

A- Le « connais-toi
toi-même » de
Socrate à l'heure
des sciences
cognitives

Cours #1

L'histoire
évolutive de notre
système nerveux

L'humain découvre
la grammaire de
base de son système
nerveux

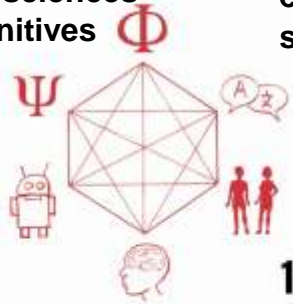
B- La plasticité
neuronale à la base
de l'apprentissage
et de la mémoire

Prologue

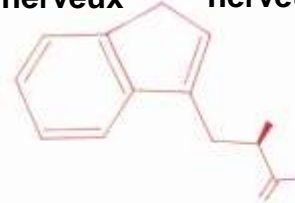


Épilogue

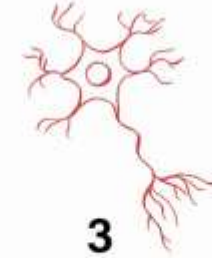
12



1



2



3



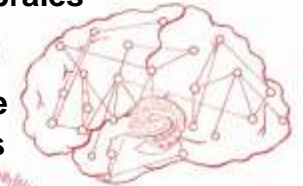
4

Cours #2

A- Des structures cérébrales
multiples et variées

5

Reliées en réseaux de
milliards de neurones



B- L'activité
dynamique de nos
rythmes cérébraux

6

Durant
l'éveil, le
sommeil et
le rêve

11



10



9



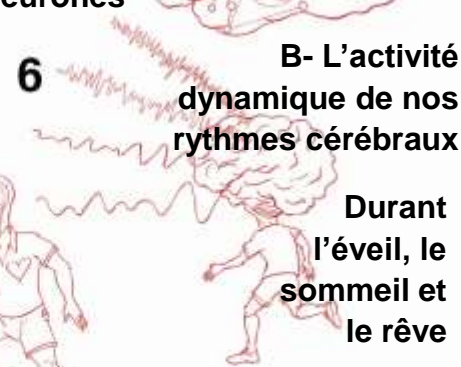
8



7



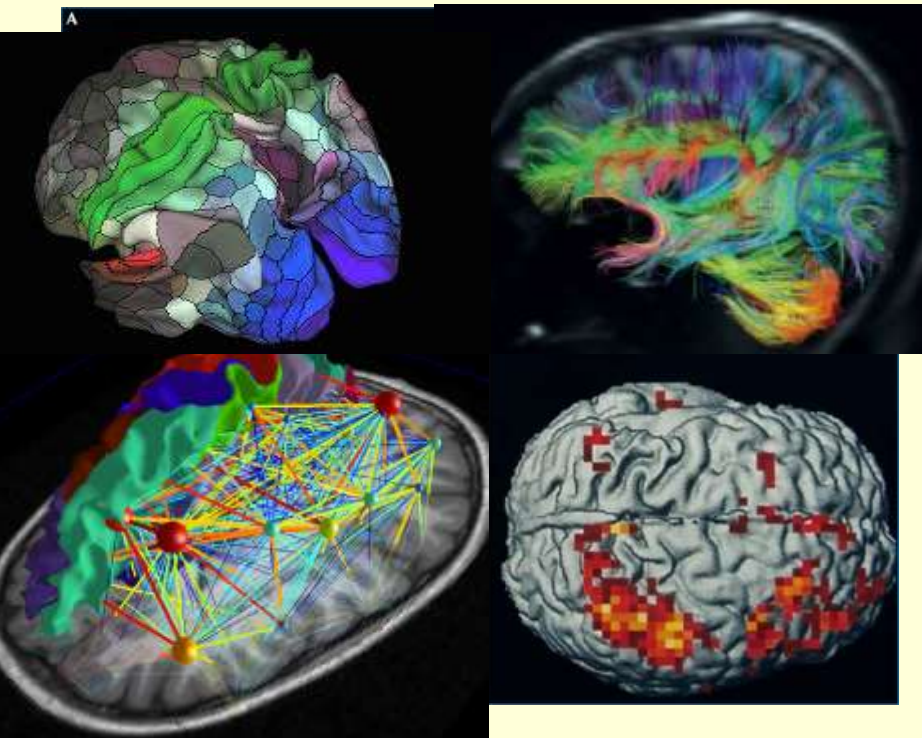
6

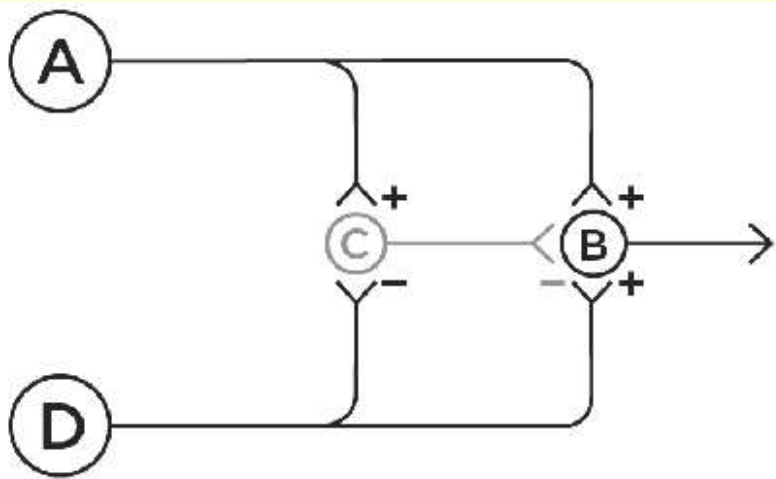


Cours 2 : Des structures cérébrales

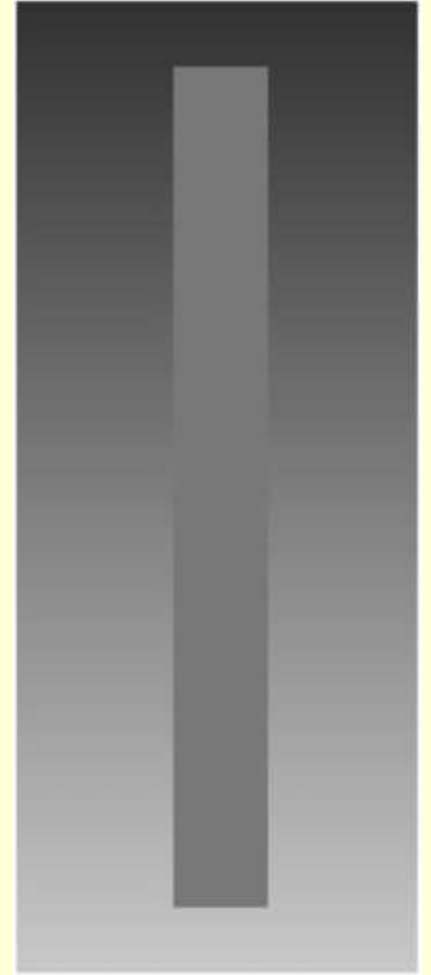
reliées en réseaux de milliards de neurones...

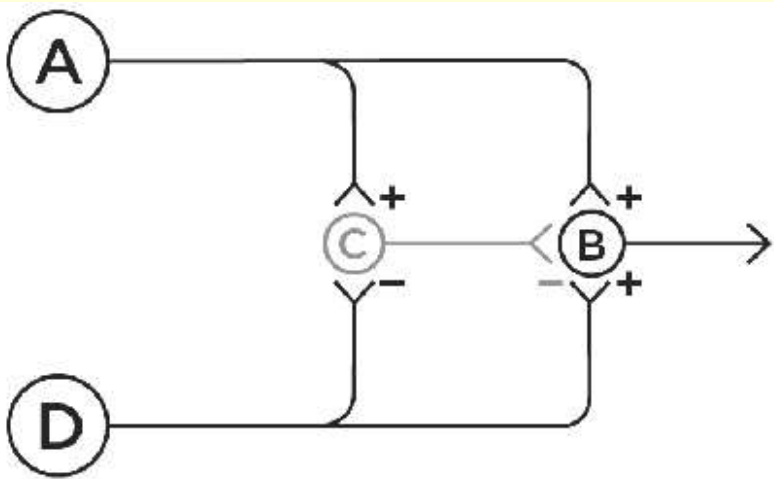
...qui oscillent et se synchronisent à l'échelle du cerveau entier



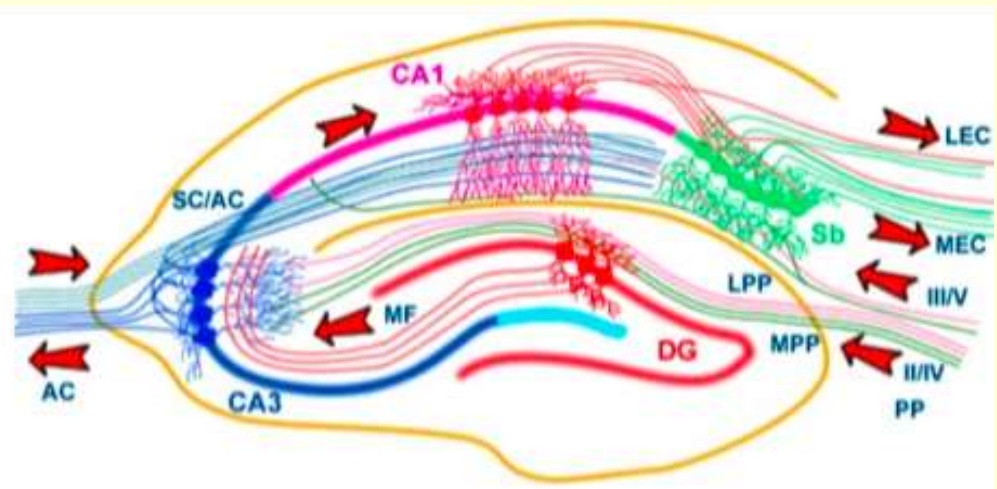


On est passé de quelques neurones...

