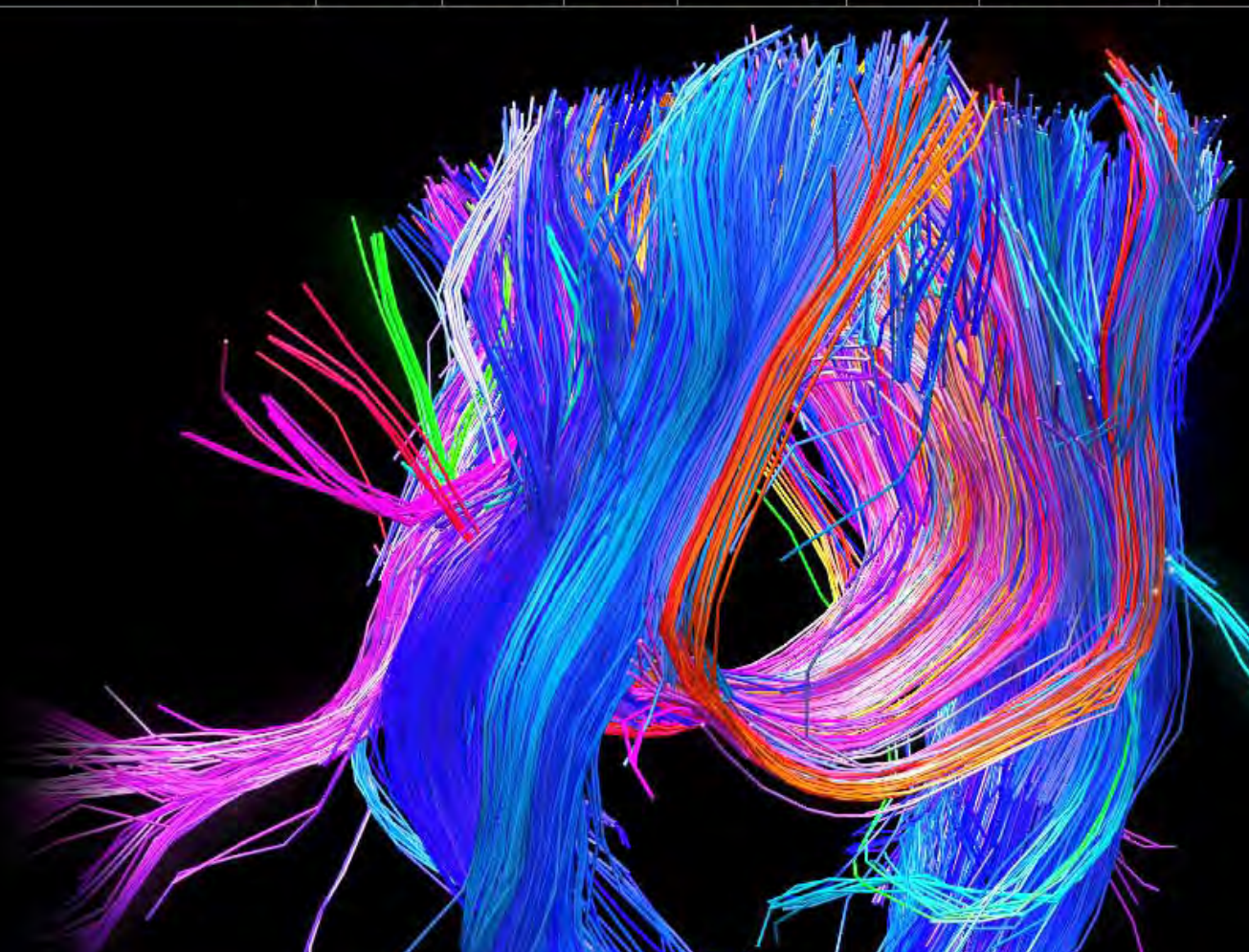
**Limite / critique**  
à l'IRM de diffusion :



**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. »***

# Human Connectome Project

[Home](#)[About](#)[Data](#)[Informatics](#)[Gallery](#)[Publications](#)[News](#)

## The Human Connectome Project

Navigate the brain in a way that was never before possible; fly through major brain pathways, compare essential circuits, zoom into a region to explore the cells that comprise it, and the functions that depend on it.

The Human Connectome Project aims to provide an unparalleled compilation of neural data, an interface to graphically navigate this data and the opportunity to achieve never before realized conclusions about the living human brain.

[Download Data](#)

*Laboratory of Neuro Imaging*

## News

[RSS News](#)

**National Geographic features the Human Connectome Project**

New research from members of our HCP team suggests that brain circuitry is organized more like Manhattan's street grid than London's chaotic tangle of random roadways. Read the full article in the February 2014 issue of National Geographic.



## Diffusion-spectrum imaging (DSI)

## Resting-state functional MRI (rs-fMRI),

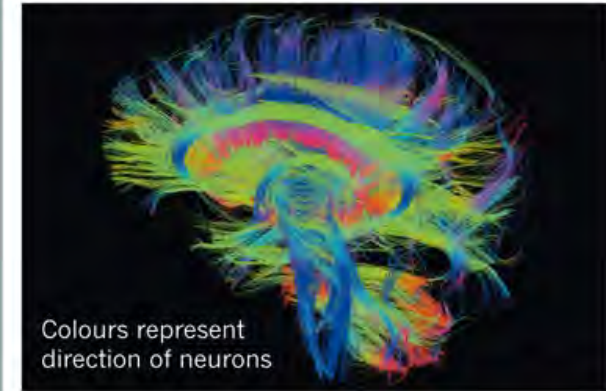
La connectivité fonctionnelle (fcMRI).

## SCANNING THE CONNECTOME

The Human Connectome Project aims to trace the brain's neural network using advanced imaging techniques, both of which rely on magnetic resonance imaging.

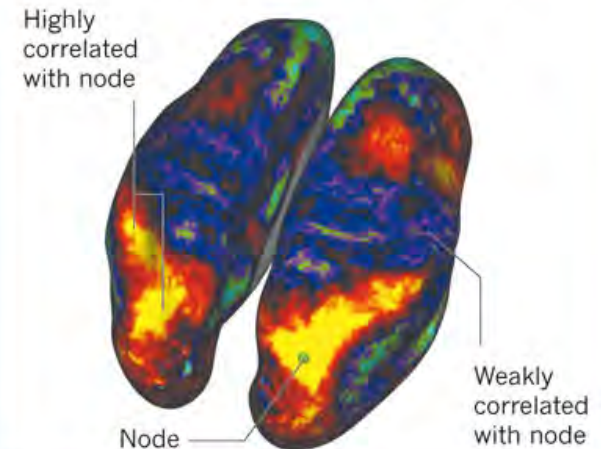
### Mapping structure

Diffusion spectrum imaging detects the movement of water molecules that flow along nerve fibres in the brain. The result is a map of the brain's neuronal network.



### Mapping function

Resting-state functional MRI maps resting brain activity, then looks for correlations between one area and another. Highly correlated areas are thought to have some kind of functional link.



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

**IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)**

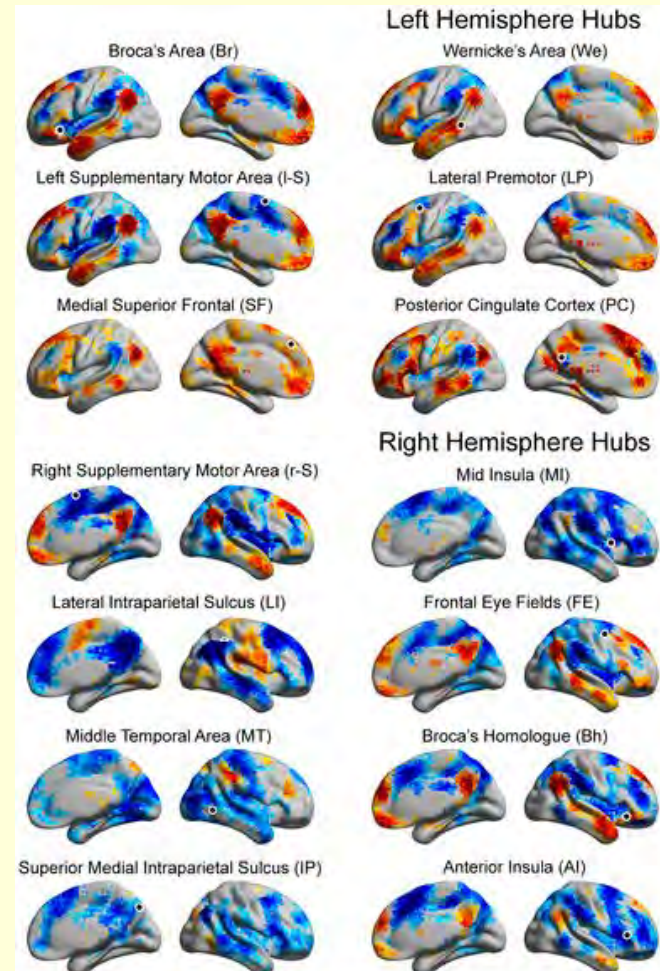
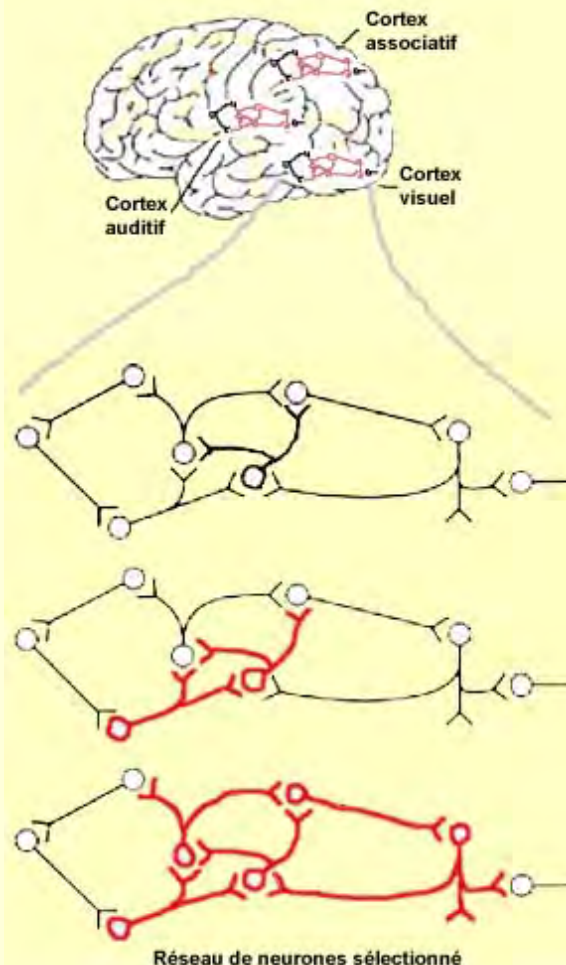
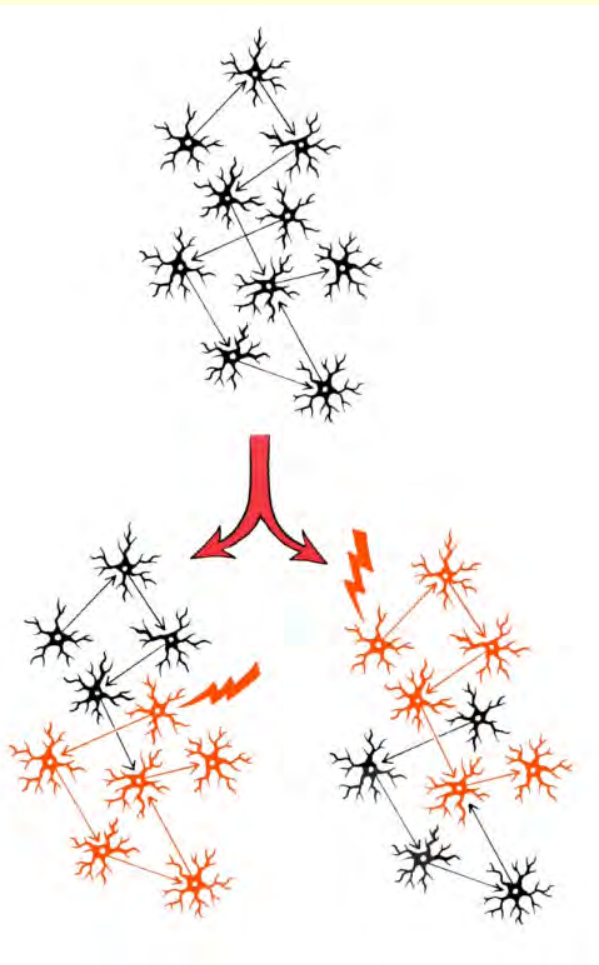
L'exemple du réseau du monde par défaut

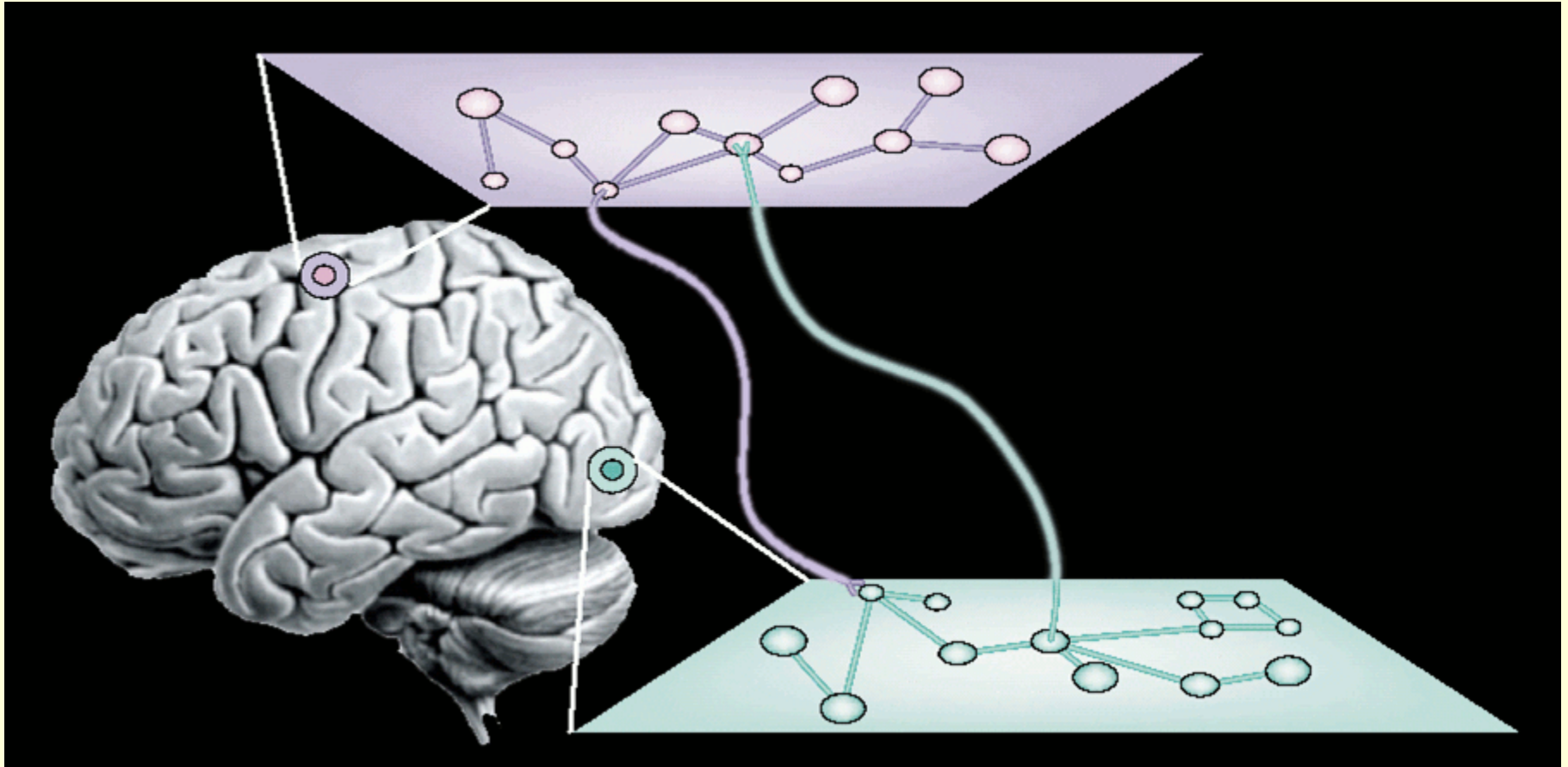
Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

Rappelons que les oscillations et les synchronisations d'activité peuvent donc contribuer à la formation **d'assemblées de neurones transitoires** qui se produisent non seulement dans certaines structures cérébrales, mais dans des réseaux largement distribués à l'échelle du cerveau entier.