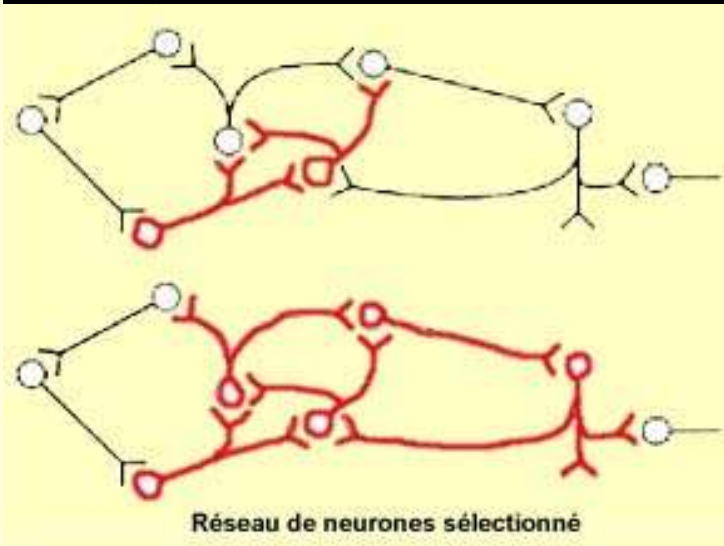
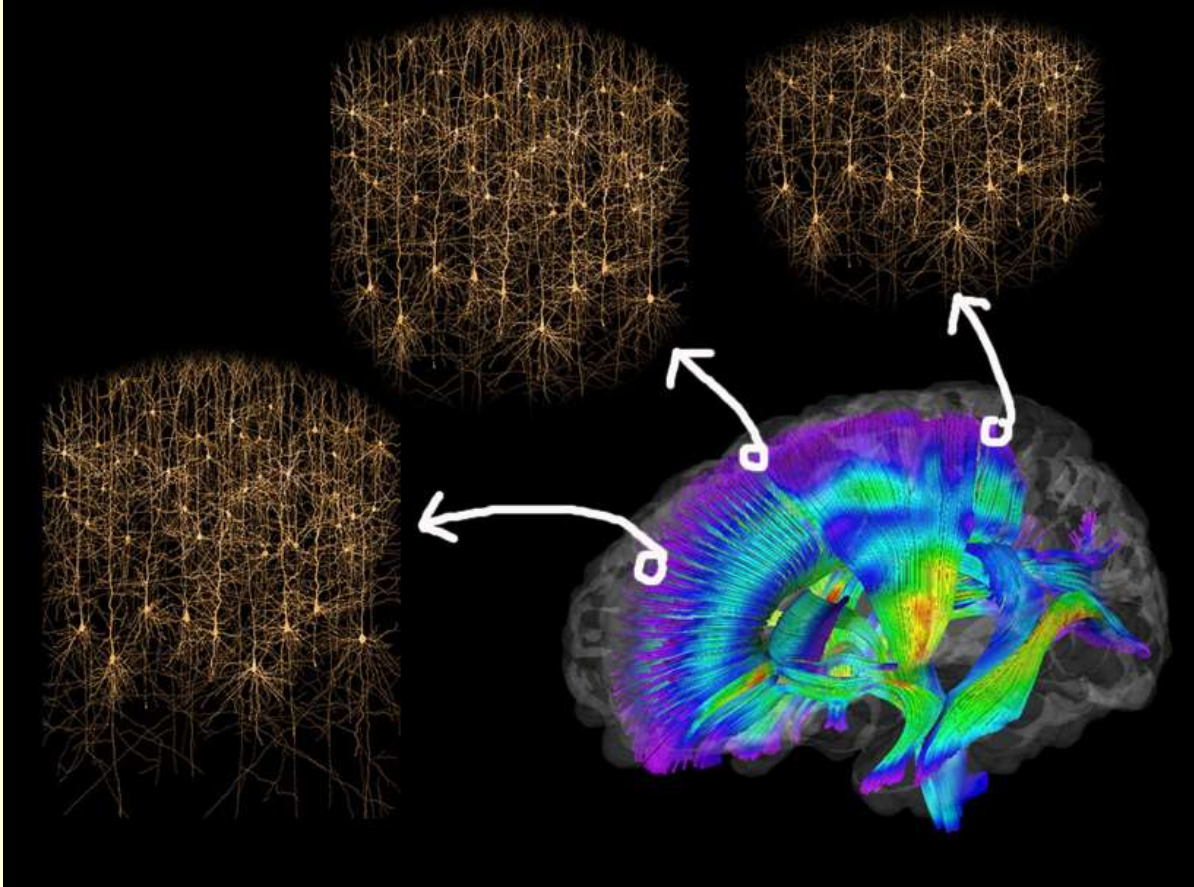




On est passé de quelques neurones...

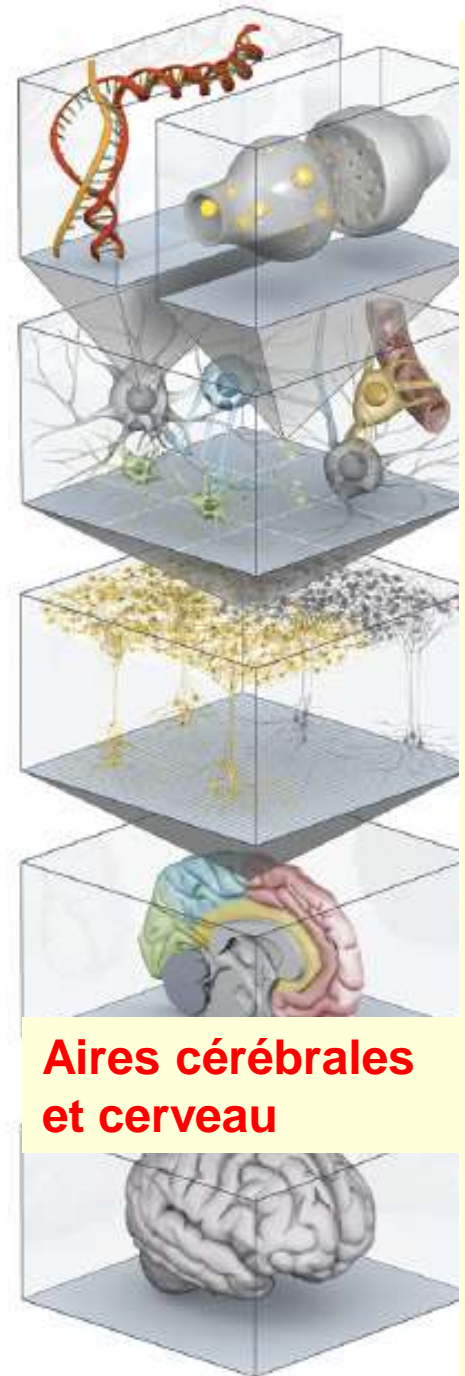


...à des circuits de millions de neurones dans des structures (comme l'hippocampe)



-Cellules
(neurones)

Circuits de
neurones



**Aires cérébrales
et cerveau**





F. JOS. GALL.
Docteur en Médecine à Nancy.

**Franz Joseph
Gall (1757-1828)**

Paris, 1810.



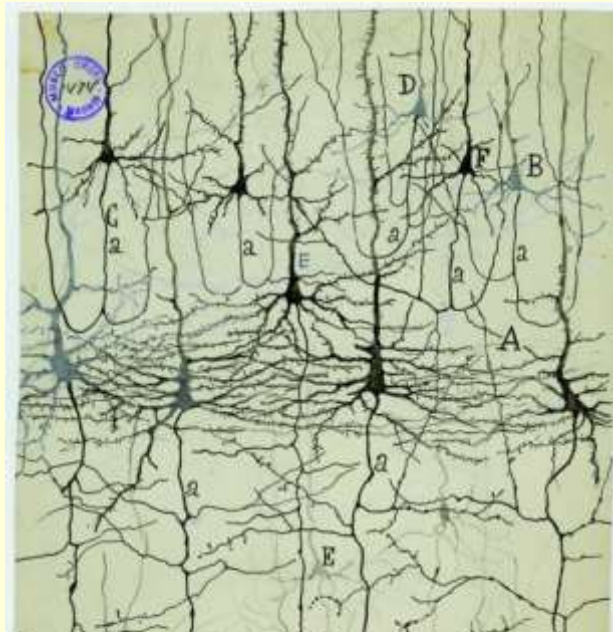
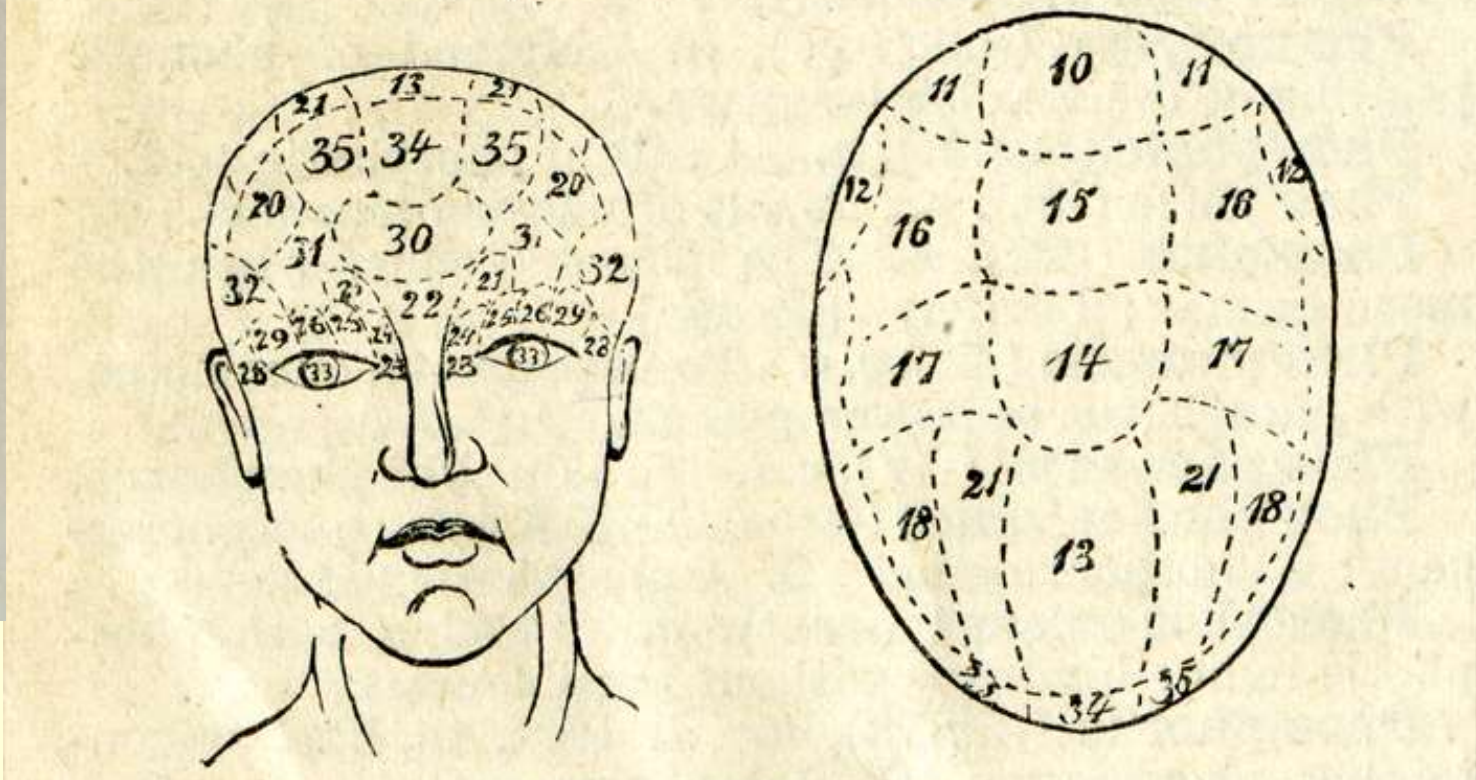


F. JOSEPH GALL,
Docteur en Médecine à Vienne.

**Franz Joseph
Gall (1757-1828)**

père de la
phrénologie,

une théorie de la
localisation des
fonctions
cérébrales
dans le cerveau.



Ce qui allait un peu
à l'encontre du
paradigme dominant
de l'époque qui était
que le système
nerveux était
constitué d'un
maillage fusionné

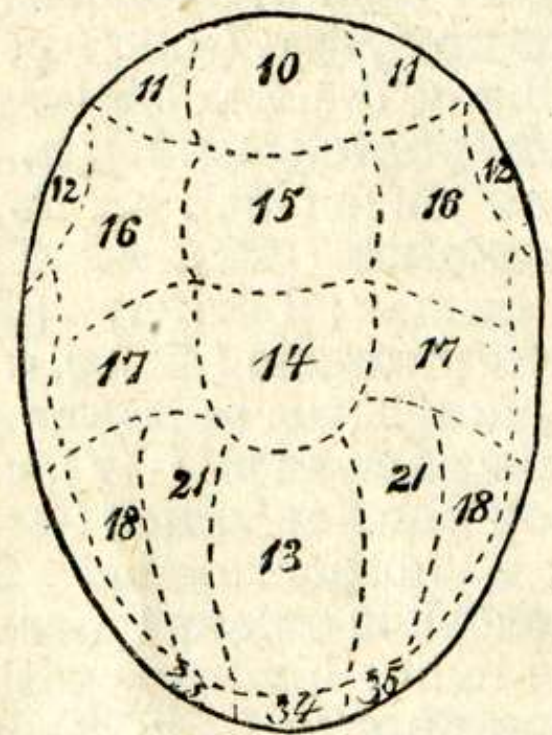


F. JOSEPH GALL
Docteur en Médecine à Vienne.

Franz Joseph Gall (1757-1828)

père de la **phrénologie**,

une théorie de la **localisation des fonctions** cérébrales dans le cerveau.



A Chart of Phrenology.

1 Amativeness ; 2 Philoprogenitiveness ; 3 Concentrativeness ; 3 a Inhabitiveness ; 4 Adhesiveness ; 5 Combaticiveness ; 6 Destructiveness ; 6 a Alimentiveness ; 7 Secretiveness ; 8 Acquisitiveness ; 9 Constructiveness ; 10 Self-esteem ; 11 Love of Approbation ; 12 Cautiousness ; 13 Benevolence ; 14 Veneration ; 15 Firmness ; 16 Conscientiousness ; 17 Hope ; 18 Wonder ; 19 Ideality ; 19 a (Not determined) ; 20 Wit ; 21 Imitation ; 22 Individuality ; 23 Form ; 24 Size ; 25 Weight ; 26 Coloring ; 27 Locality ; 28 Number ; 29 Order ; 30 Eventuality ; 31 Time ; 32 Tune ; 33 Language ; 34 Comparison ; 35 Causality. [Some raise the number of organs to forty-three.]



The Boy—what will he become?



Pour Gall, une capacité particulièrement développée inscrivait sa trace par une **bosse sur le crâne**.

Par dérision, on parle encore de la “**bosse des mathématiques**” ou la “**bosse des affaires**”...



Malgré tout, l'idée que le cerveau était composé de plusieurs parties discrètes associées à des fonctions psychologiques distinctes était très **attrayante** et allait s'imposer pour longtemps.

De sorte que plusieurs neurobiologistes pensent que nous sommes encore aujourd'hui **pris au piège** par les **catégories fonctionnelles** de la **psychologie cognitive**.

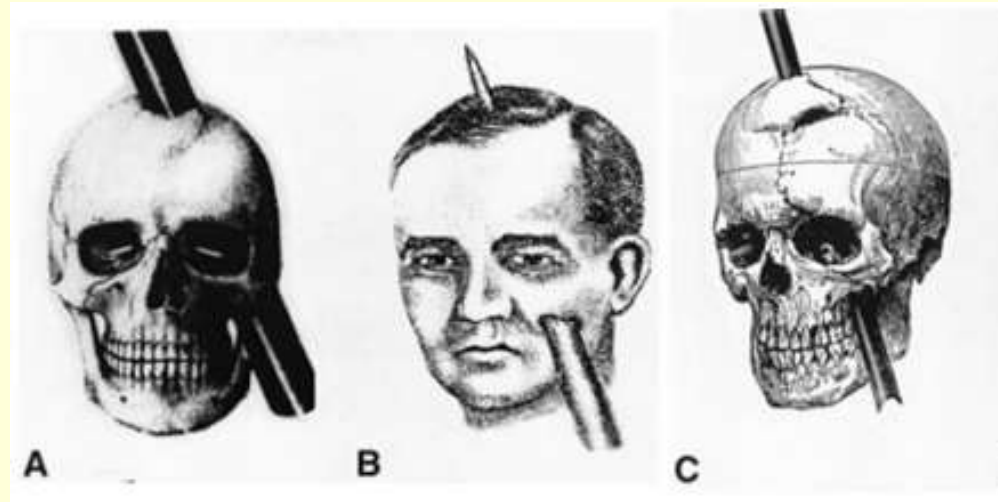
13 septembre 1848,
Cavendish, Vermont, États-Unis

Un ouvrier des chemins de fer,
Phineas Gage, eut le crâne
traversé par une barre de fer
suite à une explosion.



13 septembre 1848,
Cavendish, Vermont, États-Unis

Contre toute attente, Gage se remit de son accident, mais **son comportement changeât radicalement.**



Jusque-là considéré comme sérieux, attentionné, sociable, fiable et ayant un bon jugement, l'accident le laissa dans un état **instable** et **asocial**.

*“Gage provided the first clues that there are systems in the human brain dedicated to the **personal** and **social** dimensions of reasoning.”*

Review of Antonio Damasio's "Descartes Error"

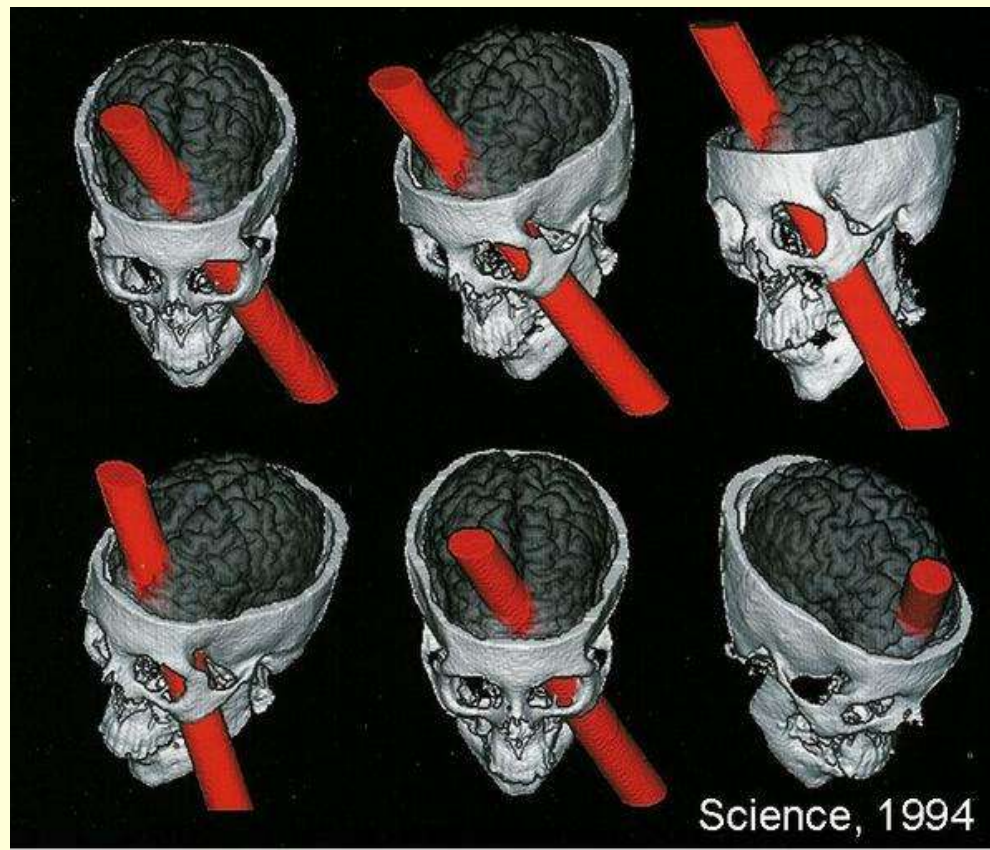
<http://www.metanexus.net/book-review/review-antonio-damasios-descartes-error>



The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient.

Damasio H¹, Grabowski T, Frank R, Galaburda AM, Damasio AR.
Science. 1994 May 20;264(5162):1102-5.

L'étude de ses lésions par Hanna et Antonio Damasio et leur collègues permet de mieux comprendre les **fonctions du lobe frontal**.



Paris, 1861.



TOUT PARIS

AU ROI DU CAFE
UN DINDRE ET UN
VINGT-SPIRITUEUX
40 50

230 - Rue de la Boquette (XI^e arr^t)
Vue prise de la Place Voltaire



Le neurochirurgien français **Paul Broca** examine le cerveau d'un de ses patients qui vient de décéder.

Ce patient ne pouvait prononcer d'autres syllabes que «tan», bien qu'il comprenait ce qu'on lui disait.

Sans être atteint d'aucun trouble moteur de la langue ou de la bouche qui aurait pu affecter son langage, ce patient ne pouvait produire aucune phrase complète ni exprimer ses idées par écrit.

En faisant l'autopsie de son cerveau, Broca a trouvé une lésion importante dans le **cortex frontal inférieur gauche**.



Par la suite, Broca a étudié huit patients aux déficits semblables qui tous avaient une lésion dans l'hémisphère frontal gauche. Cela l'amène à déclarer son célèbre « Nous parlons avec l'hémisphère gauche ».



Dix ans plus tard, en **1871**, **Carl Wernicke**, un neurologue allemand, met en évidence une autre région impliquée celle-là dans la compréhension du langage.

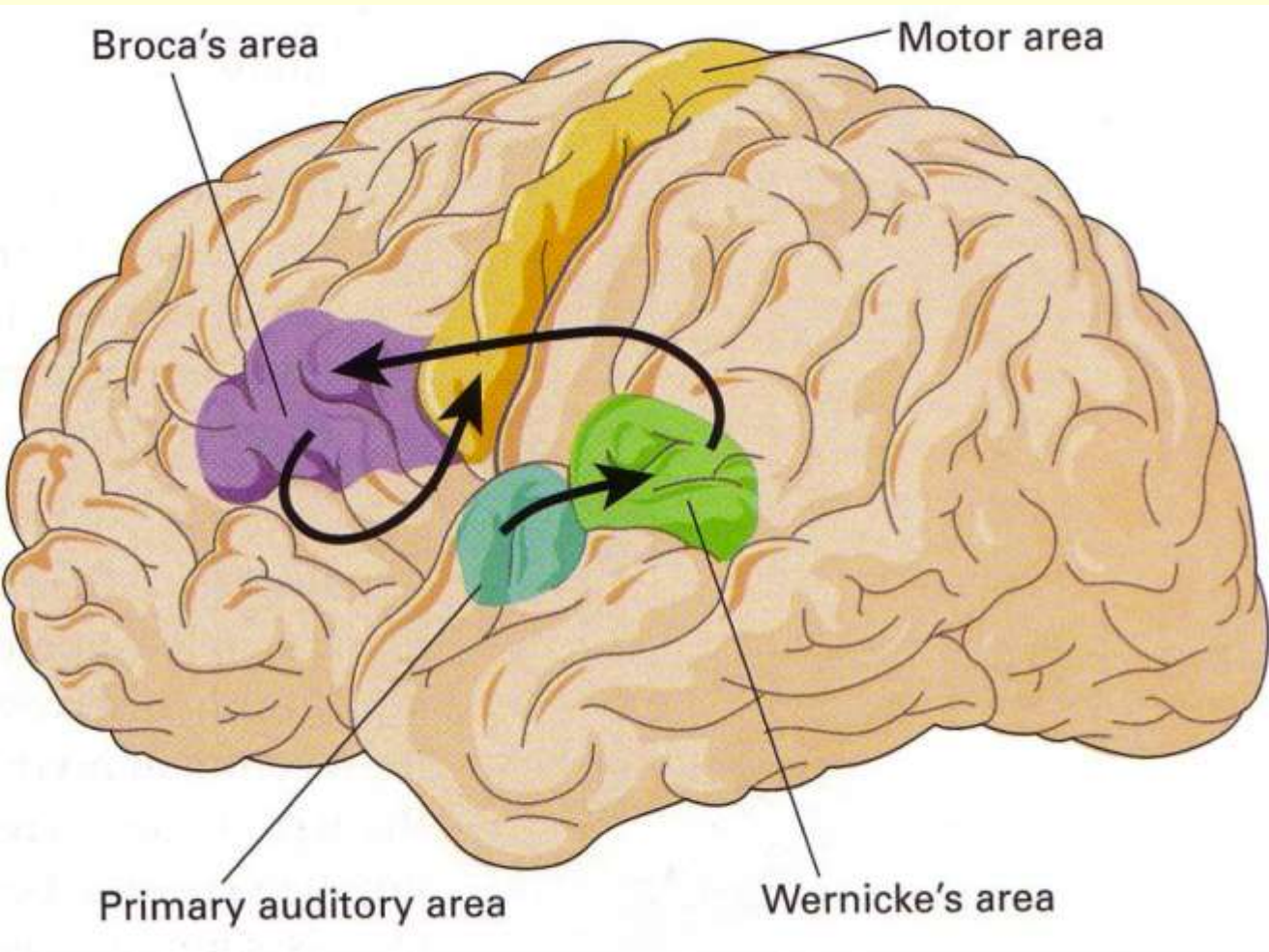


Elle est située dans la **partie postérieure du lobe temporal gauche**.