Tirée de Pierre Bellec

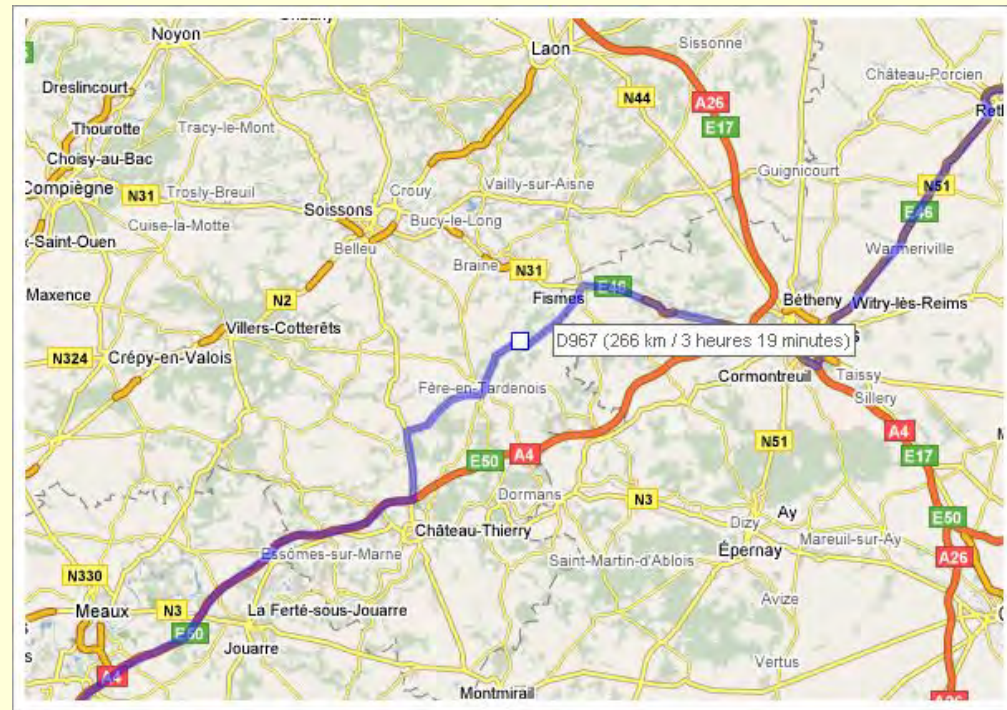
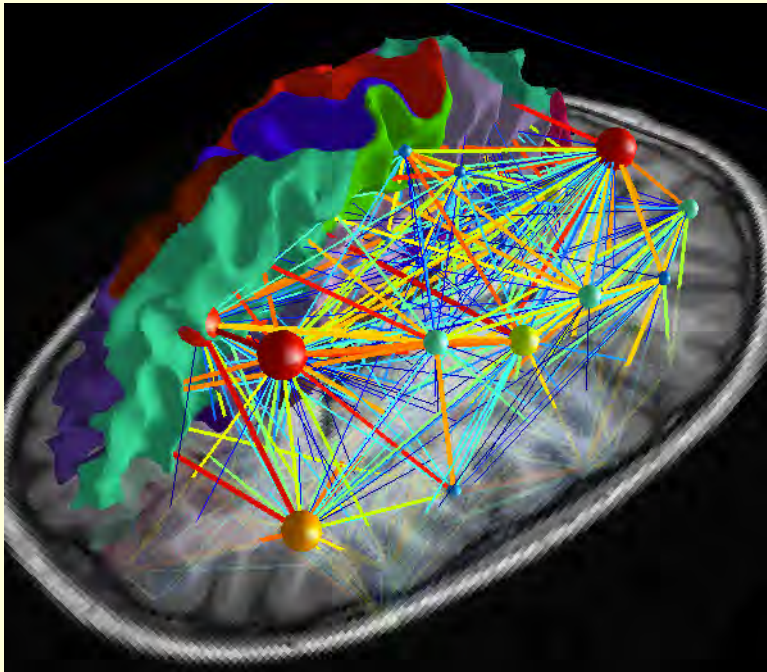
[https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwir7vTM45rLahXJ2D4KHf0cAG8QFgg4MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.bic.mni.mcgill.ca%2Fusers%2Fpbellec%2Fdata%2Freview\\_lsni.pdf&usg=AFQjCNGBiKg\\_wv2IF4Dtll0Avlsu1E\\_A&sig2=ty0vWUO22VVjepAAr\\_hCbw&cad=rja](https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwir7vTM45rLahXJ2D4KHf0cAG8QFgg4MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.bic.mni.mcgill.ca%2Fusers%2Fpbellec%2Fdata%2Freview_lsni.pdf&usg=AFQjCNGBiKg_wv2IF4Dtll0Avlsu1E_A&sig2=ty0vWUO22VVjepAAr_hCbw&cad=rja)

(Figure adaptée de Varela et al 2001, Nature Reviews Neuroscience, 2, 229-239)

# Établir 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 »),

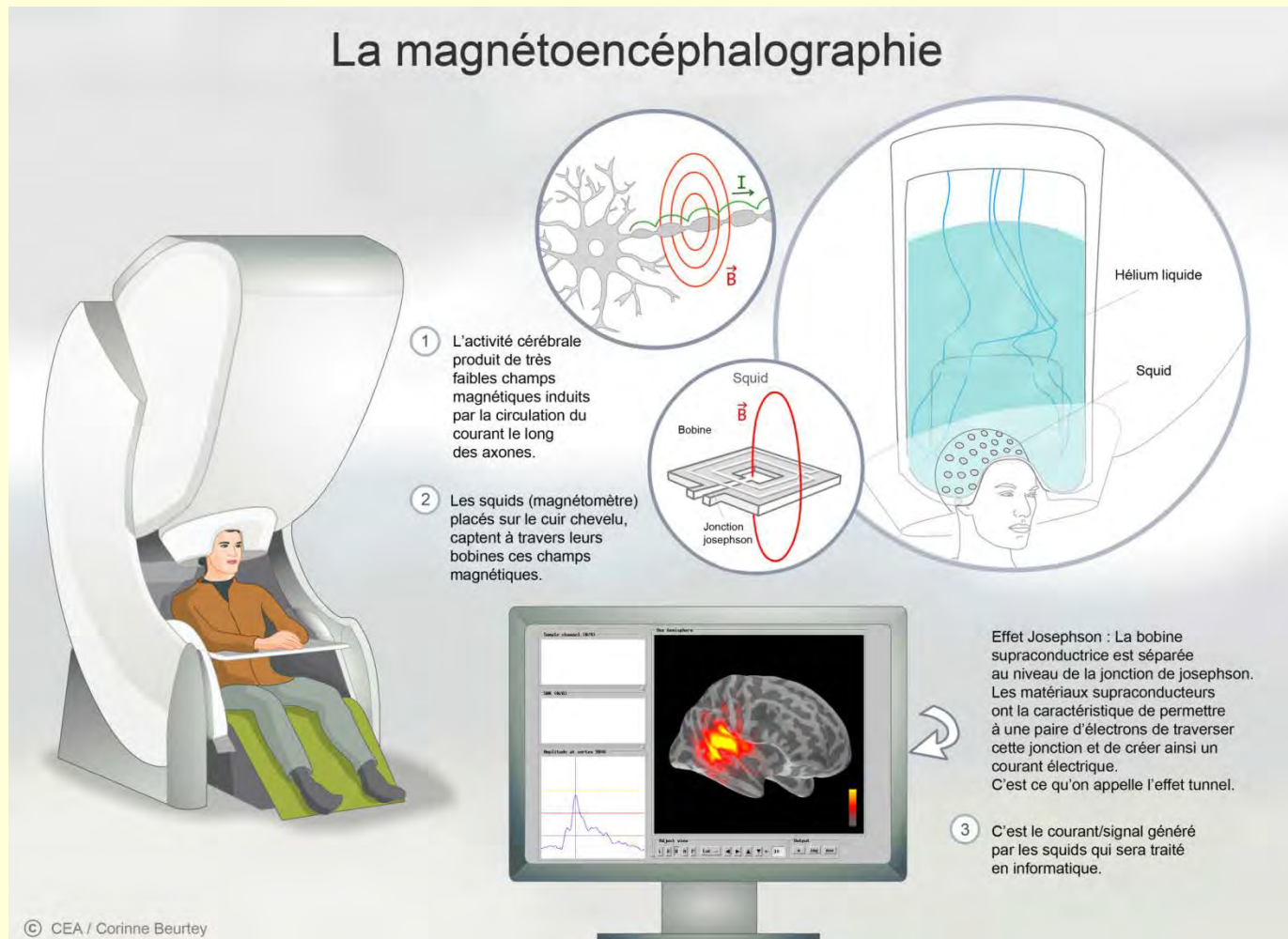
on tente d'identifier des régions qui fluctuent au même rythme et en phase et qui ont ainsi naturellement tendance à « **travailler ensemble** ».



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

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

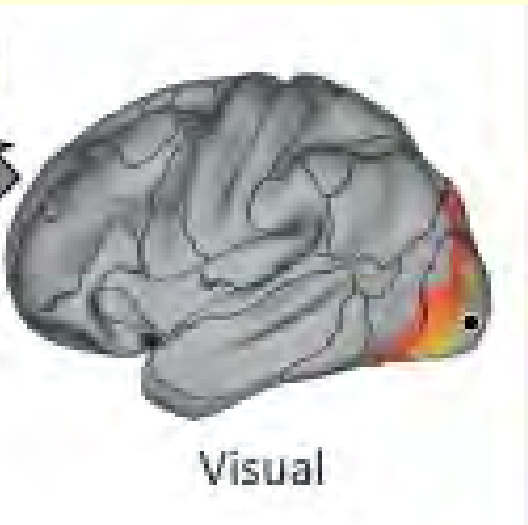
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3224862/>





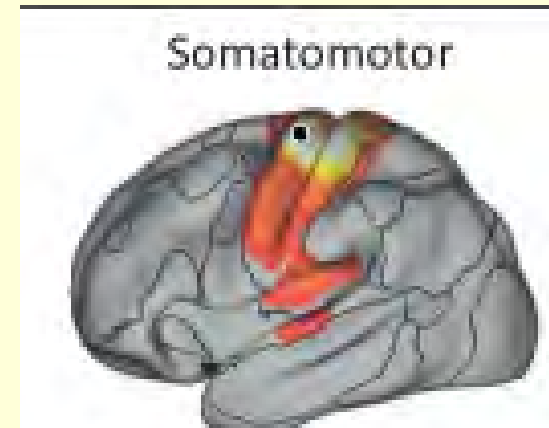
## fc-IRM :

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



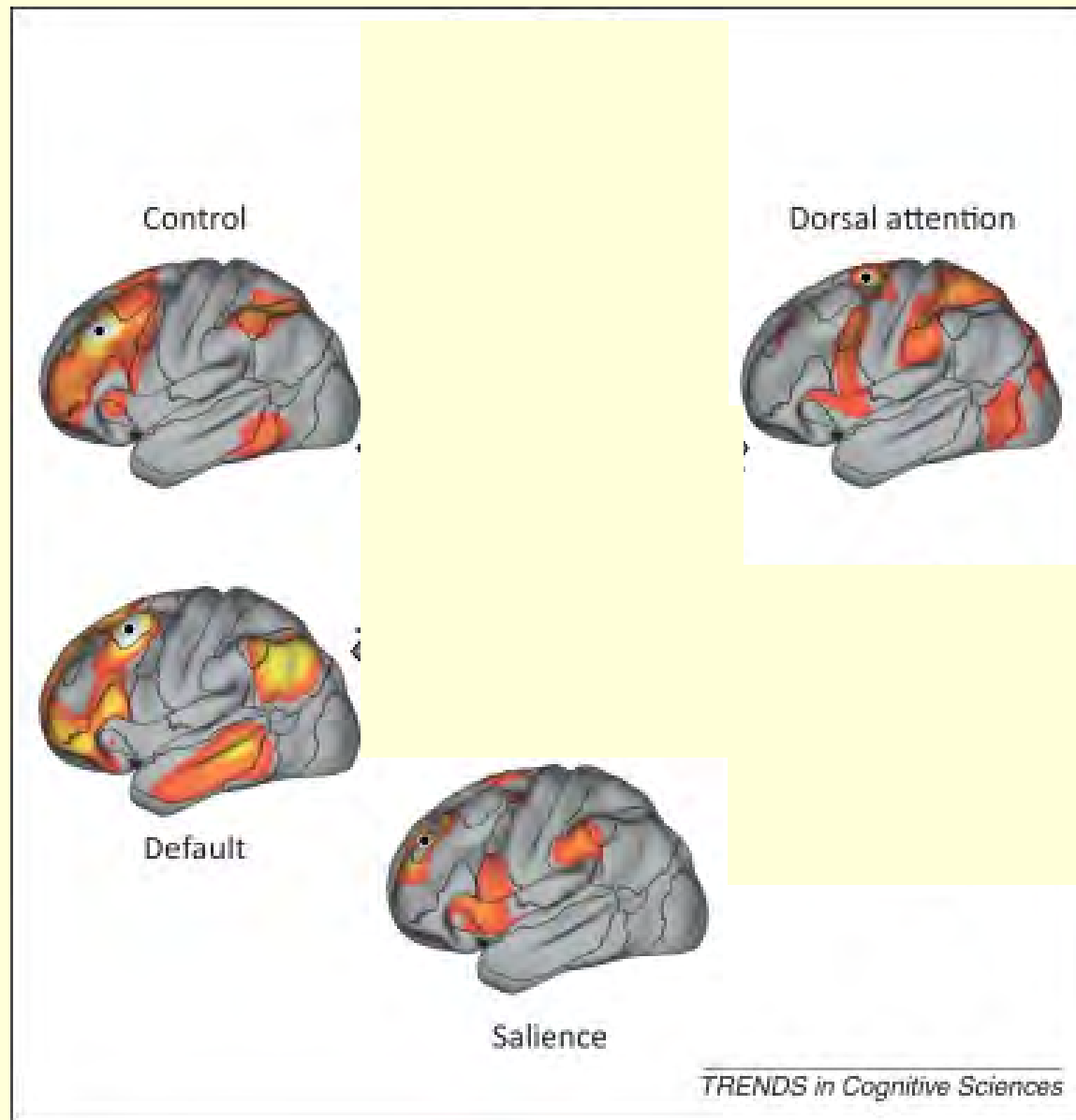
Si la « région semence » est placée dans les zones sensorielles et motrices **primaires**,

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**.

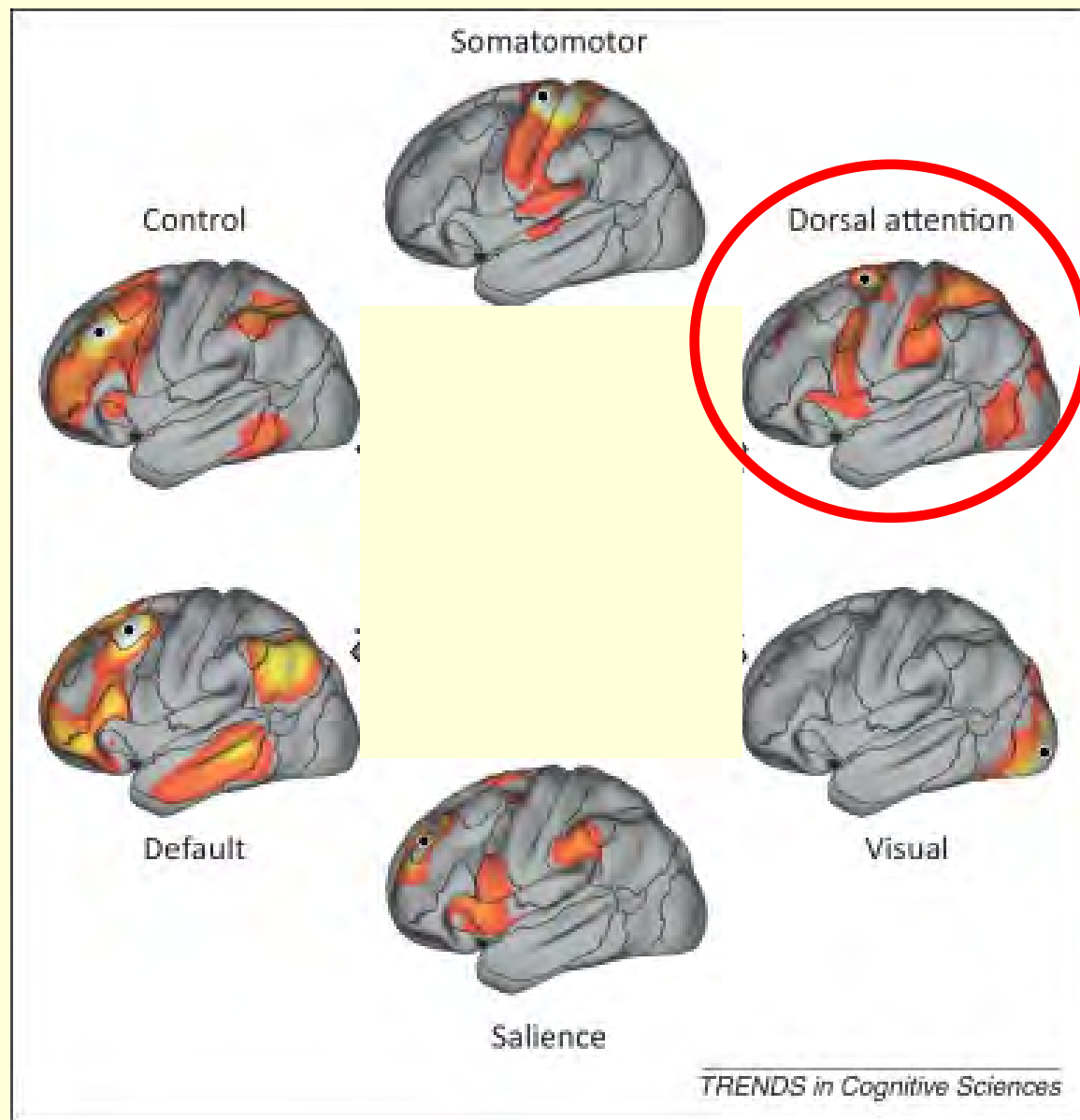
- Ceux-ci possèdent **peu de couplages forts dans les zones sensorielles ou motrices**.
- Ils sont aussi actifs durant des **processus cognitifs de haut niveau**.



**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**

À l'approche classique d'IRMf où les sujets effectuent une tâche cognitive et où les zones colorées indiquent les régions où le signal BOLD augmente,

on a donc maintenant une autre approche avec la fcMRI où les sujets ne font aucune tâche cognitive et où les régions colorées montrent des régions avec des **fluctuations lentes synchrones (ou cohérentes) du signal BOLD.**



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

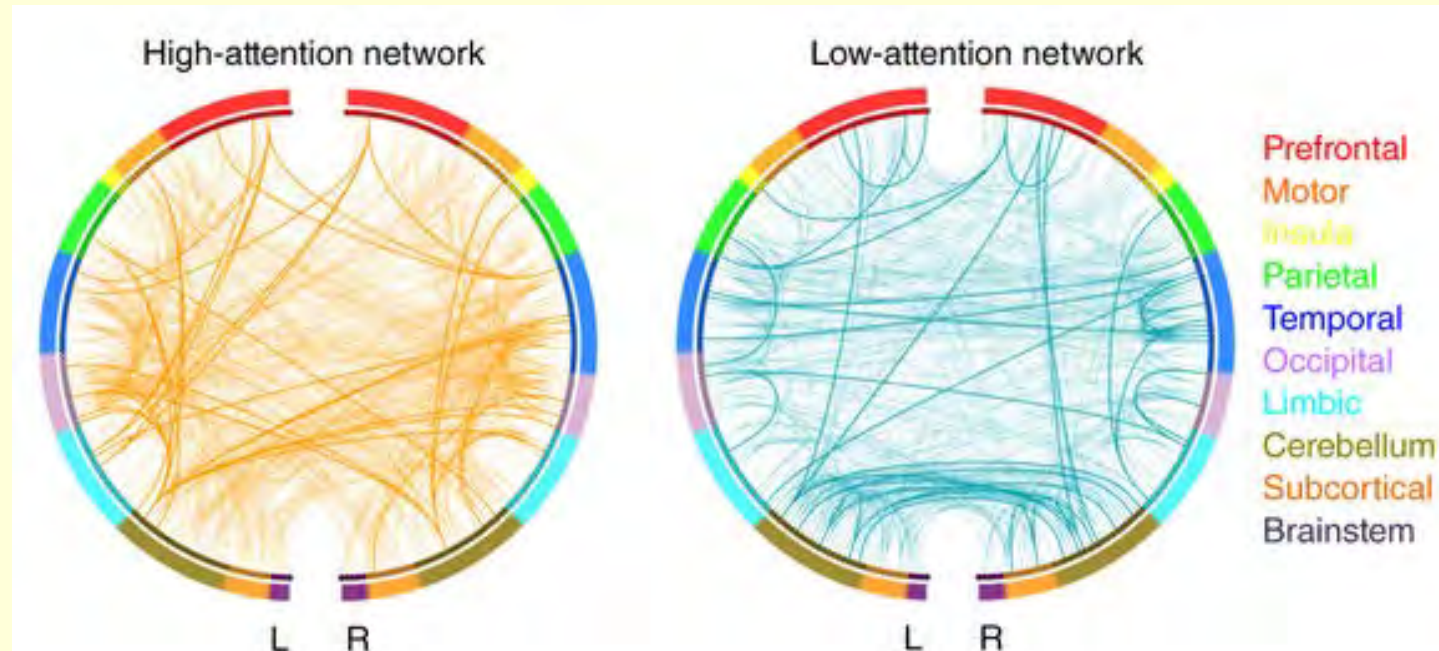
<http://www.ajnr.org/content/21/9/1636.full>

**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**

# 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>



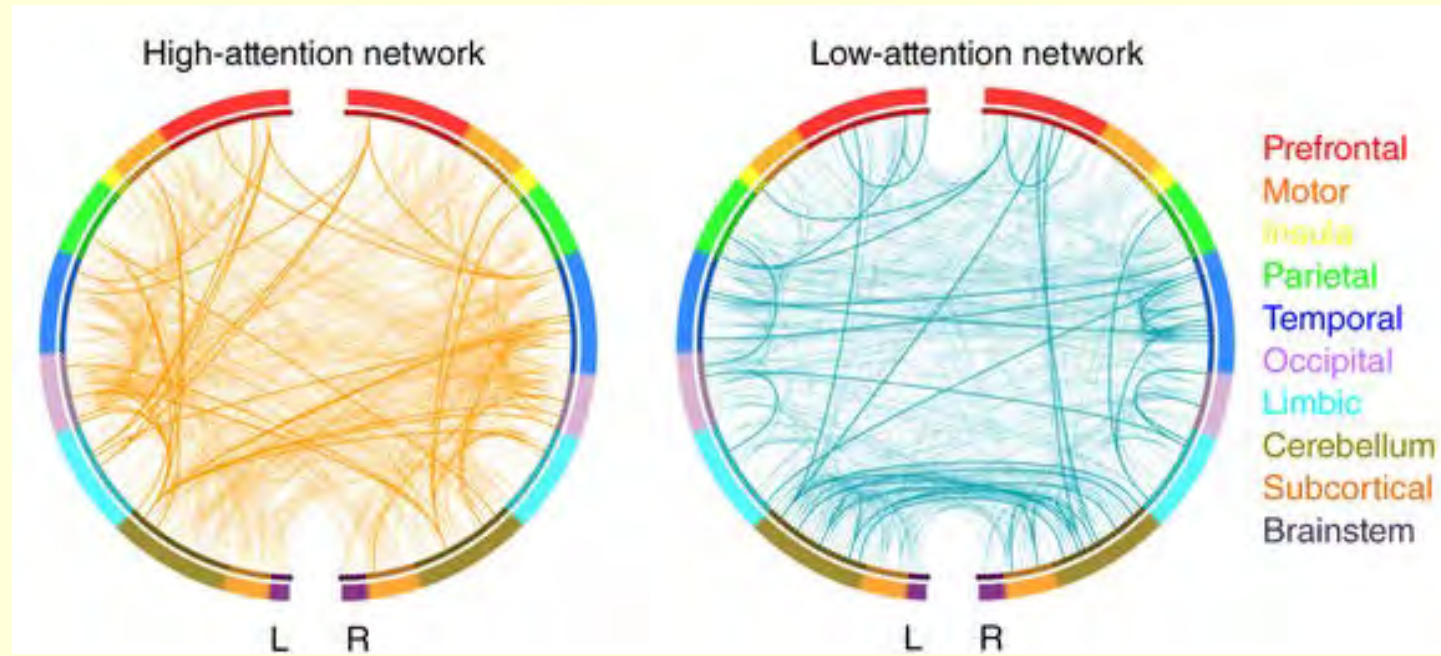
**Des modèles construits à partir des patterns de connectivité de cerveau d'individus plus ou moins bons pour soutenir leur attention permettent de prédire les capacités attentionnelles d'un nouvel individu.**

Exemple : on analyse le pattern de connectivité fonctionnelle de votre cerveau (quelles régions ont tendance à « travailler ensemble »), et l'on peut vous dire à quel point vous allez être capable de soutenir votre attention dans une tâche d'attention subséquente. Et lorsque vous faites ce genre de tâche, vos résultats confirment la prédiction !

# 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>



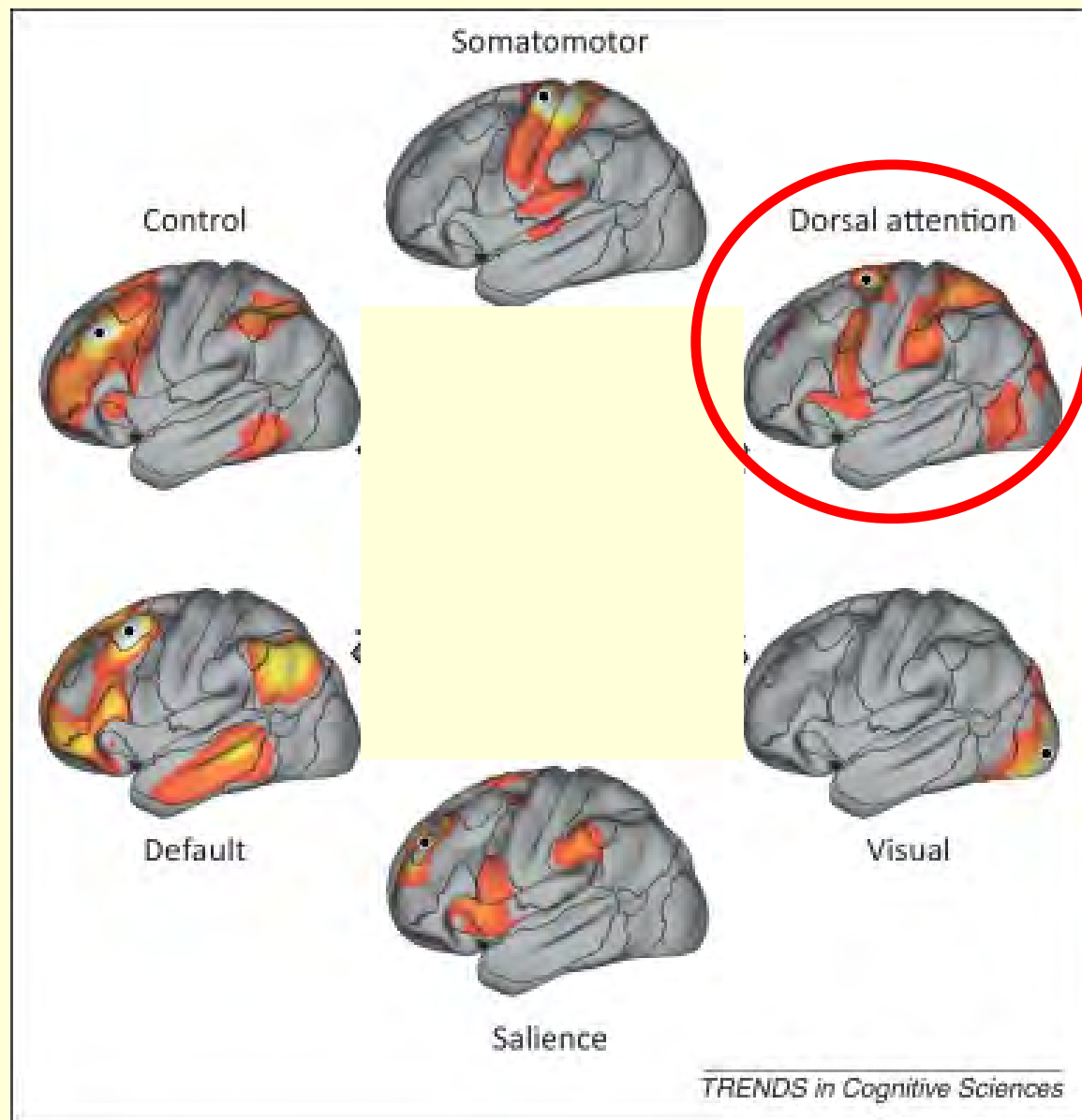
**Le BLOGUE** du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Lundi, 15 février 2016

Des prédictions étonnantes basées sur la connectivité cérébrale

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

On va maintenant s'intéresser à un autre réseau...

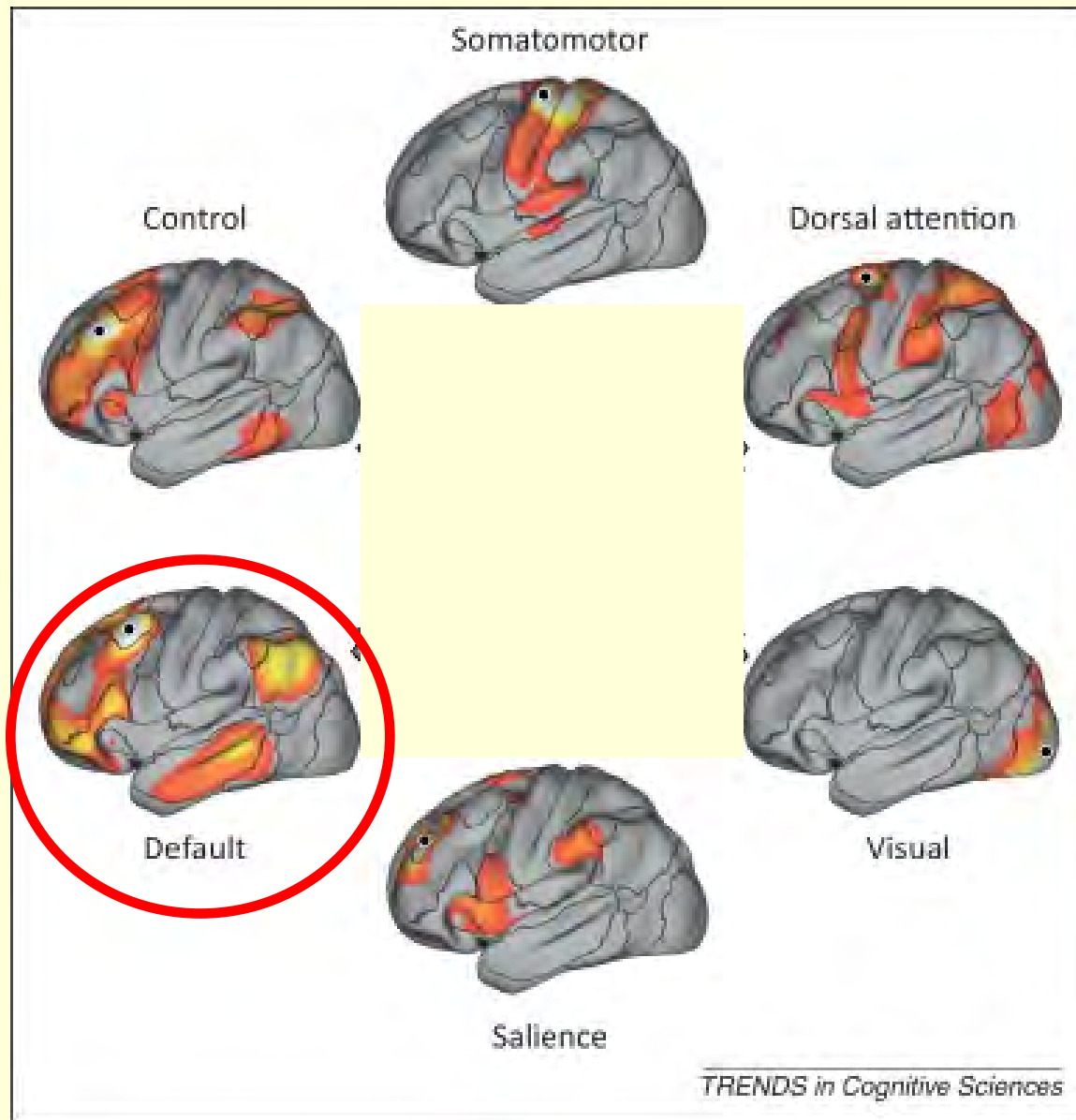


**The evolution of distributed association networks in the human brain**, Randy L. Buckner & Fenna M. Krienen, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 17, Issue 12, 648-665, [13 November 2013](#)

L'un de ces réseaux, appelé réseau du mode par défaut,

est particulier en ce sens que son activité est **élevée** chez le sujet au **repos**

et elle diminue dès qu'il s'engage dans n'importe quelle tâche cognitive.