Les patients qui ont une lésion à cet endroit peuvent parler, mais leur discours est souvent **incohérent et dénué de sens**.

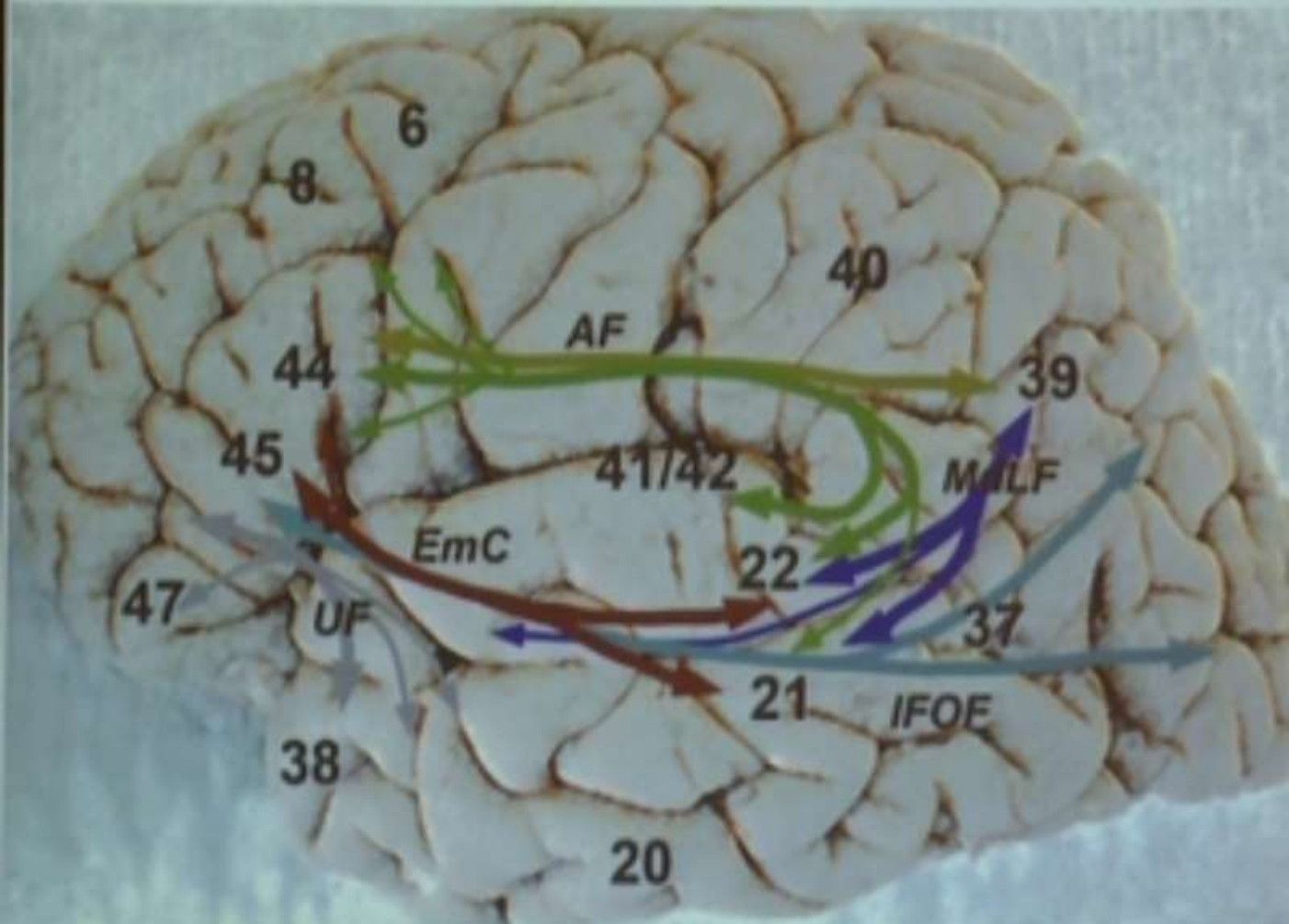
(« **Aphasie de Wernicke** »)

Mène à une première compréhension **très schématique** du langage.



Connectivité fronto-temporale des aires du langage

Axer, H., Klingner, C. M., & Prescher, A. (2013). Fiber anatomy of dorsal and ventral language streams. *Brain and Language*, 127(2), 192–204.



Trois principaux faisceaux de connexion fronto-temporale impliquant la « région de Broca »:

Faisceau arqué (*arcuate fasciculus*)

Capsule extrême

Faisceau unciné (*uncinate fasciculus*)

Fig. 4. Connectivity scheme of human language-related areas.

Crédit :
Stanislas
Dehaene

L'objectif de ce cours est de passer d'une

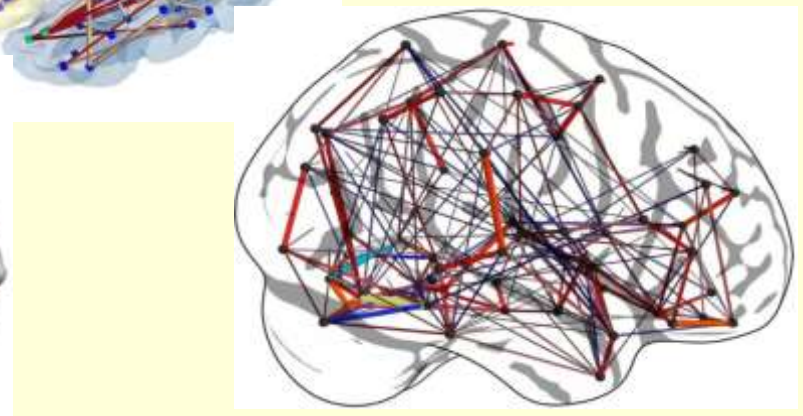
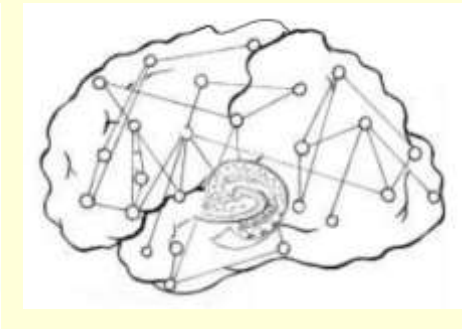
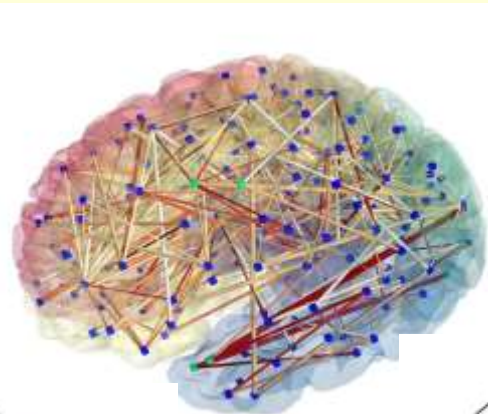
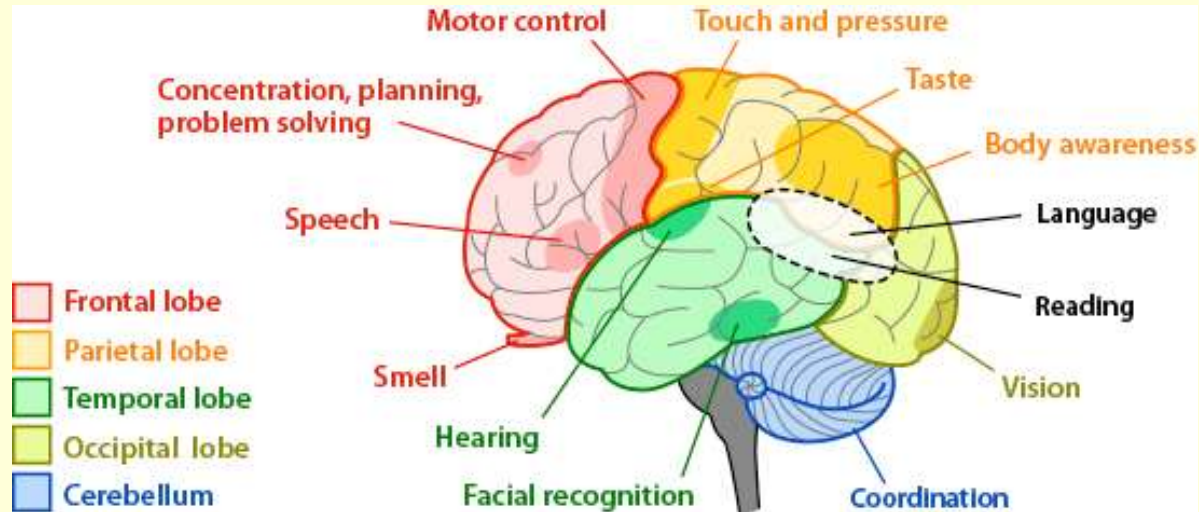
conception traditionnelle du cerveau

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

à une

nouvelle conception du cerveau

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



2015

neurones univers mécanique quanti
Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur...
Les trois infinis : vertige supracon
le petit, le grand et le complexe

l'UPop Montréal vous propose une activité spéciale sur le Mont-Royal
La complexité à pied : quand le Mont-Royal devient notre cerveau !