**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**

# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

**L'exemple du réseau du monde par défaut**

Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

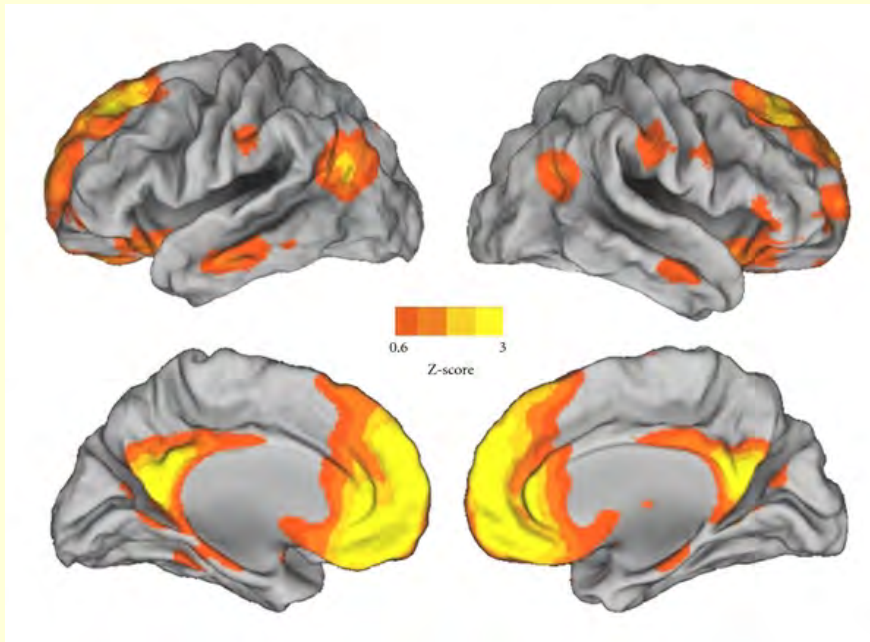


# A default mode of brain function (ou « intrinsic-connectivity networks »)

**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.

On a par la suite montré 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

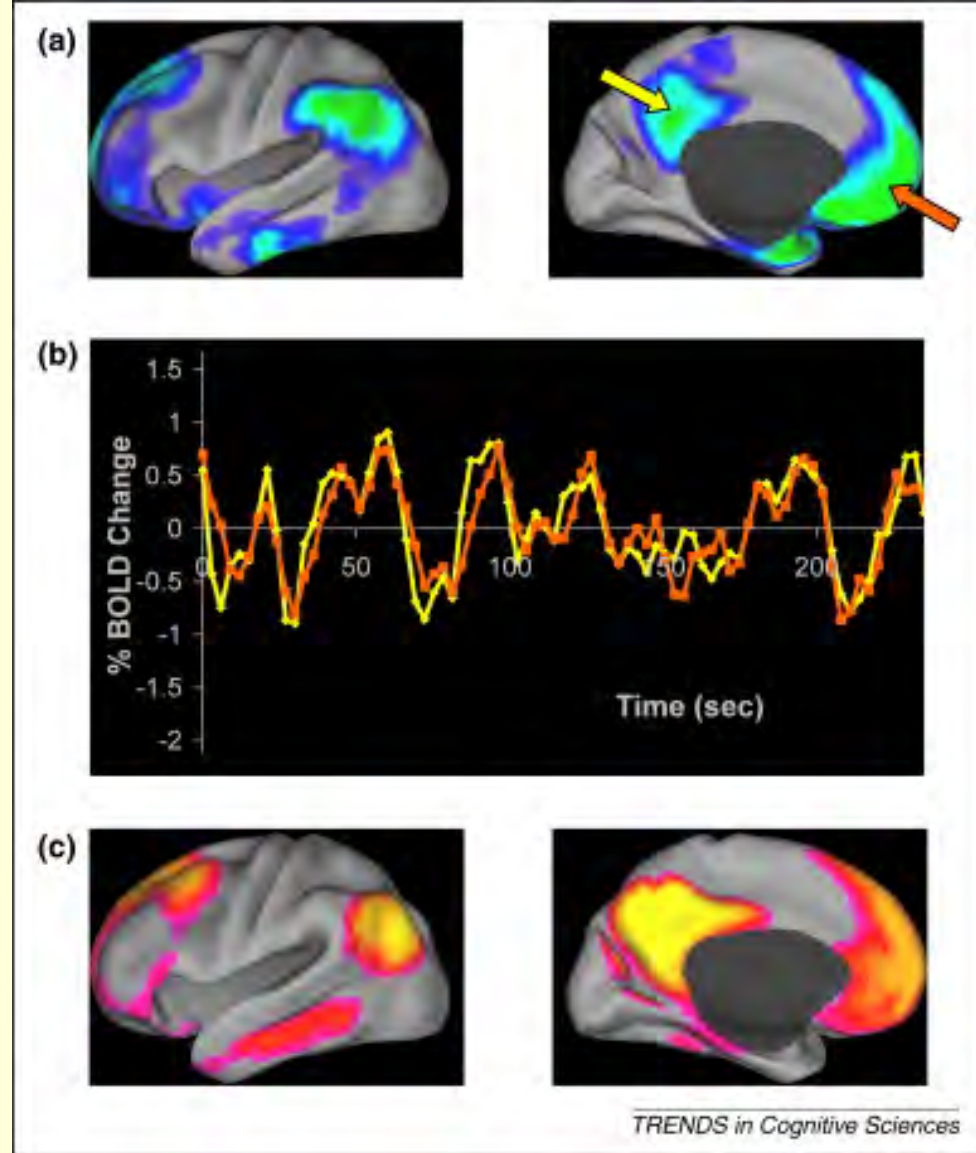
**A default mode of brain function.**  
Raichle, M.E. et al. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. **2001**; 98: 676–682

En (b), activité temporelle des  
patterns de cohérence avec  
comme régions de référence  
(en (a)) :

le **cortex cingulaire postérieur**  
(flèche jaune)

et le **cortex préfrontal ventral  
médian** (flèche orange)

Le tracé très cohérent reflète  
aussi le pattern de cohérence de  
tout le réseau du mode par défaut  
(en (c)).



**Two views of brain function**

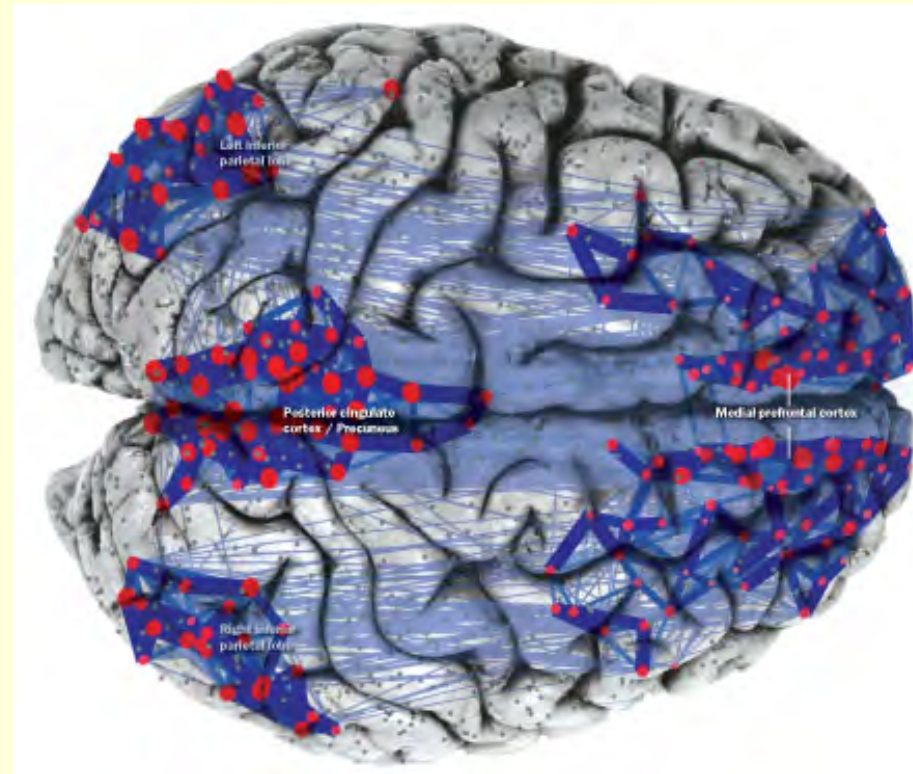
Marcus Raichle (2010)

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

# 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.



« (...) ne crois pas que l'âme soit en paix parce que le corps demeure couché. Souvent le repos... est loin d'être de tout repos. »

- **Sénèque**, Lettres à Lucilius, livre LVI, 60 av JC.

## 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)

Selon des auteurs comme Philip Gerrans, le réseau du mode par défaut peut aussi être vu comme un puissant **système de simulation** qui aurait évolué pour nous permettre de simuler des expériences en l'absence de stimuli déclencheurs.

Il permet :

- de nous libérer des contingences sensori-motrices du moment
- d'imaginer des situation futures à partir de l'expérience mémorisée
- de ressentir les émotions associées à ces scénarios futurs pour aider à déterminer si l'on passe à l'action ou non

Lors de ces simulations (aussi appelées "**mental time travel**" en anglais), les éléments narratifs sont organisés par un ou des **objectifs généraux** (par exemple : repasser mentalement un discours que l'on doit faire un peu plus tard dans la journée)

## **The Measure of Madness**

Philosophy of Mind, Cognitive Neuroscience, and Delusional Thought

Philip Gerrans **2014**

Chapter 4 : The Default Mode Network

<https://muse.jhu.edu/chapter/1234152>

Le mode par défaut peut également n'avoir aucun objectif ou problème à résoudre.

C'est alors qu'il se met réellement dans son **mode par défaut de repos** ("screensaver mode", en anglais) et c'est à ce moment que l'on se retrouve "**dans la lune**" ("daydreaming or mind-wandering", en anglais), donc avec très peu de structure narrative pour organiser les pensées.

Le réseau du mode par défaut pourrait avoir des effets dans différentes conditions :

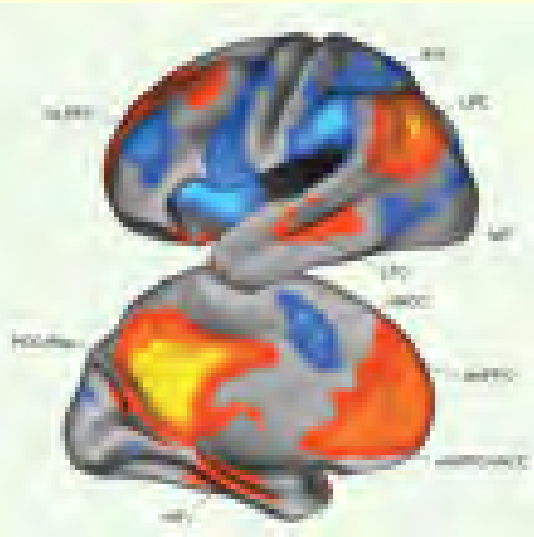
- Dans **l'état d'éveil** : il est alors en communication avec les systèmes perceptuels et exécutifs et contribue alors à la simulation d'événements futurs en fonction de l'expérience passée (pour aider à décider, par exemple, où l'on va dîner, à quelle école on va envoyer les enfants, avec qui on veut cohabiter, etc.)
- Durant **le rêve** : le réseau du mode par défaut est alors déconnecté à la fois de la périphérie sensorielle et des systèmes de contrôle de niveau supérieur qui sont désactivés durant le rêve (le REM). Cela conduit au caractère relativement incohérent de nos rêves.

→ Et finalement, durant **les hallucinations** : sans être des rêves, les hallucinations qui surviennent à l'état d'éveil dépendraient de l'activité du réseau du mode par défaut. Elles seraient déclenchées par des inputs sensoriels, mais avec des aspects fabuleux ou délirant qui dépendraient de l'activité du réseau du mode par défaut. Pour ces auteurs, il ne s'agirait donc pas tant d'échecs de processus de raisonnement que de dérèglement de processus de simulation et d'imagination.

### **Un célèbre neuropsychologue explique comment le fait de « ne rien faire » est en fait vitale 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.



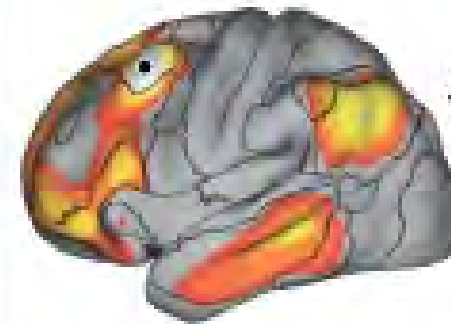
Lundi, 29 septembre 2014

## 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.

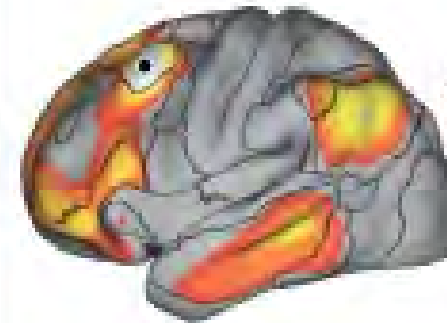


Soit nous sommes envahis par les innombrables stimuli de notre environnement (et ils sont fort nombreux à l'heure des téléphones intelligents et des réseaux sociaux) et notre **réseau du mode par défaut** nous repasse ensuite des extraits de ce film de notre vie personnelle et sociale quand il est moins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



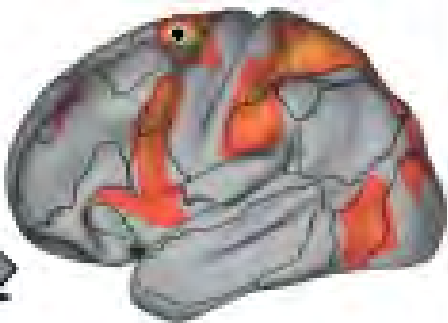
Default

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

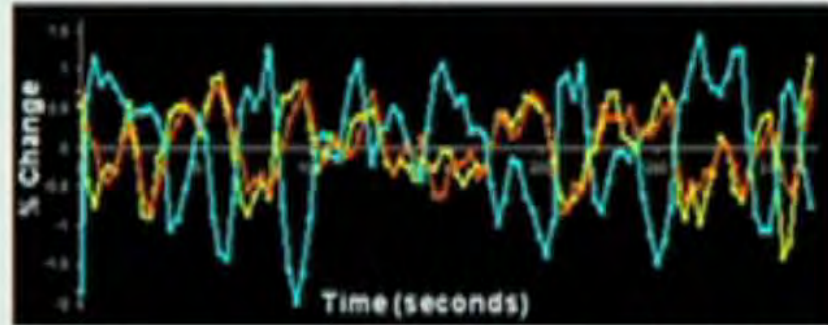
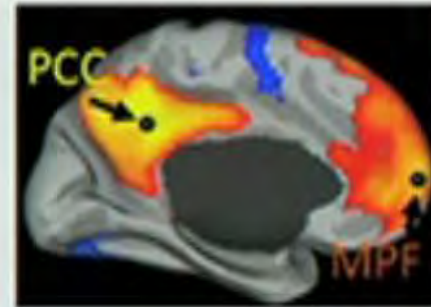
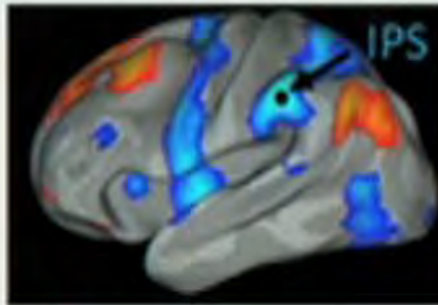


Ou soit, par l'entremise fréquente de régions frontales de notre cortex, nous concentrons notre **attention** sur une tâche cognitive pour la résoudre.

« idées noires » ?



Default Mode Network



Fox et al (2005) PNAS

Dorsal Attention Network

« control freak » ?

Réseau du mode par défaut en psychiatrie : d'abord ces deux articles qui introduisent les données de base en **2007** et **2012** :

## **Aberrant “Default Mode” Functional Connectivity in Schizophrenia**

Volume 164 Issue 3, March, 2007, pp. 450-457

THE AMERICAN JOURNAL OF PSYCHIATRY March 2007 Volume 164  
Number 3

## **Default Mode Network Activity and Connectivity in Psychopathology**

Annual Review of Clinical Psychology

Vol. 8: 49-76 (Volume publication date April 2012)

First published online as a Review in Advance on January 6, 2012

<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-clinpsy-032511-143049?journalCode=clinpsy>

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

Received: July 28, 2013; Received in revised form: February 9, 2015; Accepted: February 11, 2015; Published Online:

**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](#)<sup>1</sup>, [Chen AC](#)<sup>2</sup>, [Zebley BD](#)<sup>3</sup>, [Drysdale AT](#)<sup>4</sup>, [Gordon R](#)<sup>4</sup>, [Leuchter B](#)<sup>4</sup>, [Voss HU](#)<sup>5</sup>, [Casey BJ](#)<sup>4</sup>, [Etkin A](#)<sup>2</sup>, [Dubin MJ](#)<sup>4</sup>. Biol Psychiatry. 2014 Oct 1;76(7):517-26. doi:

10.1016/j.biopsych.2014.01.023. Epub **2014 Feb 5**.