Départ : samedi 16 mai, 14h., statue des tam-tams

Tous les détails au www.upopmontreal.com



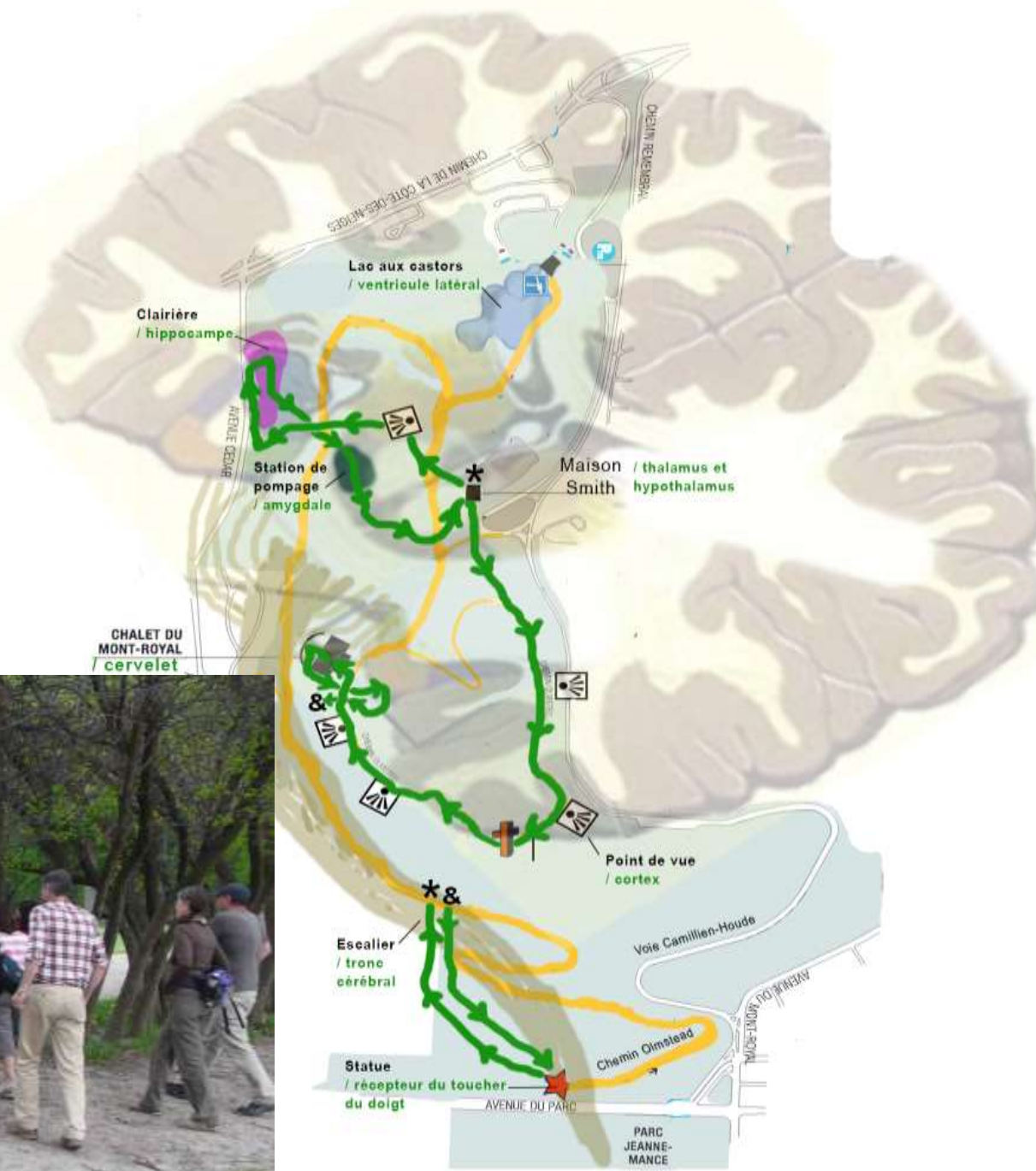


Google

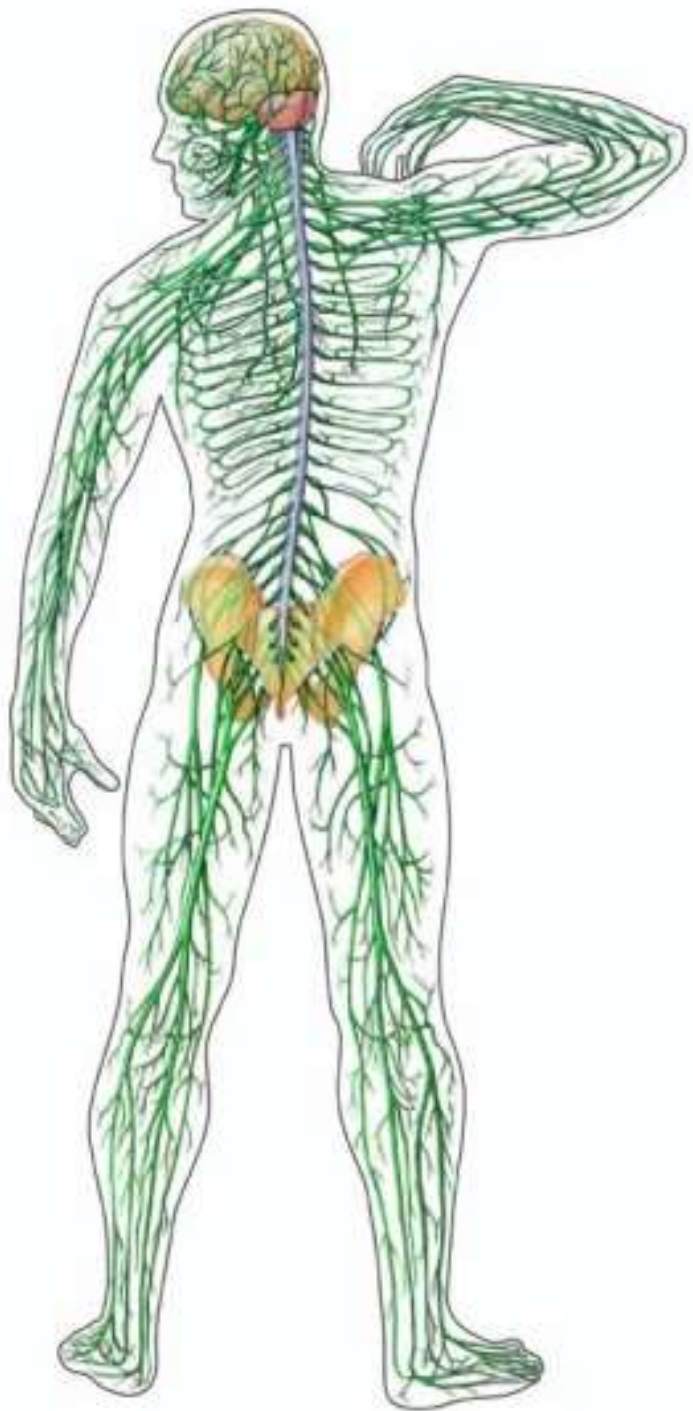


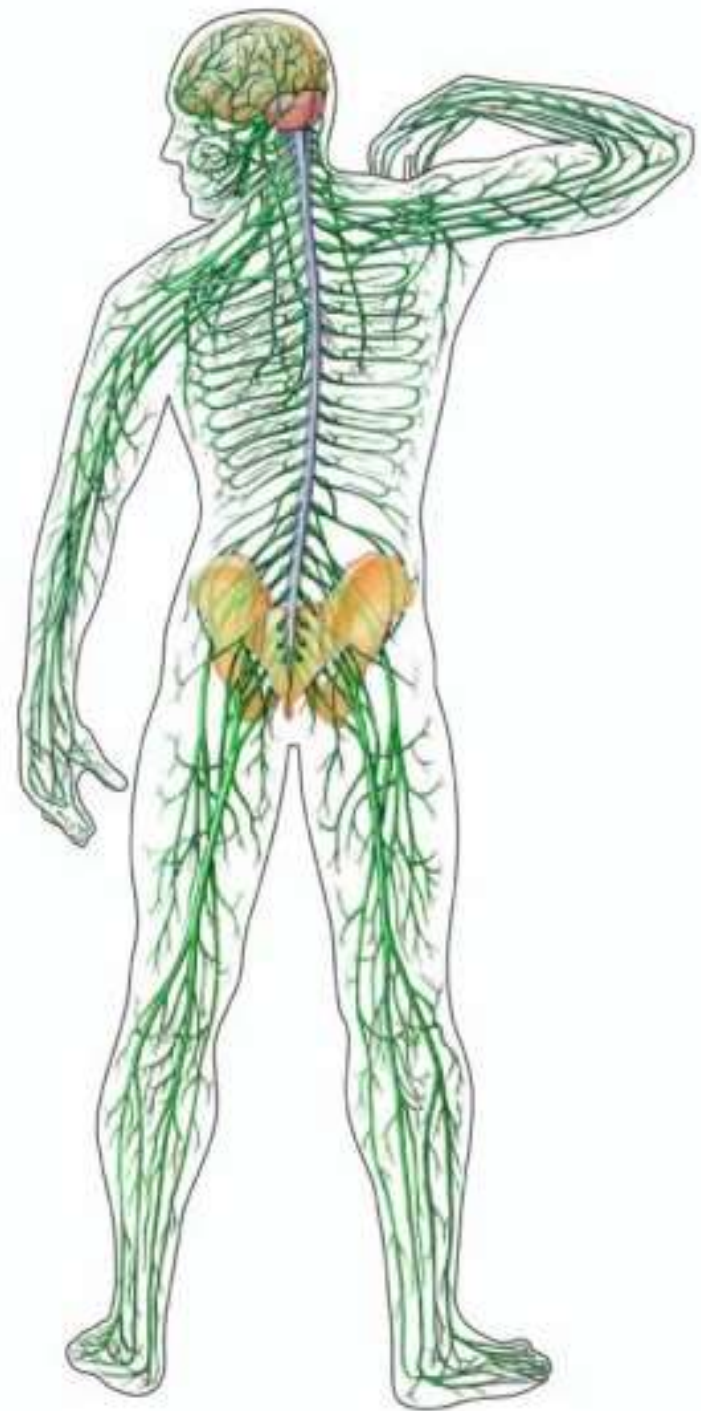
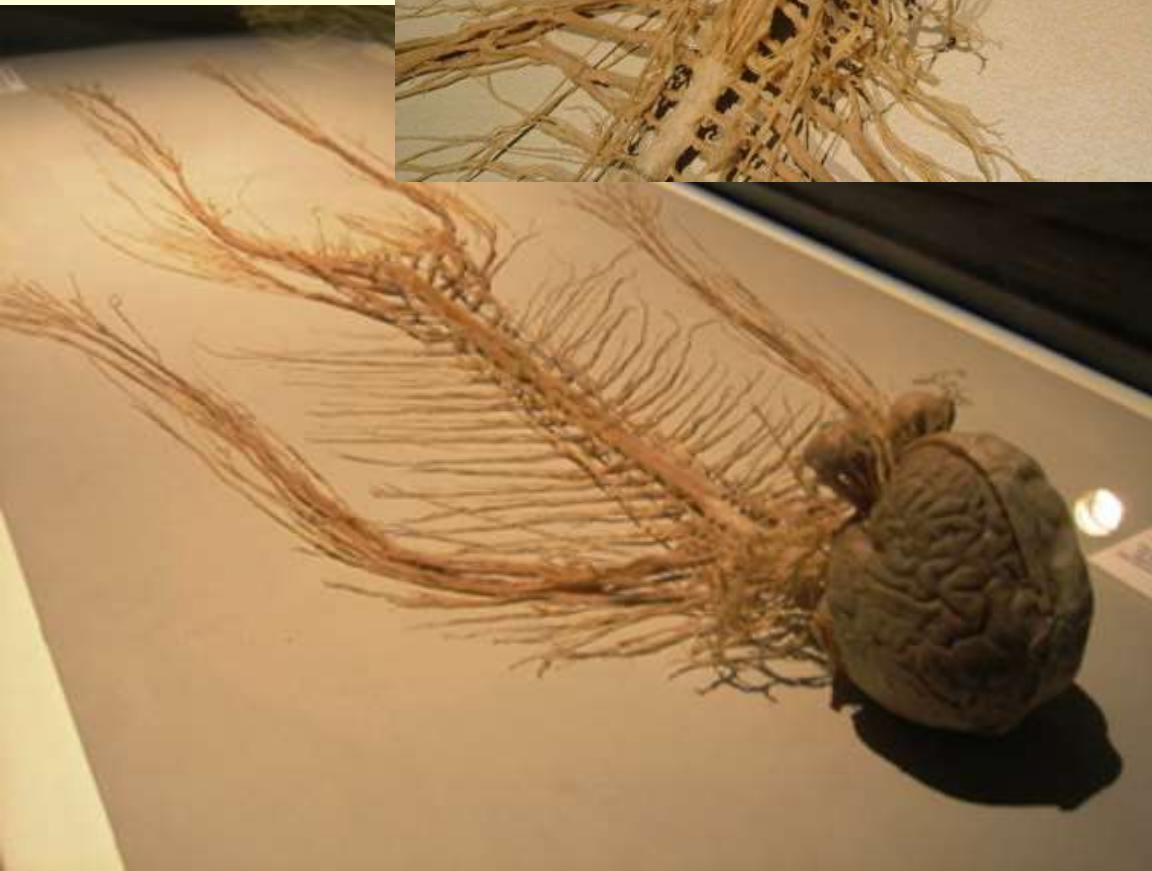