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

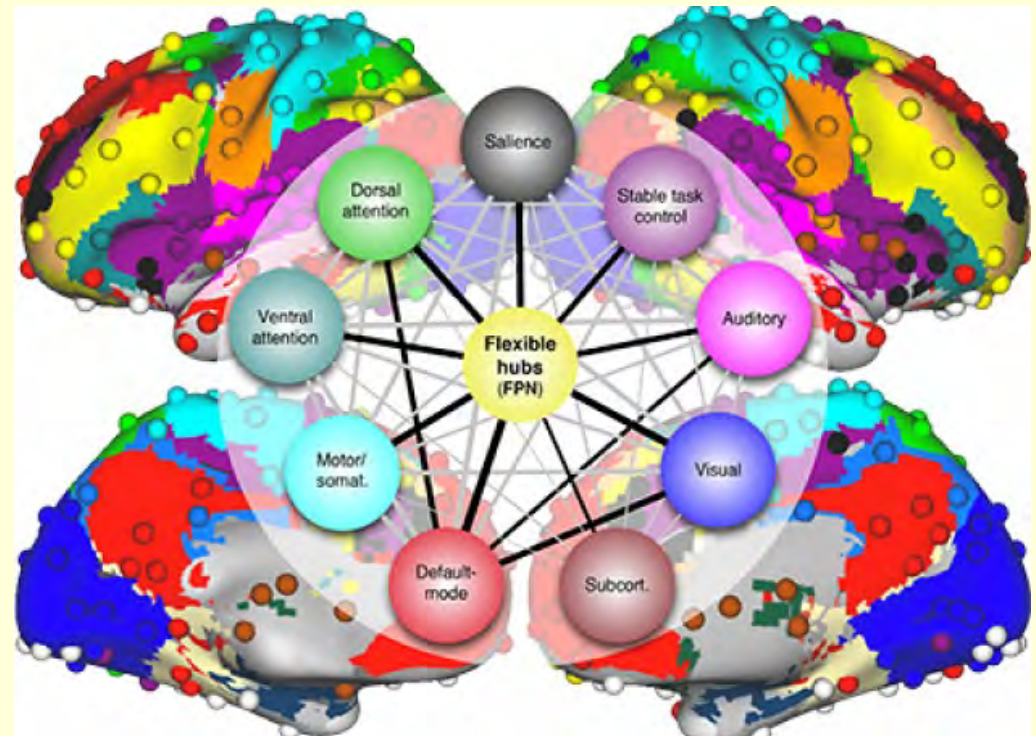
Dernière remarque :

Il semble exister certains circuits à haut débit capables de changer rapidement leurs patterns de connectivité et de **basculer** ainsi d'un réseau fonctionnel à un autre selon les demandes de différentes tâches.

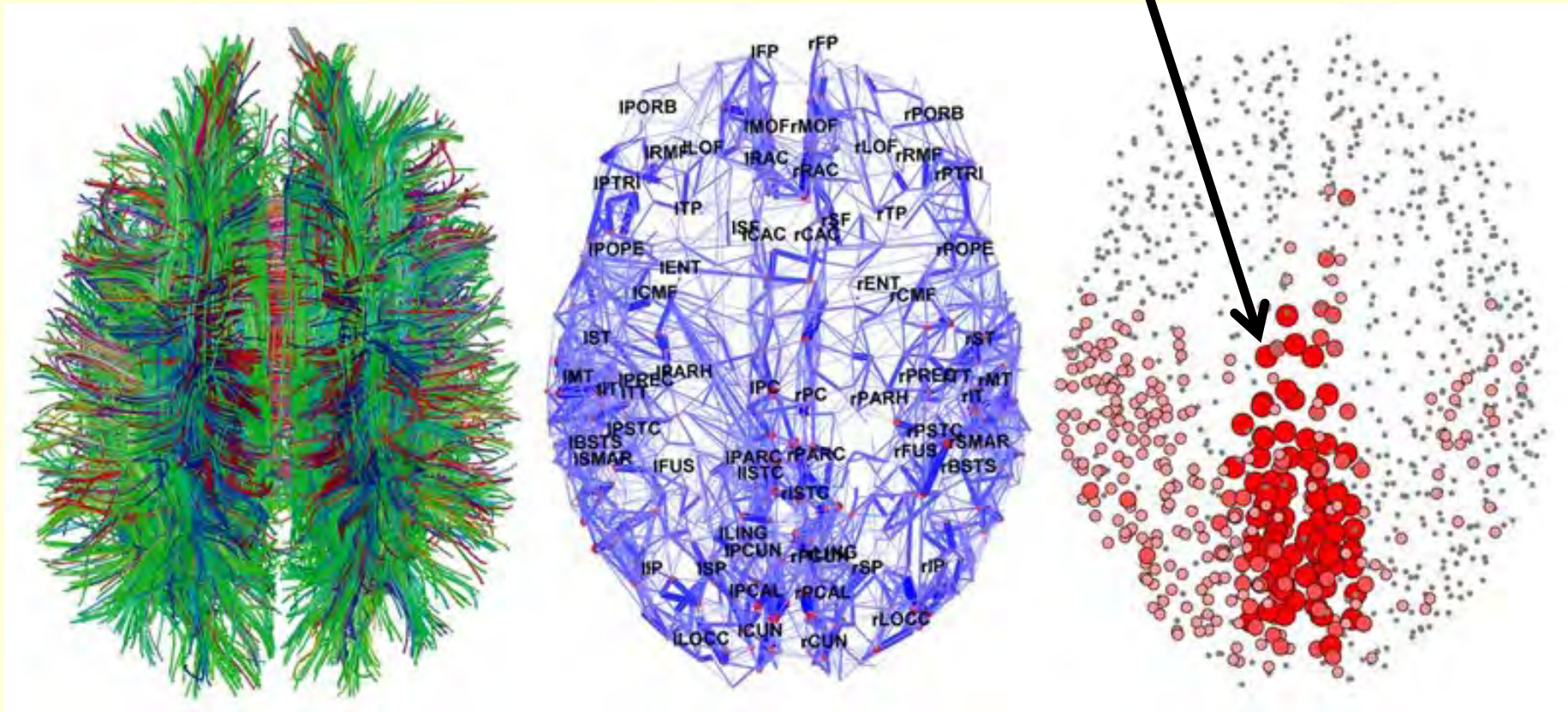
## Multi-task connectivity reveals flexible hubs for adaptive task control

Michael W Cole, et al.  
Nature Neuroscience 16,  
1348–1355 (2013)

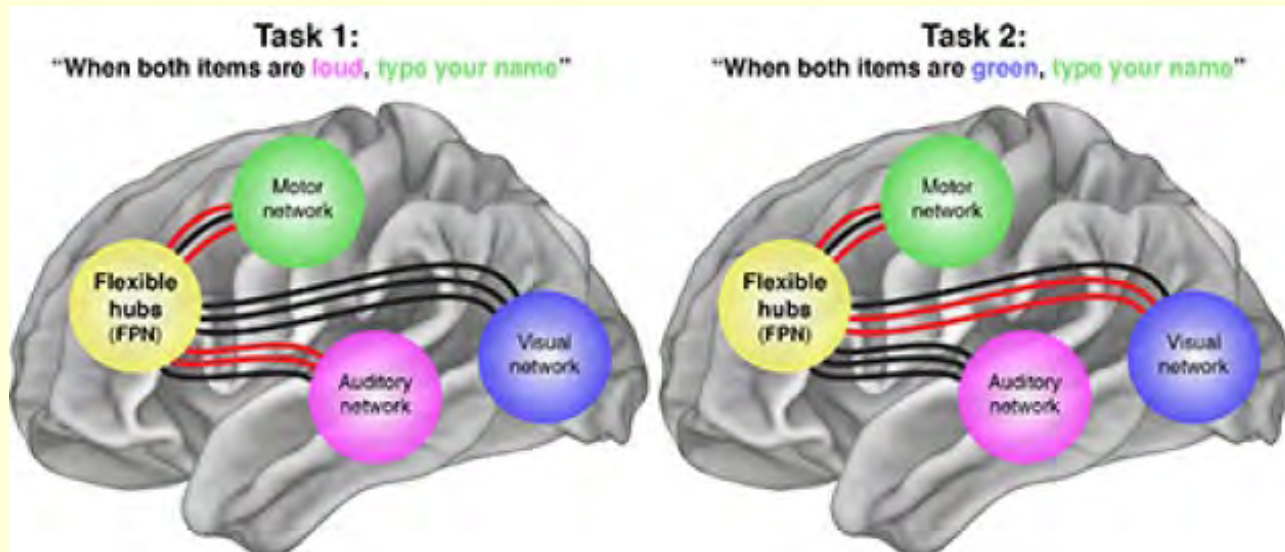
Cette étude détaille la position centrale d'un “flexible hub” permettant de **basculer** d'un réseau fonctionnel à un autre parmi les 9 principaux décrits comprenant 264 sous-régions.



Car on peut, à partir de l'organisation d'un **système complexe en réseau** comme le cerveau, dégager un certain nombre de "**hubs**", c'est-à-dire de points de passage plus fréquemment utilisés pour construire les coalitions entre assemblées de neurones.



The fiber architecture of the human brain as revealed by diffusion imaging (left), a reconstructed structural brain network (middle) and the location of the brain's core, its most highly and densely interconnected hub (right).



Les voies fronto-pariétales du “**flexible hub**” permettraient par exemple **le transfert d’un apprentissage** moteur consécutif à un stimulus auditif à un stimulus visuel.

*“Like an Internet router, flexible hubs shift which networks they communicate with based on instructions for the task at hand and can do so even for tasks never performed before”*



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

**Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques**

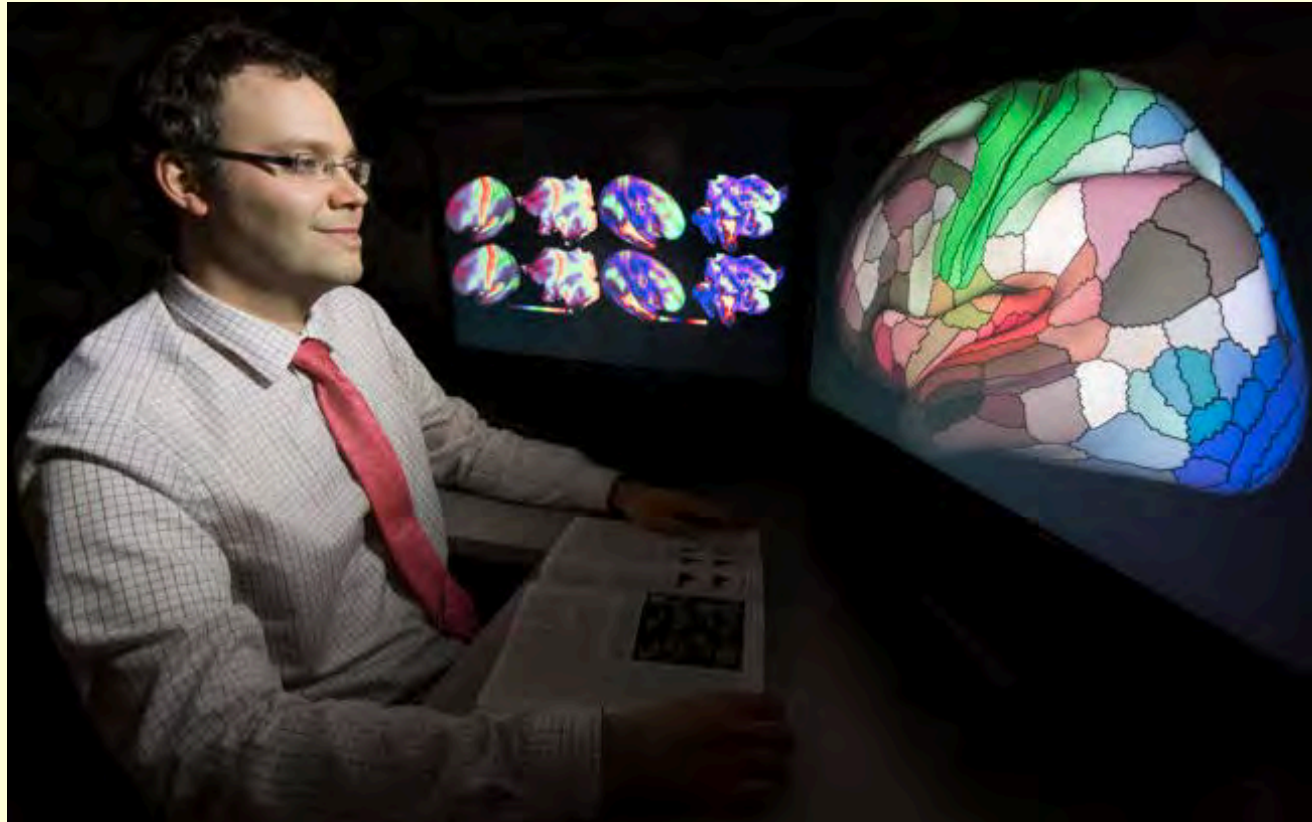
Limites du connectome

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

Nature. 2016 Aug 11;536(7615):171-8.

## A multi-modal parcellation of human cerebral cortex.

Glasser MF, Coalson TS, Robinson EC, Hacker CD, Harwell J, Yacoub E, Ugurbil K, Andersson J, Beckmann CF, Jenkinson M, Smith SM, Van Essen DC.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27437579>



Matthew Glasser, Ph.D. of the Van Essen lab at Washington University in St. Louis.

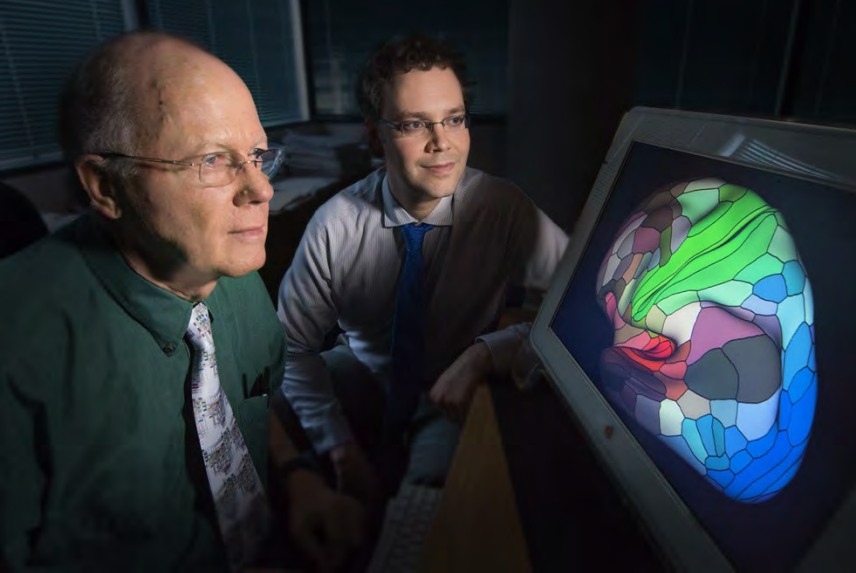
**Cortical  
brain maps  
at the  
highest  
resolution  
to date**

<http://humanconnectome.org/about/pressroom/nature-article-cortical-brain-maps-at-the-highest-resolution-to-date/>

July 20, **2016**

**Scientists just  
identified 97  
brand-new  
regions in our  
brains**

<http://www.sciencealert.com/scientists-just-identified-almost-100-new-regions-in-the-brain-s-cerebral-cortex>



En se basant sur des données du [Human Connectome Project](#), ils ont pu caractériser **180 régions cérébrales par hémisphère** délimitées par des changements nets dans la cytoarchitecture, la fonction, la connectivité et/ou la topographie. Cela fait donc 97 nouvelles régions en plus des 83 déjà connues dans la littérature scientifique !

“**Architectural** measures of relative cortical myelin content and cortical thickness were derived from T1-weighted (T1w) and T2-weighted (T2w) structural Images.

Cortical **function** was measured using task functional MRI (tfMRI) contrasts from seven tasks.

Resting-state functional MRI (rfMRI) revealed functional **connectivity** of entire cortical areas plus topographic organization within some areas.”