Cortex sensoriel primaire

Neurone de troisième ordre

Neurone de deuxième ordre

Neurone de premier ordre

Colon

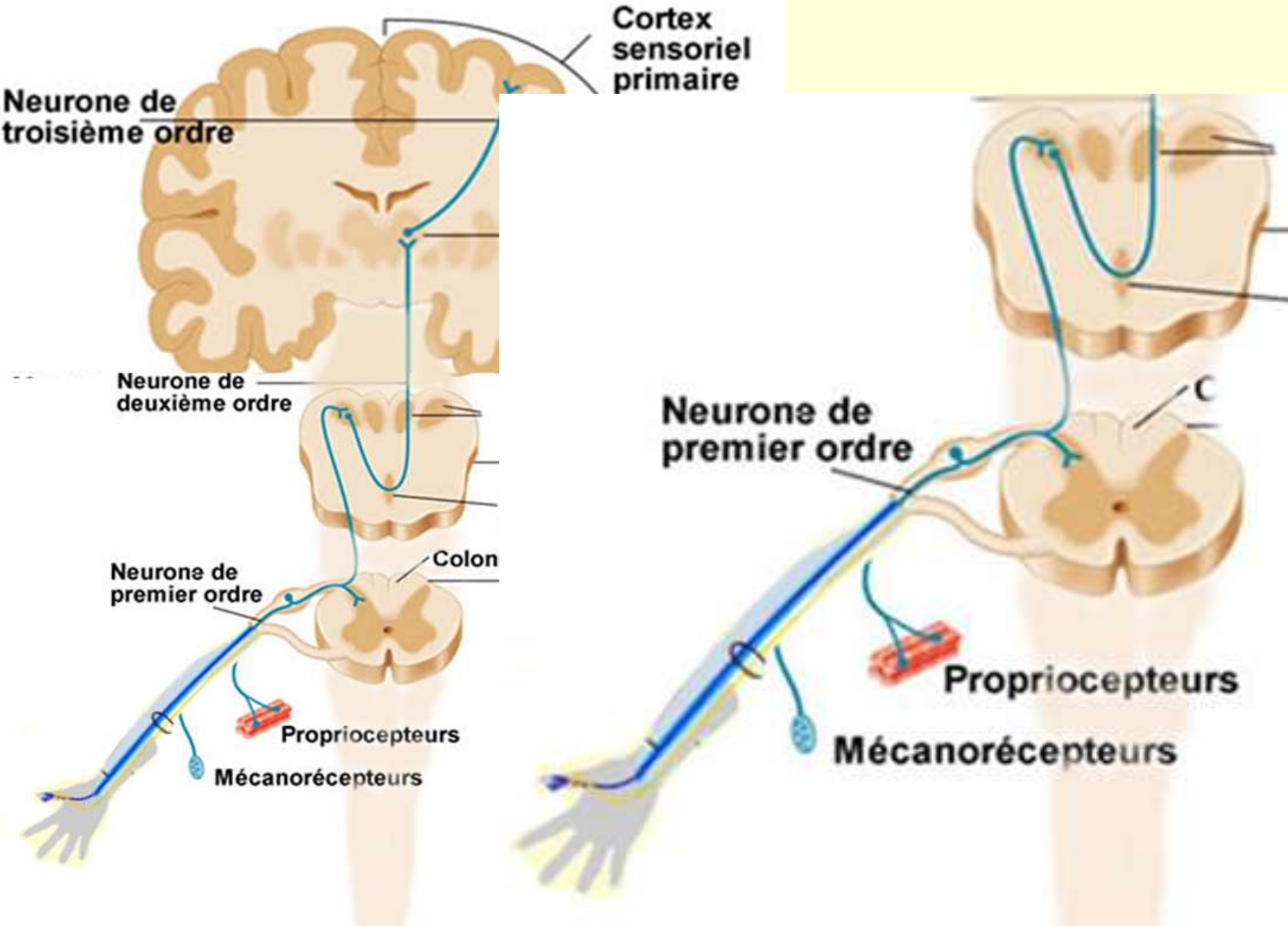
Propriocepteurs

Mécanorécepteurs

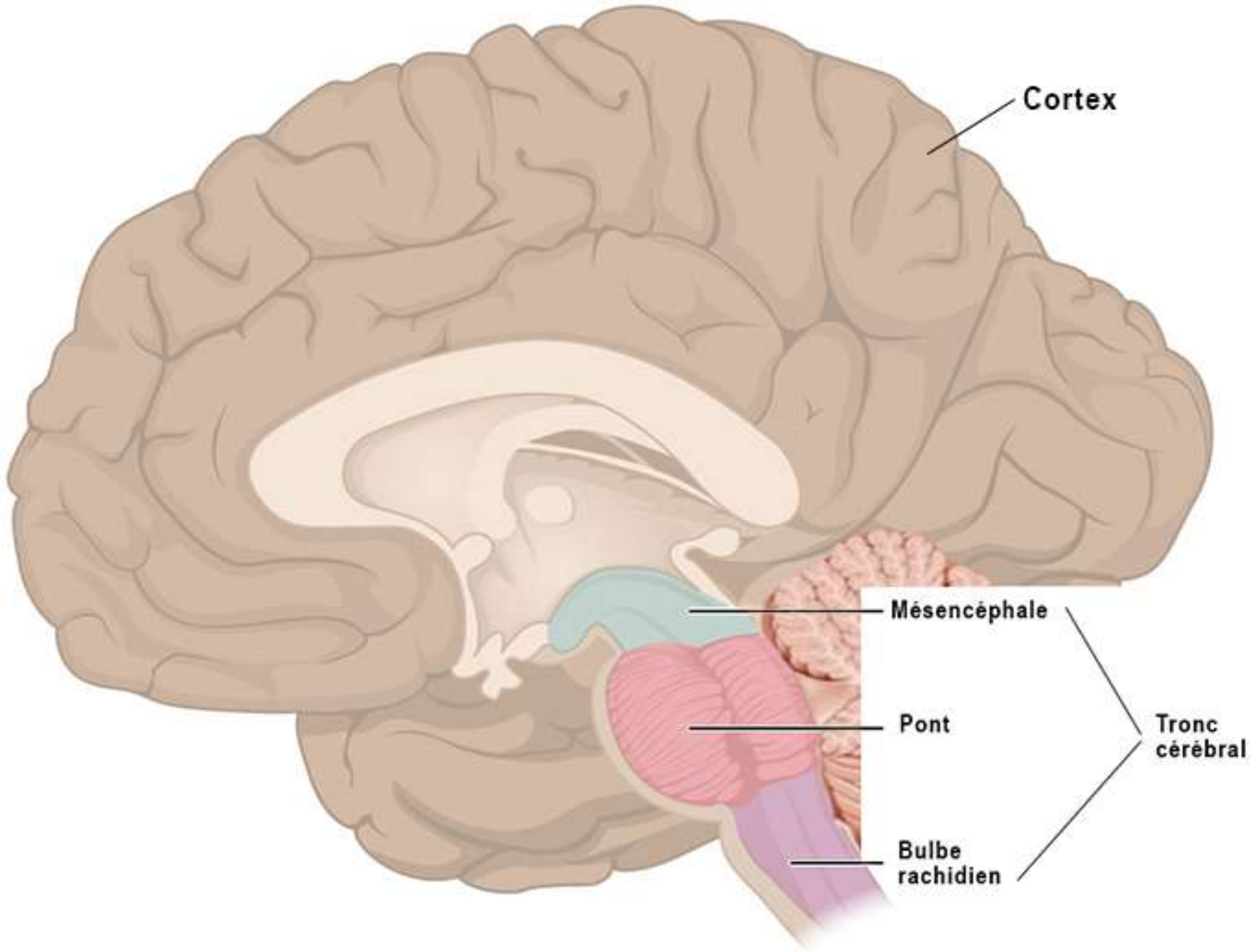