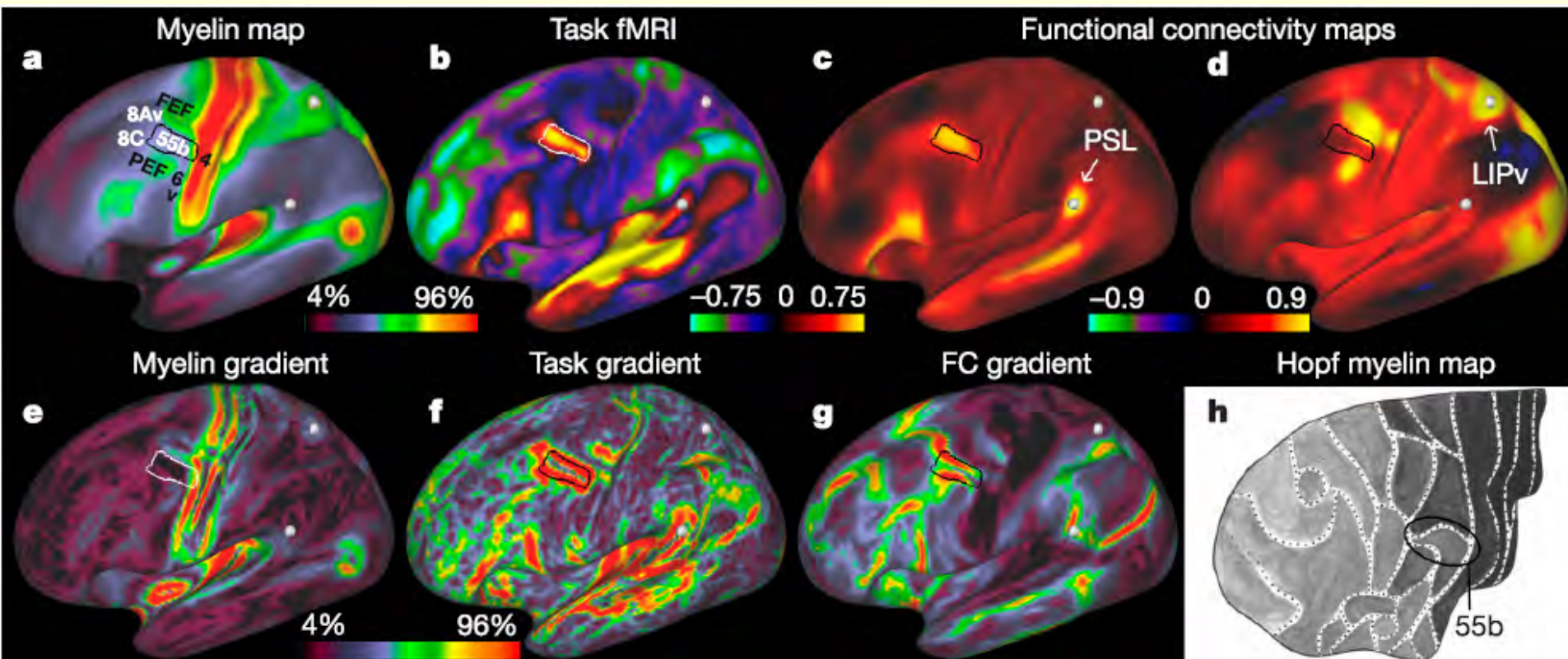


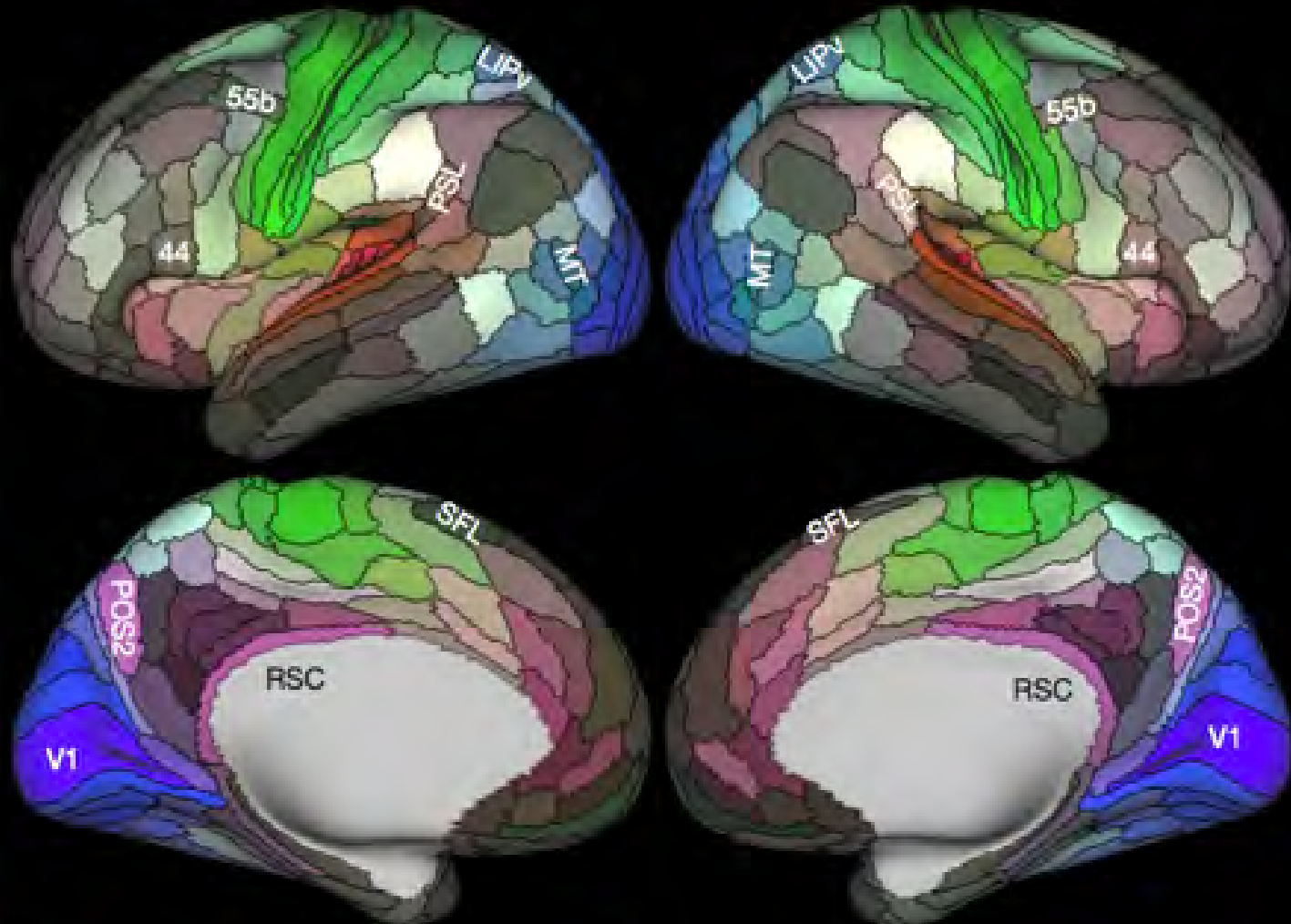
Figure 2 | Parcellation of exemplar area 55b using multi-modal information.

Ils ont combiné les deux approches utilisées pour **décider des limites des régions cérébrales.**

« For the initial parcellation, we adapted a successful observer-independent **semi-automated neuroanatomical approach** for generating post-mortem architectonic parcellations to non-invasive neuroimaging.

We used an algorithm to delineate potential areal borders (transitions in two or more of the cortical properties described above), which **two neuroanatomists (authors M.F.G. and D.C.V.E.) then interpreted**, documenting areal properties and identifying areas relative to the extant neuroanatomical literature.”

# The HCP's multi-modal cortical parcellation (HCP\_MMP1.0)



Auditory



Sensory/motor



Visual



Task positive



Task negative

De plus, l'étude présentait un algorithme de reconnaissance des régions cérébrales **capable d'apprendre à reconnaître « l'empreinte digitale » multimodale de chacune des 180 régions.**

Lorsque testé sur de nouveaux sujets, l'algorithme de classification a été capable de détecter la présence de 96.6% des régions corticales.

“We then used a fully automated algorithmic approach, training a machine-learning classifier to delineate and identify cortical areas in individual subjects **based on multi-modal areal fingerprints**, allowing the parcellation to be replicated in new subjects and studies.”



Oct-03-2016: Michael Petrides

[Van Essen's Multi-Modal Parcellation of Human Cerebral Cortex]

« Technically : « the state of the art »,  
**but certainly not THE final map... »**

L'une de ses critiques : nomment des régions avec des étiquettes fonctionnelles comme « superior frontal language area ».

Mais ce n'est **peut-être pas la seule fonction de cette région !**

Autre critique durant la période de question : on peut toujours changer les critères de sélection quand on construit une carte et on obtient alors des cartes différentes.

En fait, pour certains, on peut presque dire que chaque point dans le cerveau a ses caractéristiques uniques !

Petrides pense pour sa part qu'on peut établir une « vraie » carte cytoarchitectonique et que « **some patches have common properties** ».

Autre projet du même genre : le groupe chinois « **Brainnetome** » <http://atlas.brainnetome.org/>



# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

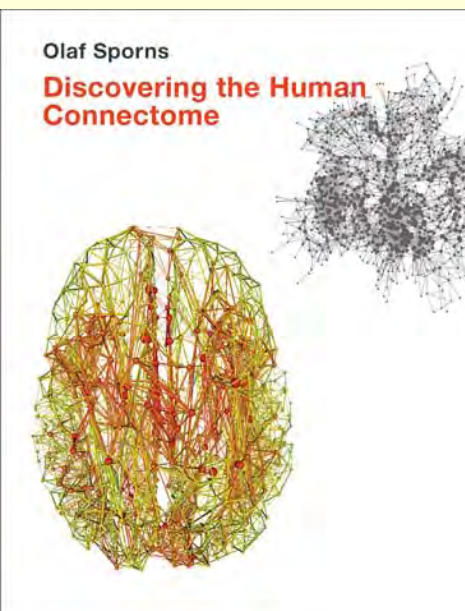
Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

**Limites du connectome**

L'organisation générale de nos réseaux cérébraux

Un peu comme pour la cartographie du génome humain (qui a été achevée en 2003) sans nous permettre de comprendre d'un coup toutes les maladies génétiques, de même on ne croit pas que la carte générale du connectome humain nous permettra de comprendre instantanément les maladies mentales.

Mais comme pour le génome, elle permettra d'élaborer de nouvelles hypothèses et l'on ne pourra sans doute plus s'en passer.



Olaf Sporns :

*We will ultimately have a very good understanding of what the connectome looks like. It will be fundamental.*

***But it will not give us all the answers.***

*I think it's more like it will allow us to ask new questions that perhaps we couldn't ask before."*

Le seul animal dont on a le connectome complet est le vers *C. elegans* :

**302 neurones et 7000 synapses**

## The Connectome Debate: Is Mapping the Mind of a Worm Worth It?

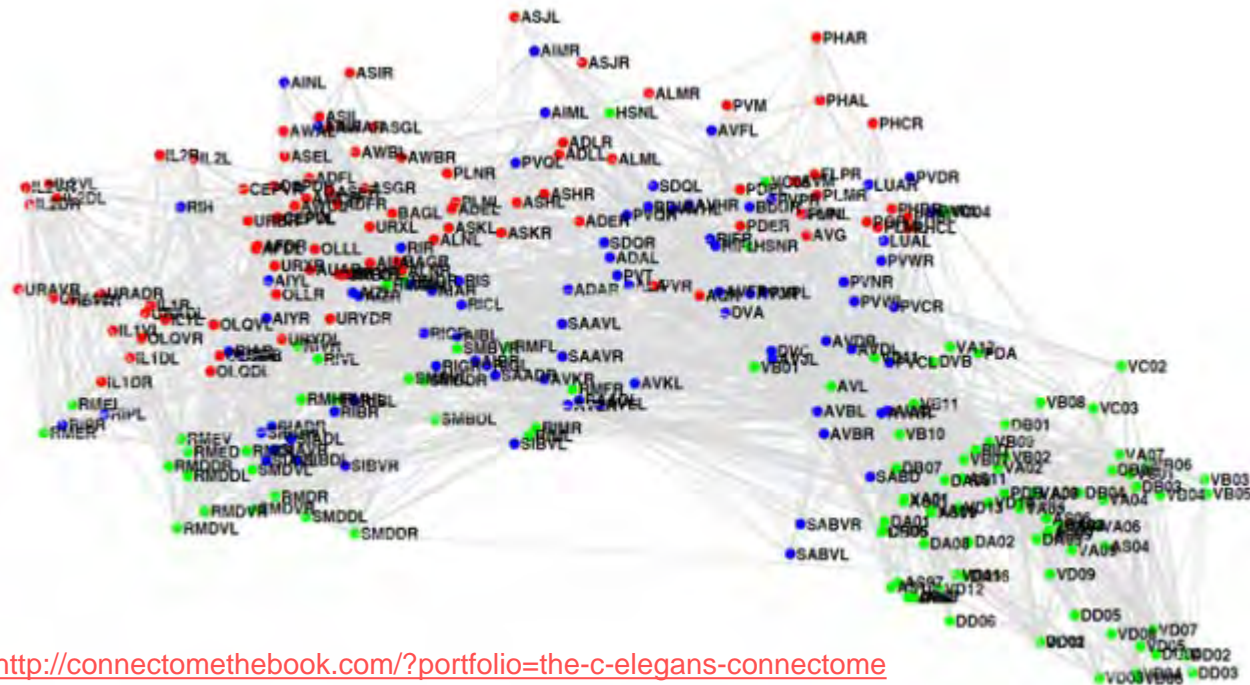
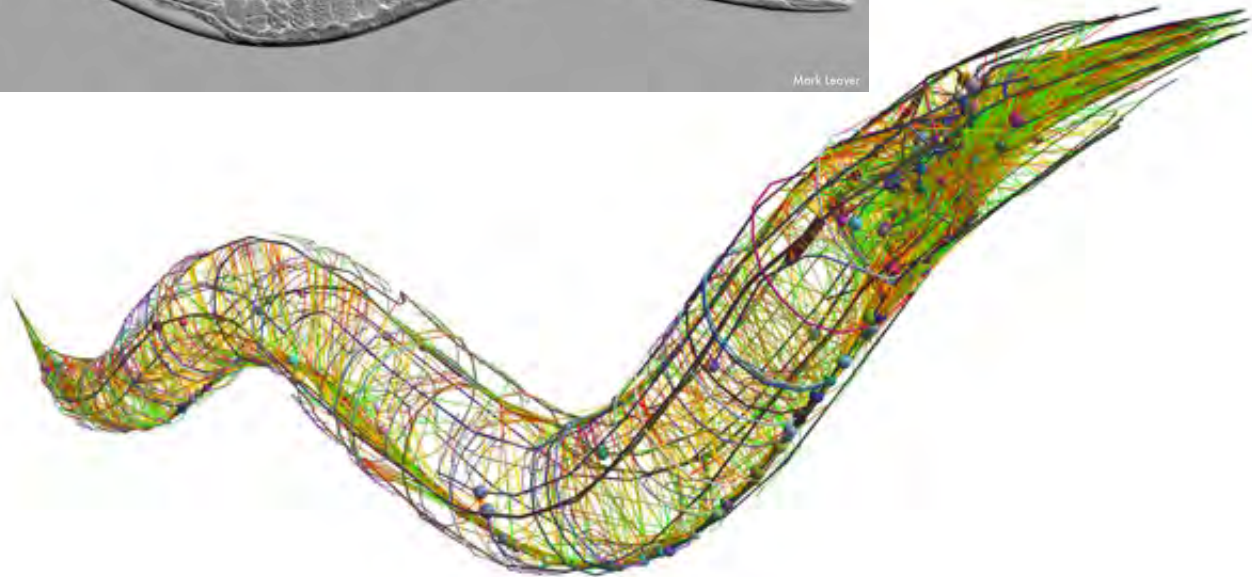
Scientists have mapped a tiny roundworm's entire nervous system. Did it teach them anything about its behavior?

By [Ferris Jabr](#)  
October 2, 2012

<http://www.scientificamerican.com/article/c-elegans-connectome/>



Mark Leaver



<http://connectomethethebook.com/?portfolio=the-c-elegans-connectome>

## **L'utilité du connectome de *C. elegans* fait l'objet de débats :**

"I think it's fair to say...that our understanding of the worm has not been materially enhanced by having that connectome available to us. We don't have a comprehensive model of how the worm's nervous system actually produces the behaviors. What we have is a sort of a bed on which we can build experiments—and many people have built many elegant experiments on that bed. But **that connectome by itself has not explained anything.**"

- Anthony Movshon of New York University

**"A lot of what we know about *C. elegans*'s rapid behaviors we have learned through and with the connectome.** Every time we do an experiment, we look at those wiring diagrams and use them as a starting point for generating hypotheses."

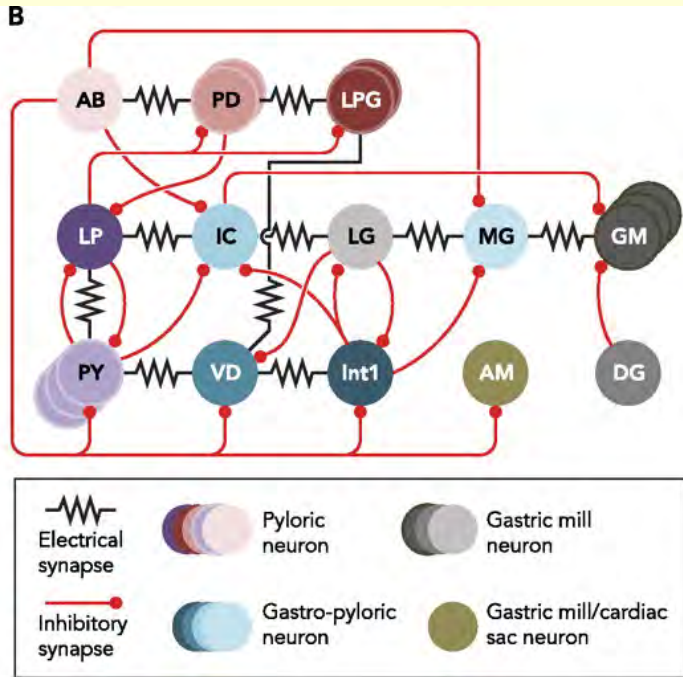
- Cornelia Bargmann of The Rockefeller University

## Quelques points débattus :

- Le “poids synaptique” des connexions n’est pas connu;
- Il est aussi changeant avec l’apprentissage;

Une carte qu’il sera toujours **impossible de dresser d’une façon définitive à cause de la plasticité** inhérente du cerveau humain, nos synapses se modifiant à tout moment.

- On ne sait pas non plus la nature excitatrice ou inhibitrice de toutes ces connexions;
- Certains neuromodulateurs circulant autour des neurones peuvent changer la manière dont les neurones interagissent entre eux...

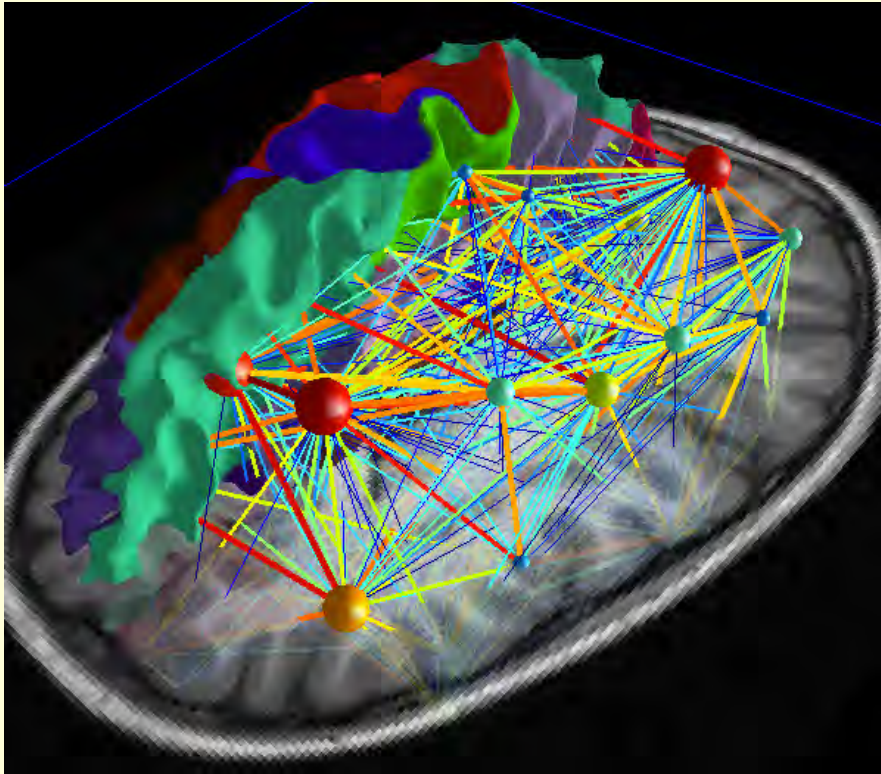


“What Eve Marder has shown, quite convincingly, is that **you can have the same structural circuit**—the same circuit of neurons connected by synaptic connections—and depending on what kind of neurotransmitters, what kind of neuromodulators are active at each given time in the circuit, **the circuit can do different things.**

- Olaf Sporns



[ Le même circuit pouvait avoir plusieurs types d'outputs différents dépendamment des neuromodulateurs qu'on lui appliquait. ]



The message here is that **having the structural layout—the wiring diagram of the circuit—alone, may not be the whole story.”**

- Olaf Sporns

# Plan

Intro : les problèmes auquel fait face la cartographie cérébrale

Les premières cartes

Les techniques de traçage classiques

Exemples de projets actuels (à l'échelle micro, meso et macro)

Imagerie cérébrale – Intro;

L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

Tomographie par émission de positons (PET scan)

Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Critique de l'IRMf et la question de la spécialisation cérébrale

IRM de diffusion

IRM de connectivité fonctionnelle (fcMRI)

L'exemple du réseau du monde par défaut

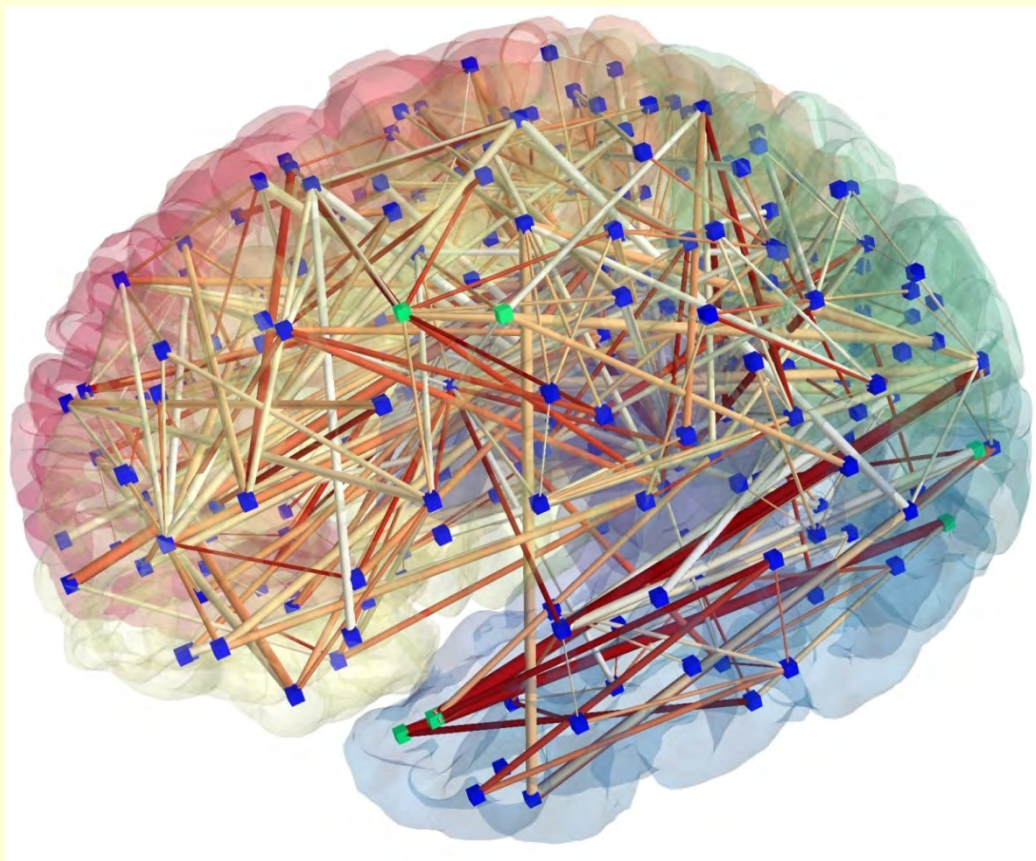
Une cartographie récente impliquant plusieurs de ces techniques

Limites du connectome

**L'organisation générale de nos réseaux cérébraux**

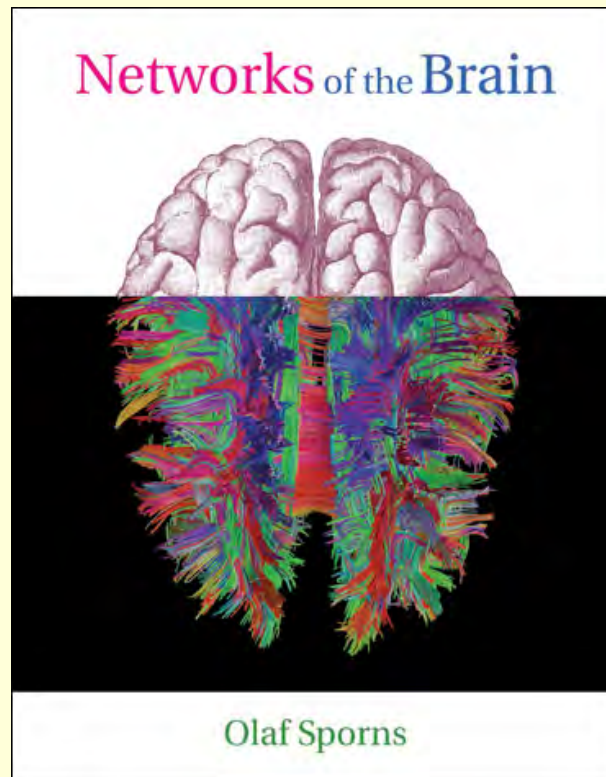


Une autre approche est d'essayer de voir avec des **modèles théoriques** si ces réseaux ont un type d'organisation particulier.



Une approche qui s'est  
beaucoup développée  
depuis une dizaine d'années :

## La théorie des réseaux



Publié en 2010

### **Modular and hierarchically modular organization of brain networks**

David Meunier, Renaud  
Lambiotte and Edward T.  
Bullmore *Front. Neurosci.*,  
08 December **2010**

Workshop : **Dynamiques  
invariantes d'échelle et  
réseaux en neurosciences**

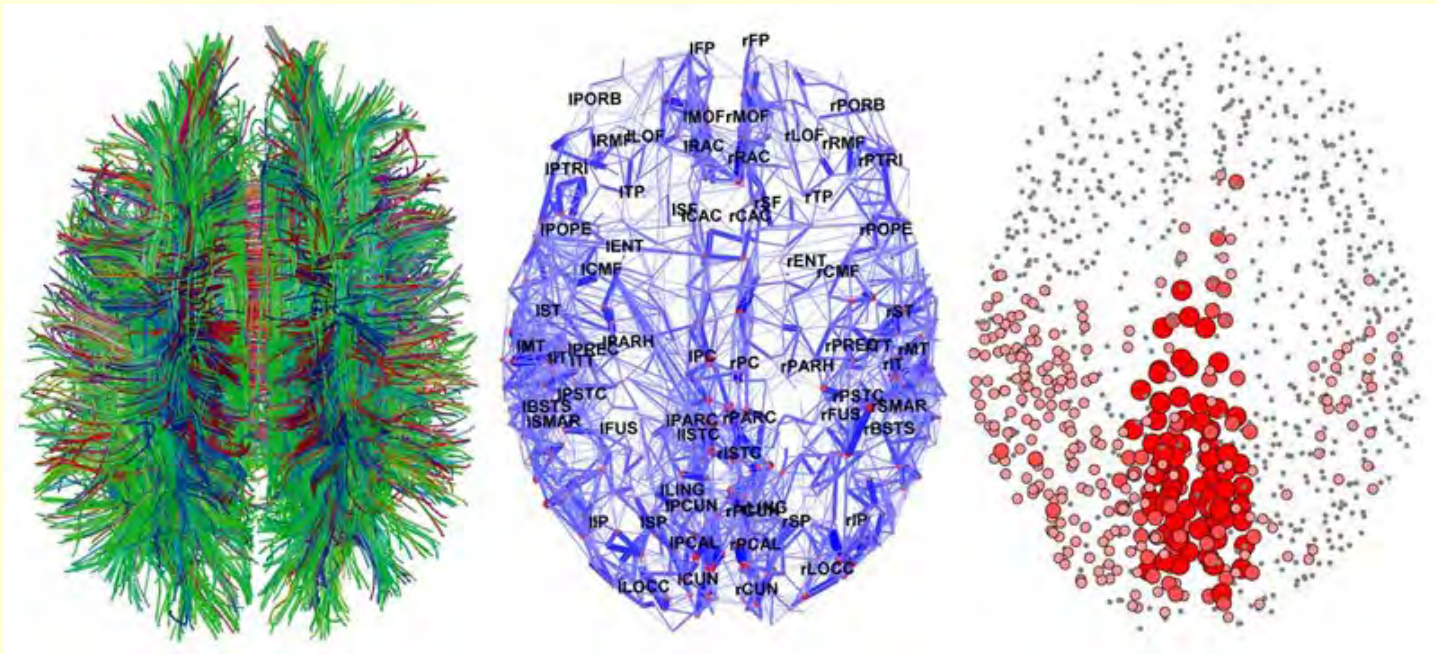
on April 8, **2013**

Where: Centre de recherches  
mathématiques Université  
de Montréal

Il s'agit de comprendre l'**organisation générale d'un système complexe en réseau**, c'est-à-dire d'un système de points reliés par des connections,

en utilisant des **outils mathématique**, issus principalement de la **théorie des graphes**,

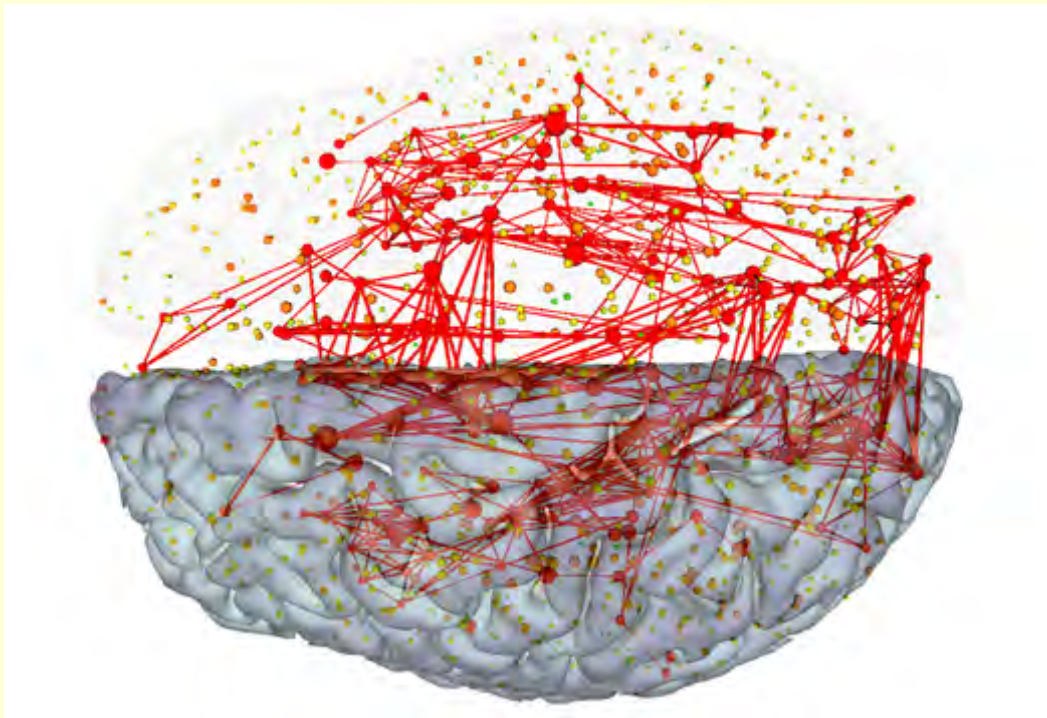
qui permettent de révéler l'**organisation modulaire** d'un tel système complexe.



The fiber architecture of the human brain as revealed by diffusion imaging (left), a reconstructed structural brain network (middle) and the location of the brain's core, its most highly and densely interconnected hub (right).

La « *théorie des graphes* » considère le « **réseau** » comme un ensemble d'arcs reliant des *nœuds* ou *pôles* (qui peuvent être des points massiques simples ou des sous-réseaux complexes) via des **liens** ou *canaux* (qui sont à leur tour des flux de force, d'énergie ou d'information).

<http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau>

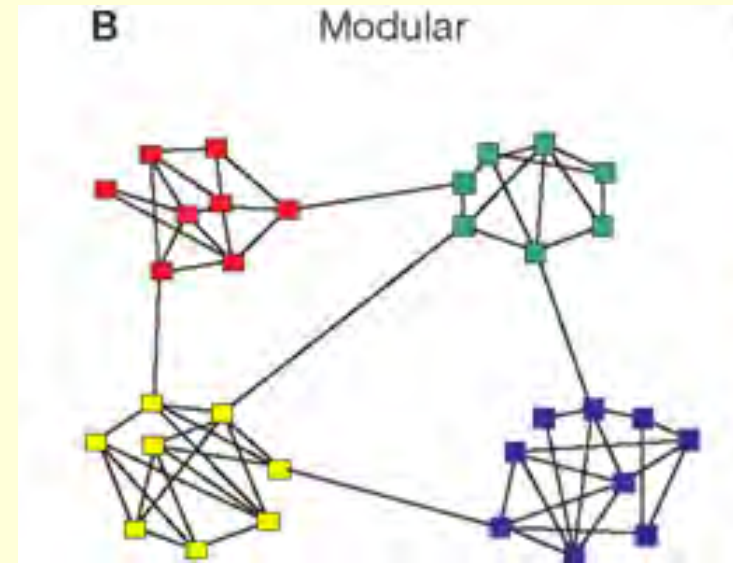


## Mapping Brain Connectivity Using Graph Theory

Posted on **October 21, 2015** by Joel Frohlich

De tels outils mathématiques ont permis de mettre en évidence une organisation **modulaire** du cerveau d'un type particulier appelé "**small world**".

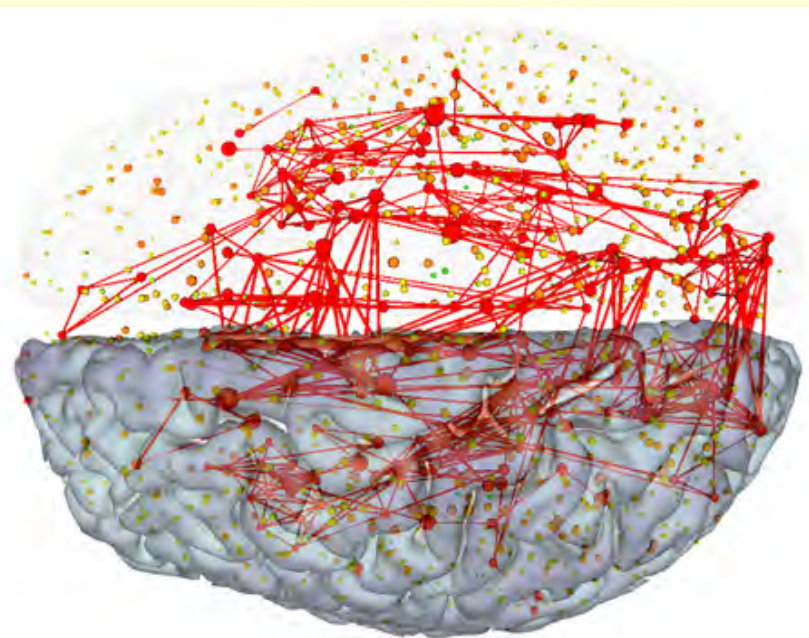
(mais pas "un module = une fonction", plutôt dans le sens d'unité de traitement)



Ces études ont montré que les nœuds de tels réseaux, qu'ils soient des neurones ou des individus, ont tendance à établir des connexions avec **deux types bien distincts de ses semblables** : avec ses nombreux voisins immédiats, mais aussi avec quelques autres neurones ou individus très éloignés ou très populaires.