Neurone de premier ordre

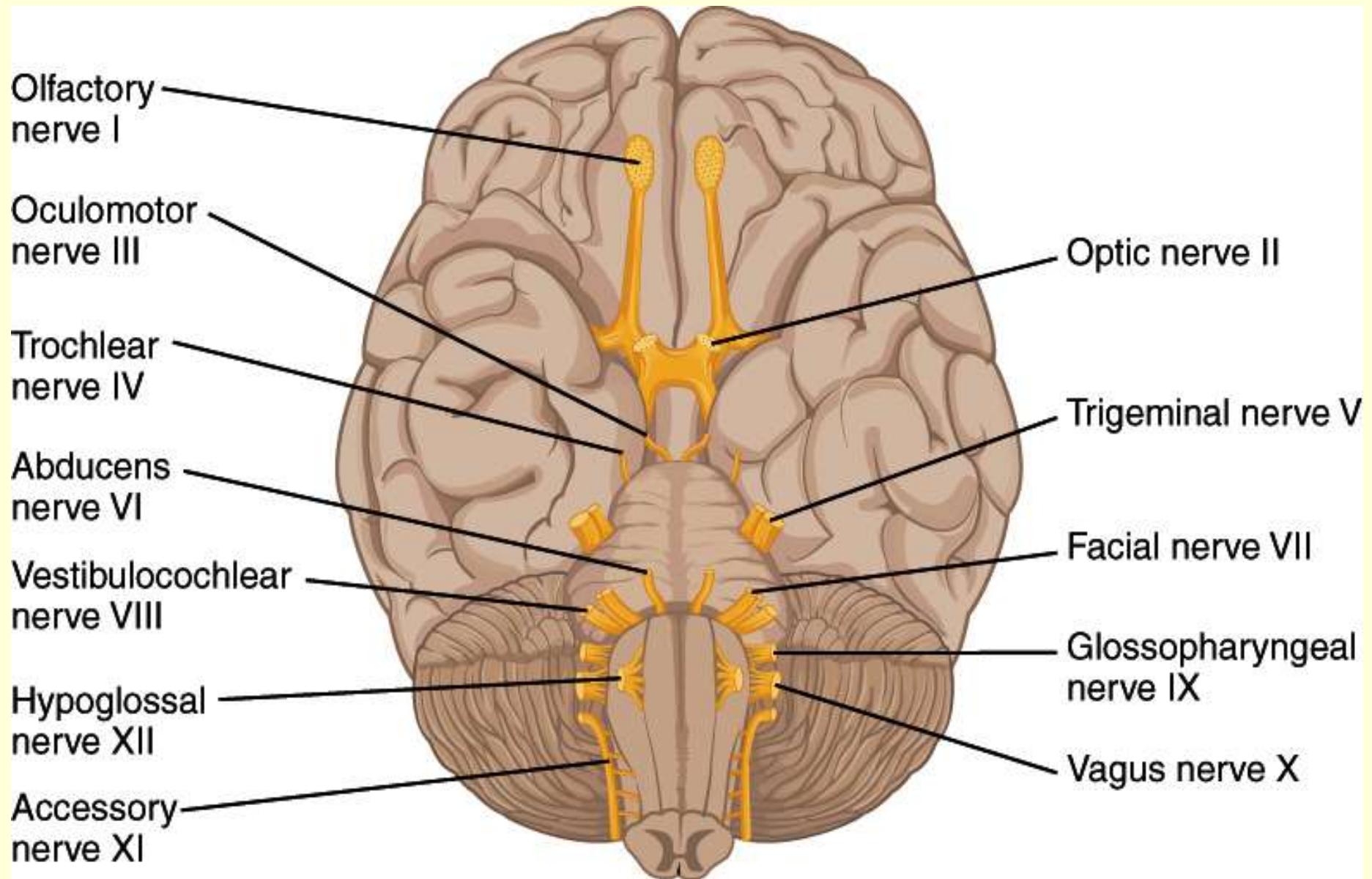
Propriocepteurs

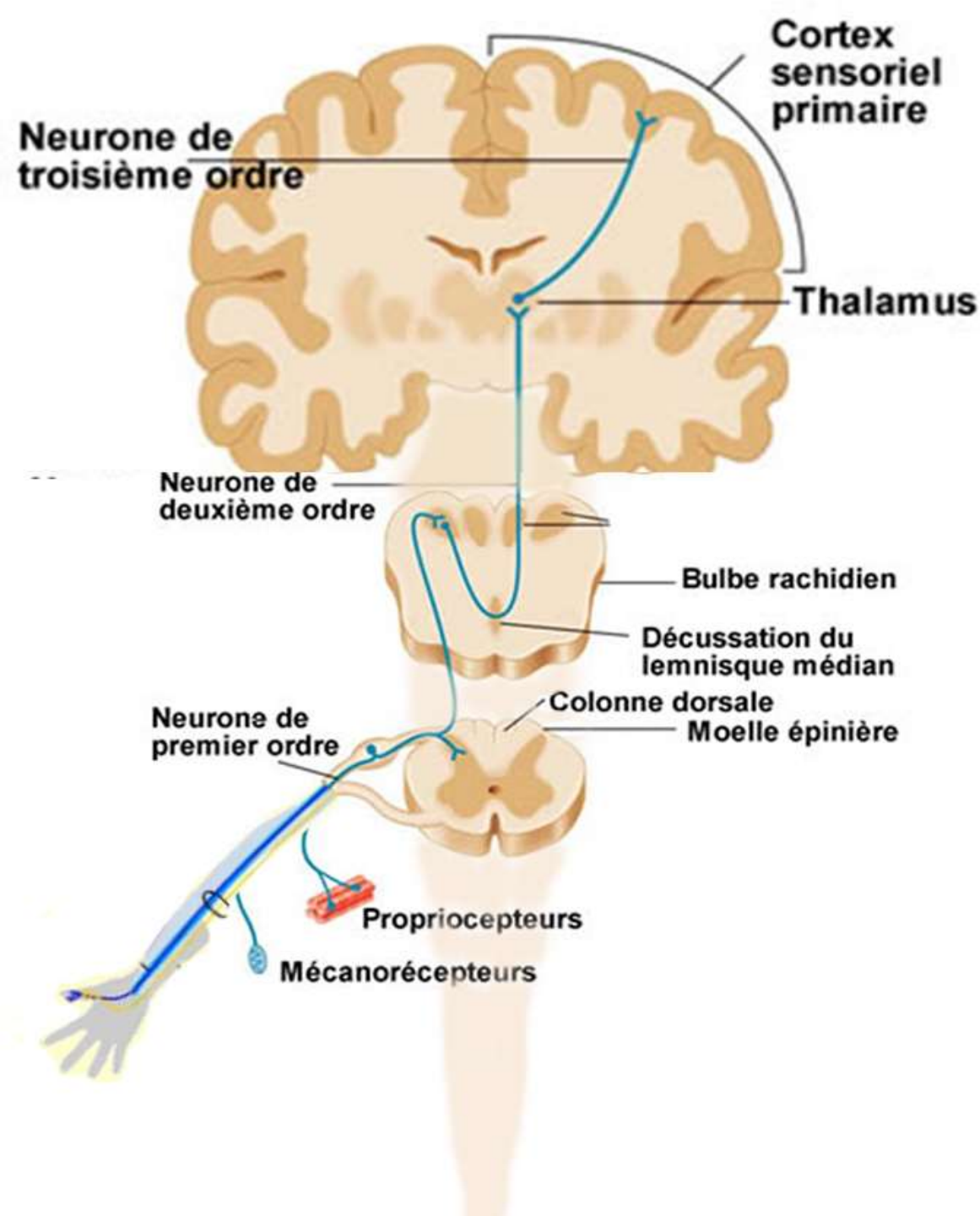
Mécanorécepteurs

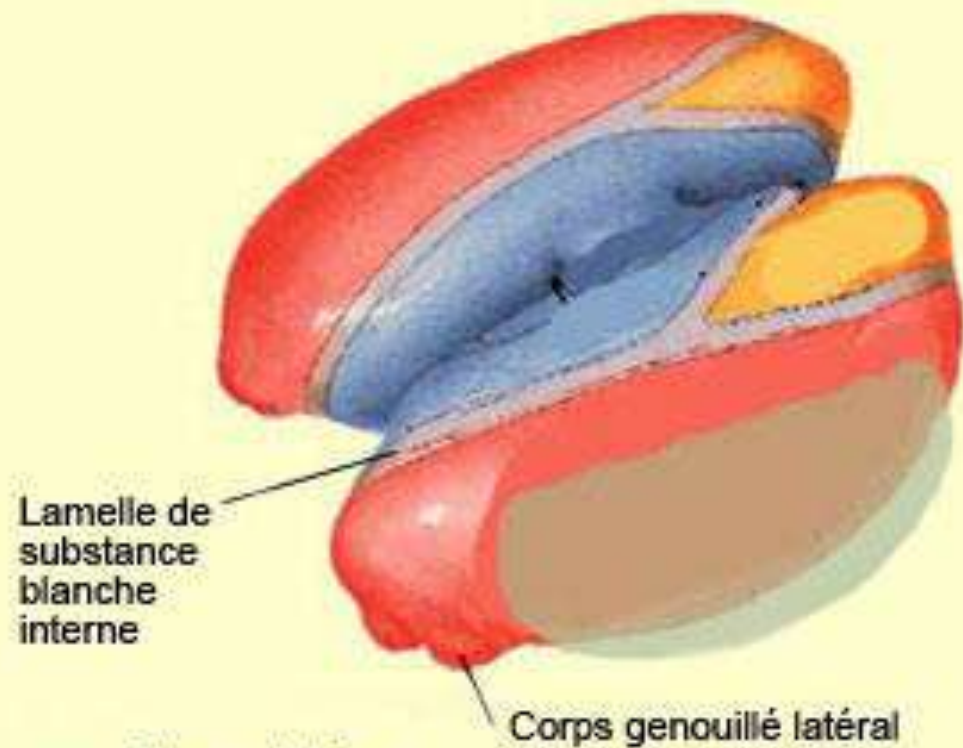
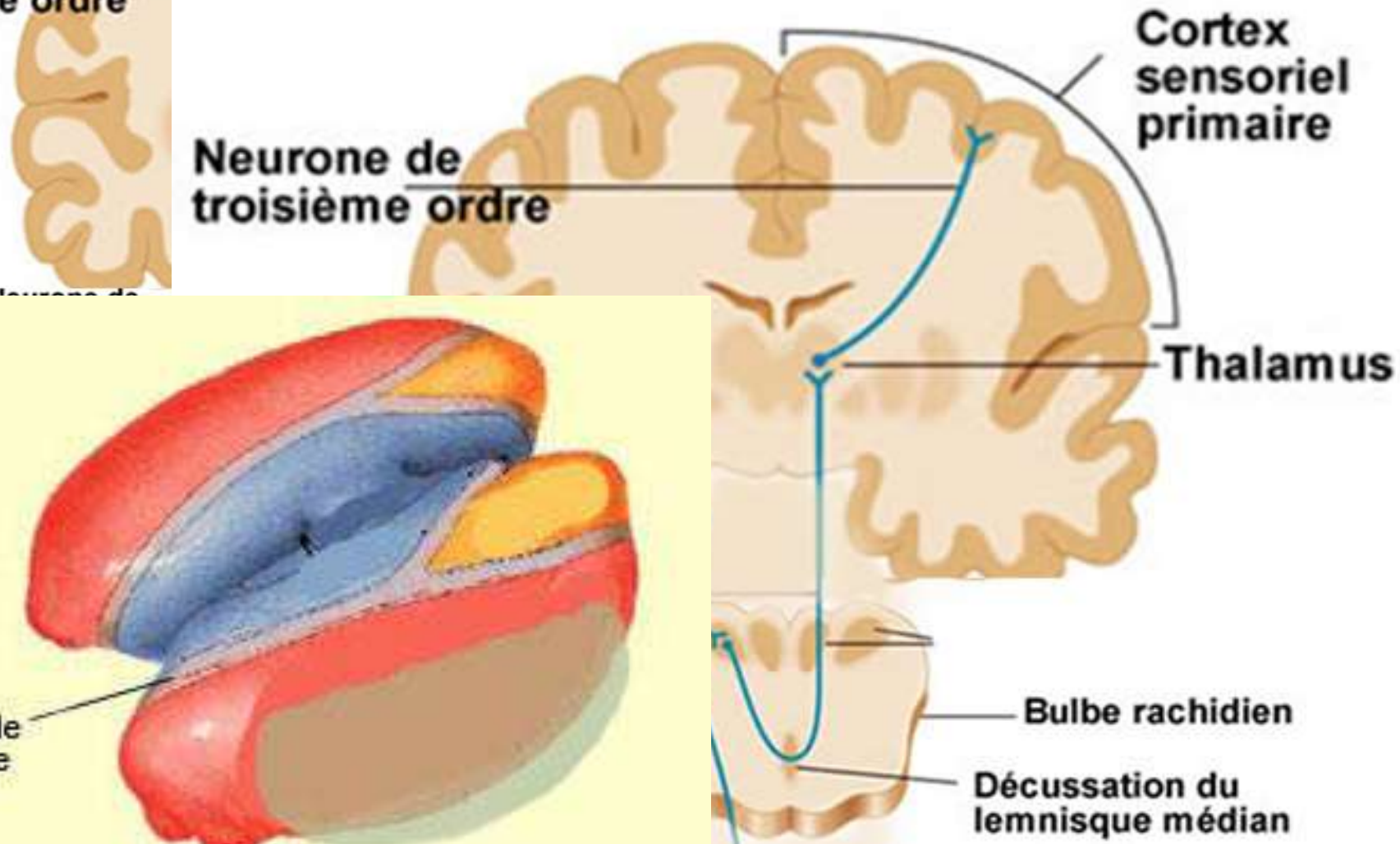