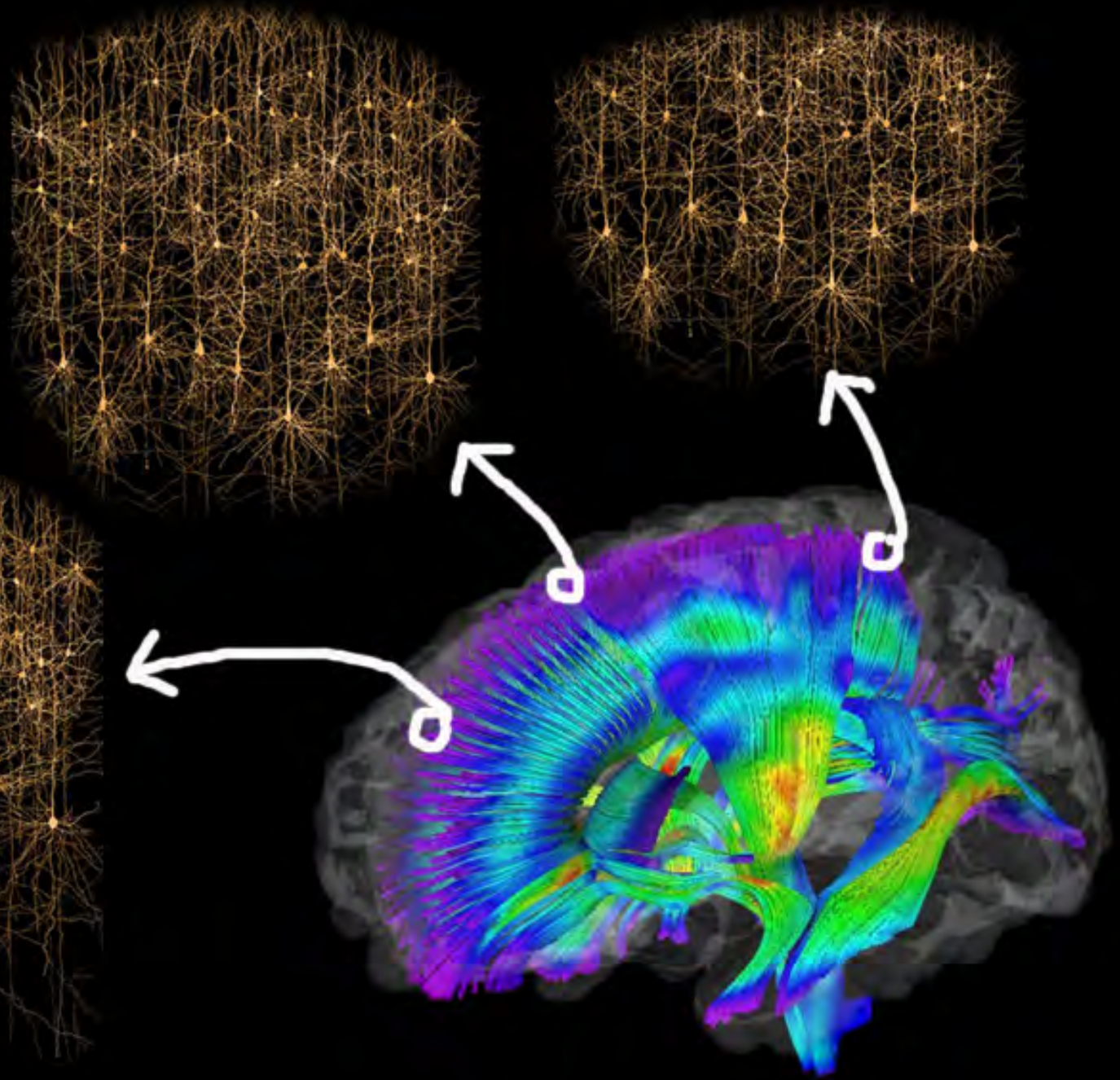
Un peu comme un collectionneur de timbres va visiter les sites web spécialisés très peu fréquentés de ses amis, mais également à l'occasion quelques moteurs de recherches généraux à grand trafic.

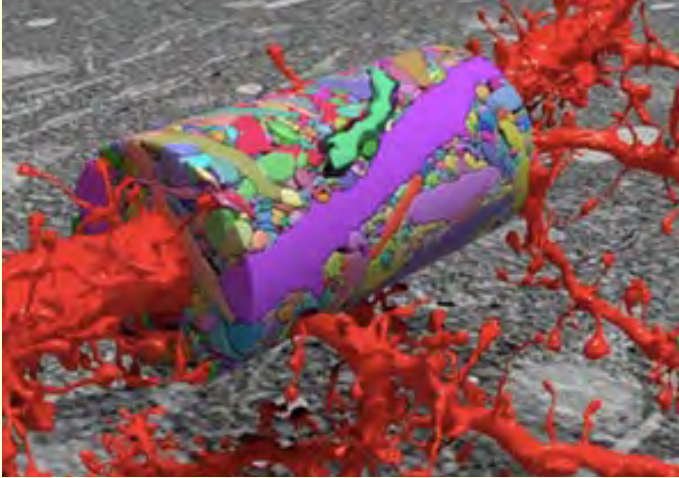
Ou encore comme pour le réseau de nos autoroutes qui relie les grandes villes, ces voies sont **coûteuses** mais permettent de **franchir plus rapidement** de grandes distances qu'en empruntant le réseau de petites rues (ou de voies nerveuses) locales...



« Grandes  
autoroutes...

...et petites  
rues locales.

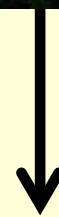
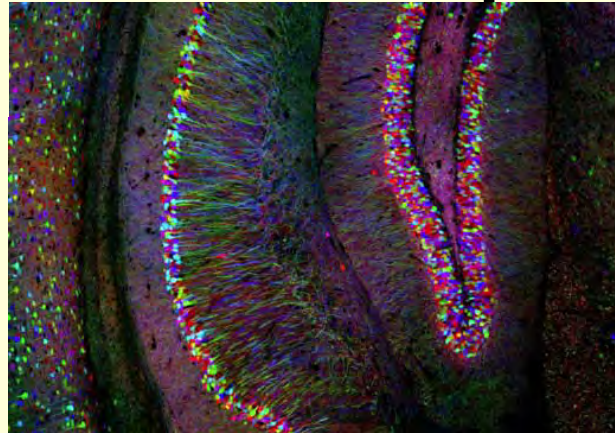




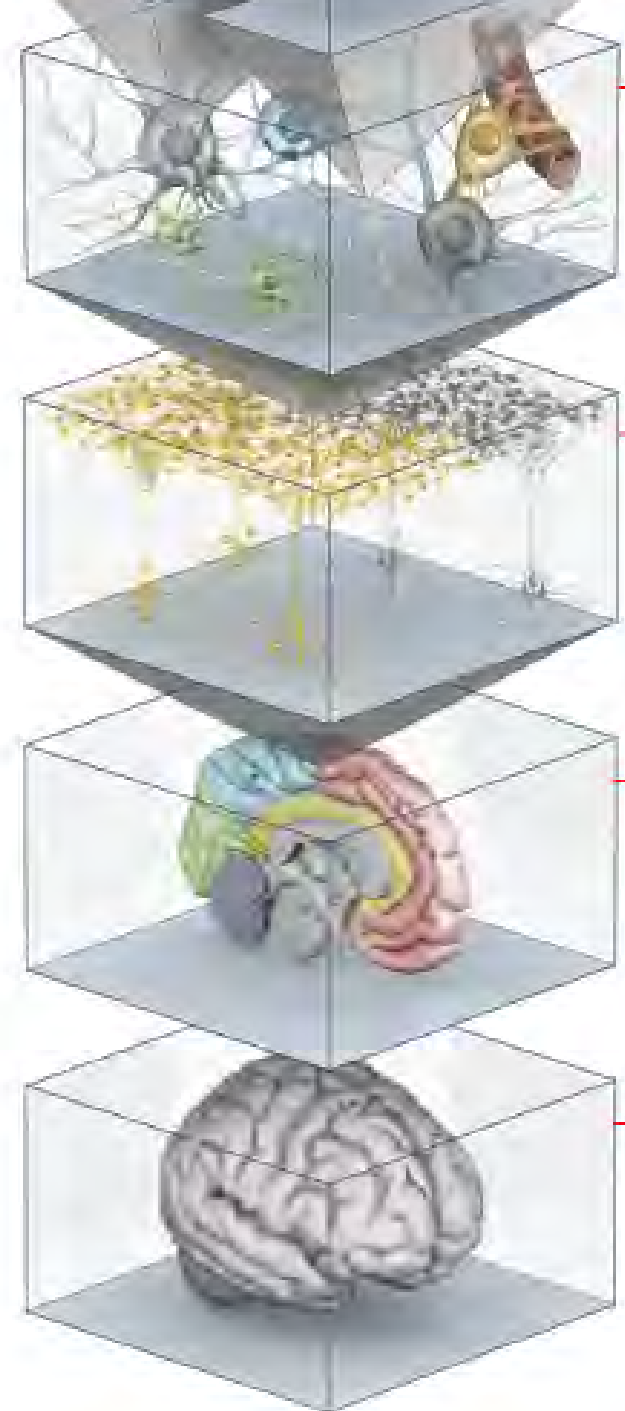
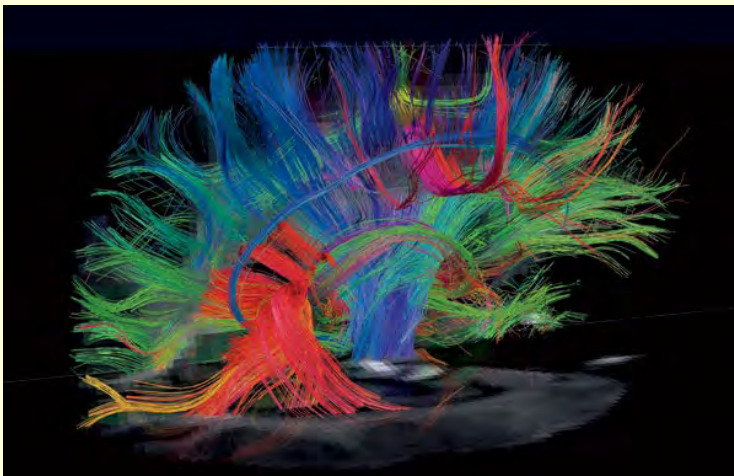
de l'échelle  
« micro »



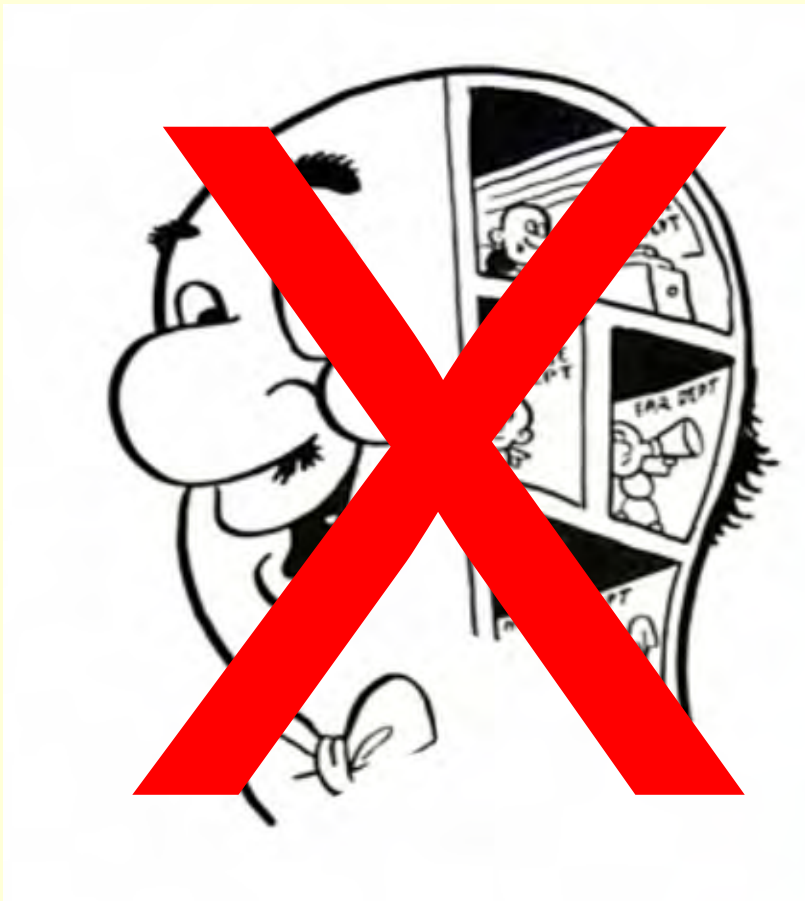
Car il faut se  
rappeler que  
peu importe  
l'échelle que  
l'on  
considère...



à l'échelle  
« macro »





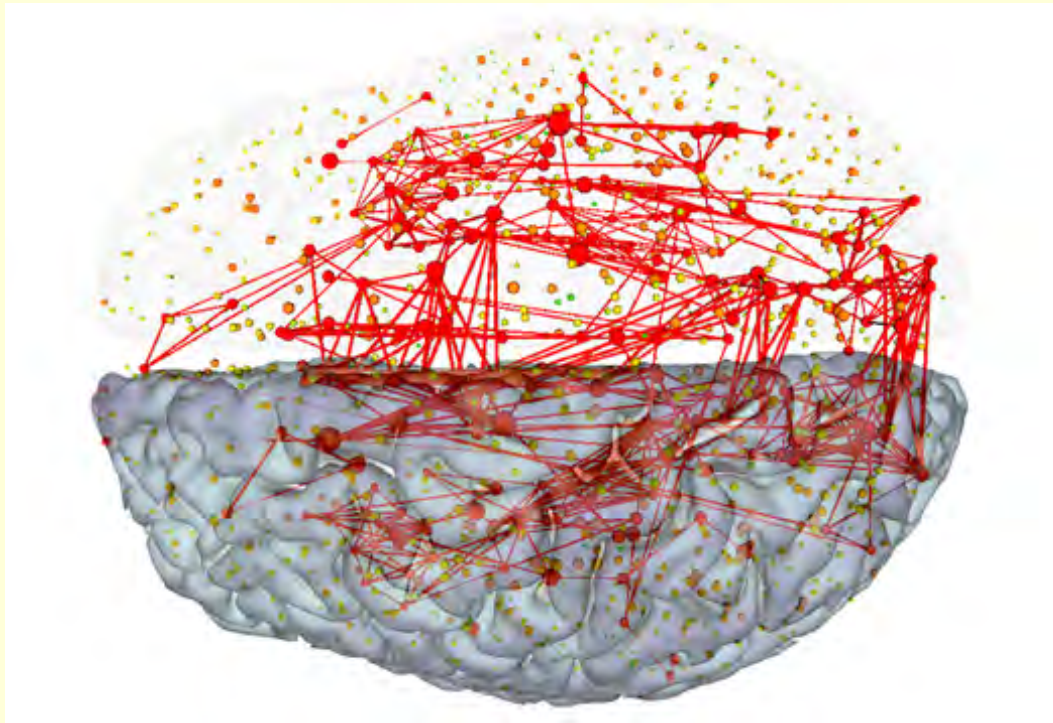


...il n'y a pas de « centre de.. » dans le cerveau...

**« There is no boss in the brain. »**

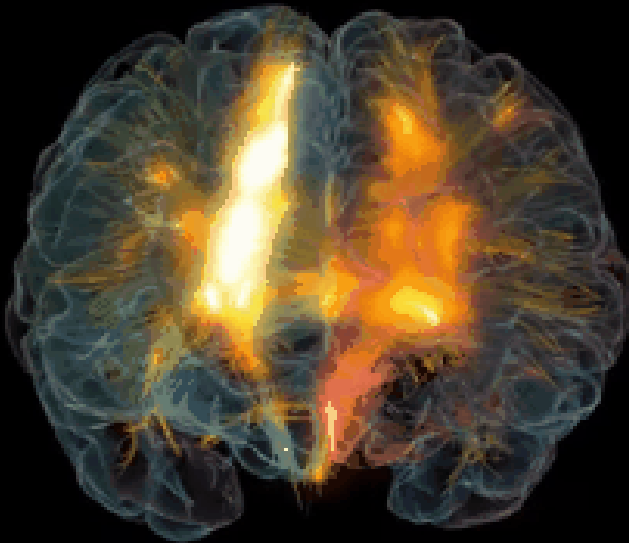
- M. Gazzaniga





...car c'est une machine qui  
fonctionne massivement en  
**parallèle et de manière  
distribuée...**

...et il faut donc penser le cerveau en terme **d'activité dynamique** dans un **réseau largement distribué** !



**Et c'est avec cette activité dynamique**  
dans les réseaux cérébraux que nous  
reprendrons la semaine prochaine.