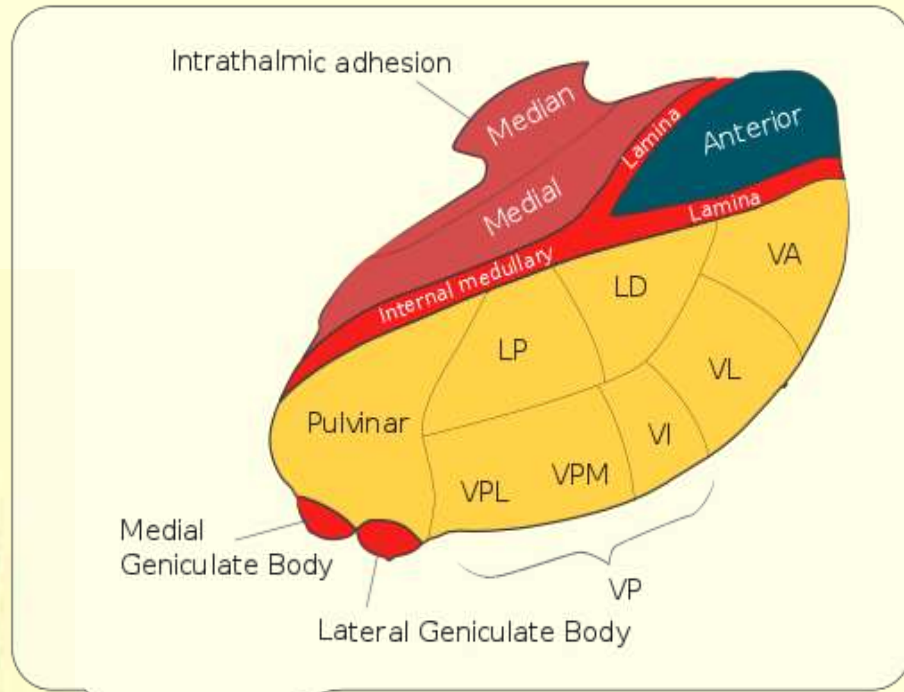
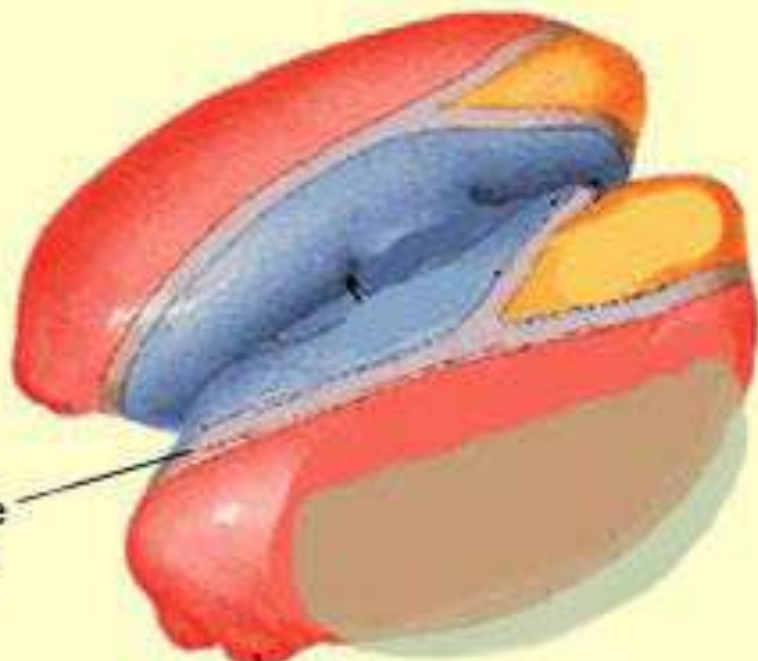


- Noyaux latéraux
- Noyaux médians
- Noyaux antérieurs

Lamelle de substance blanche interne

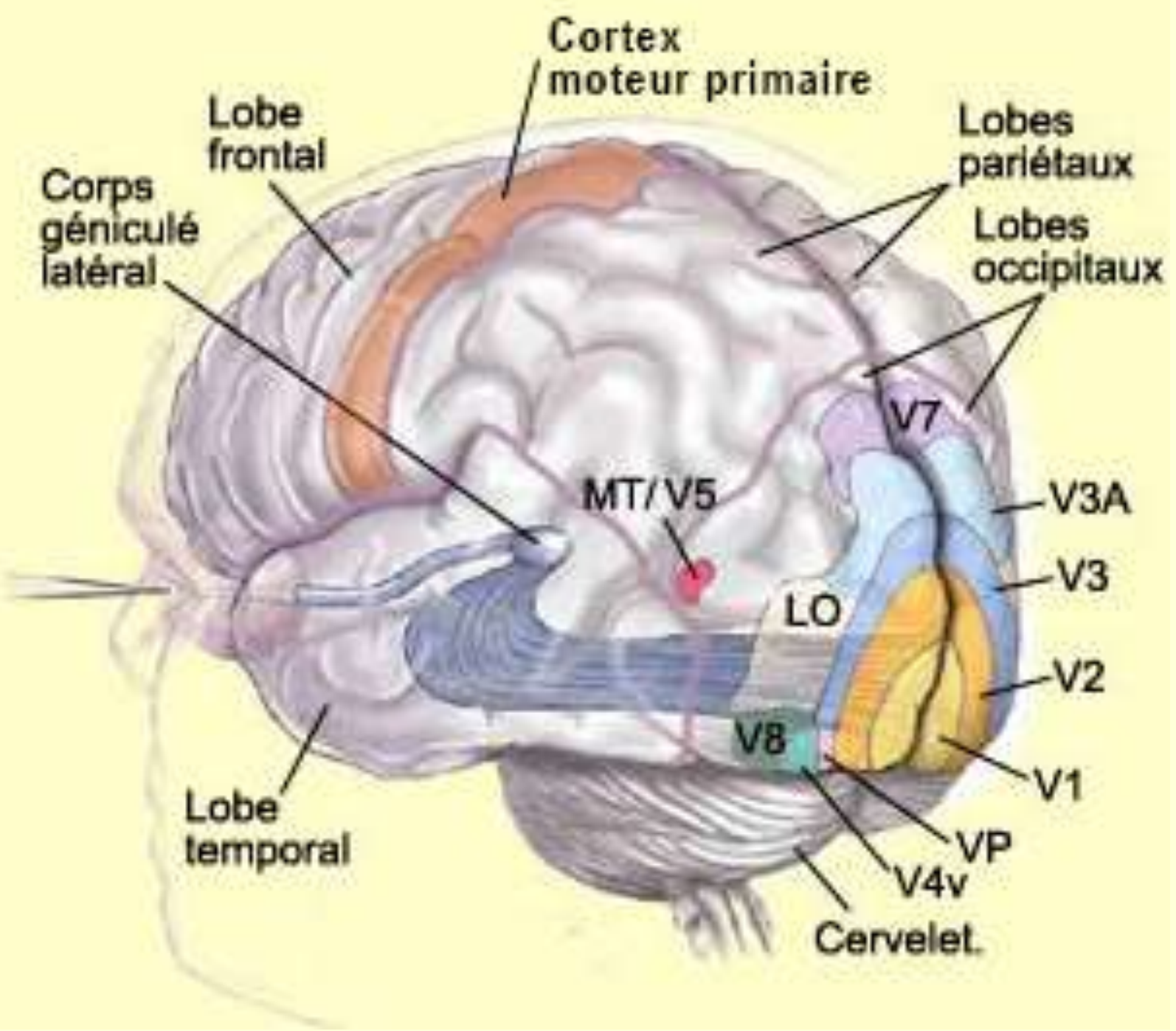
Corps genouillé latéral

- Noyaux latéraux
- Noyaux médians
- Noyaux antérieurs

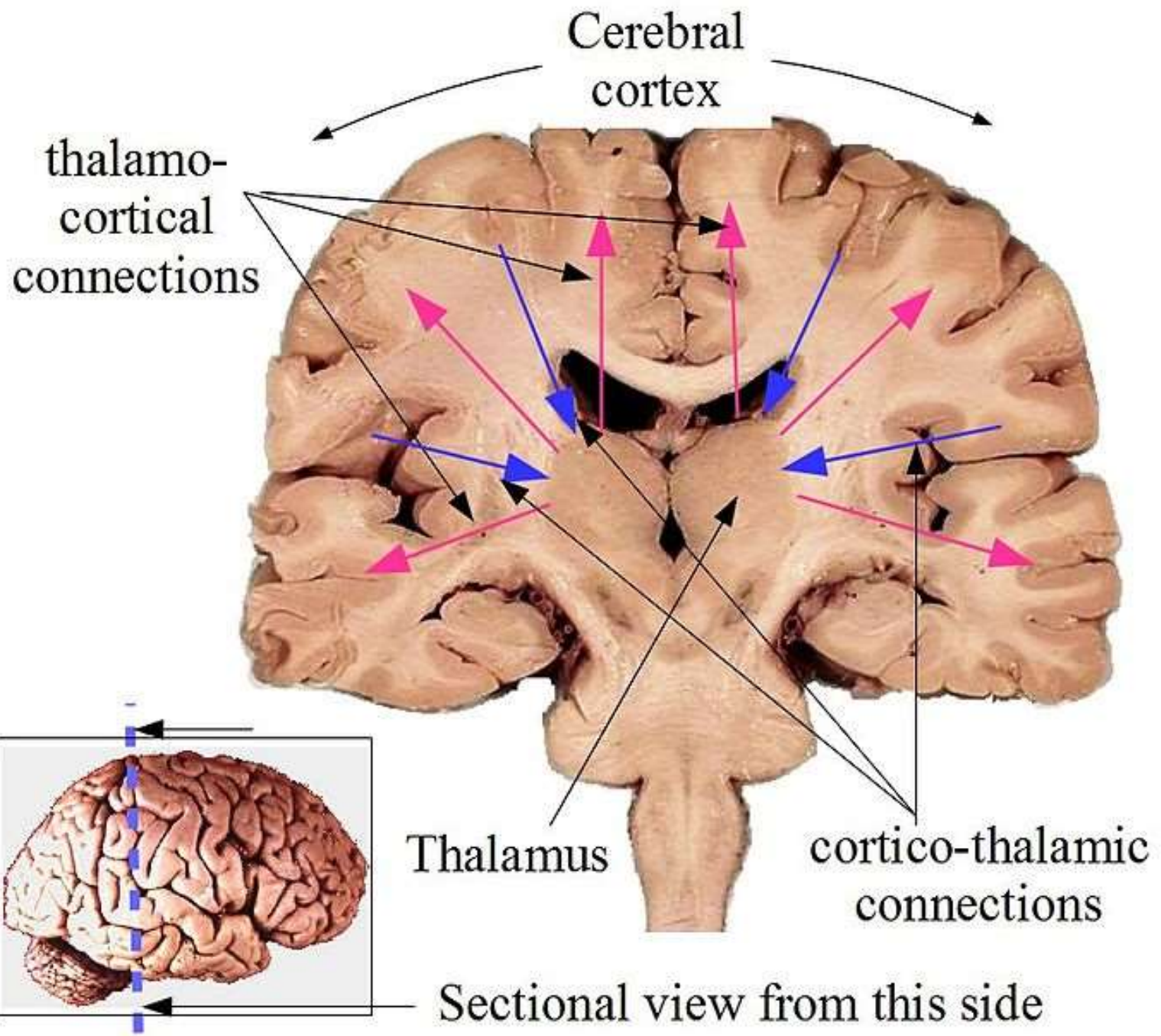


Legend

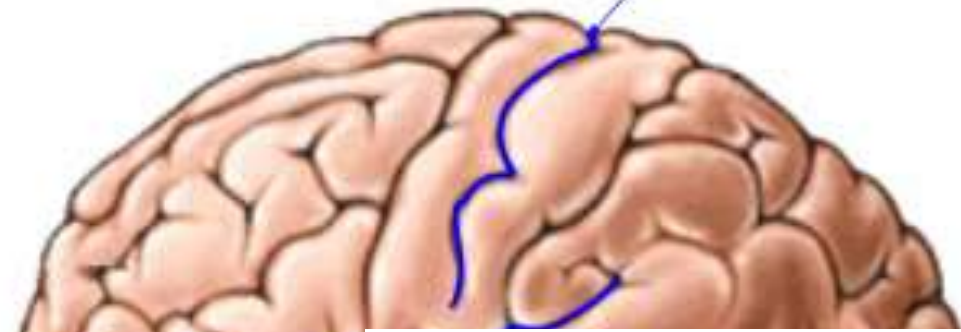
- Anterior nuclei
- Medial nuclei
- Lateral nuclei
- LP - Lateral posterior nucleus
- LD - Lateral dorsal nucleus
- VA - Ventral anterior nucleus
- VL - Ventral lateral nucleus
- VP - Ventral posterior nucleus
 - VI - Ventral intermediate nucleus
 - VPM - Ventral posteromedial
 - VPL - Ventral posterolateral



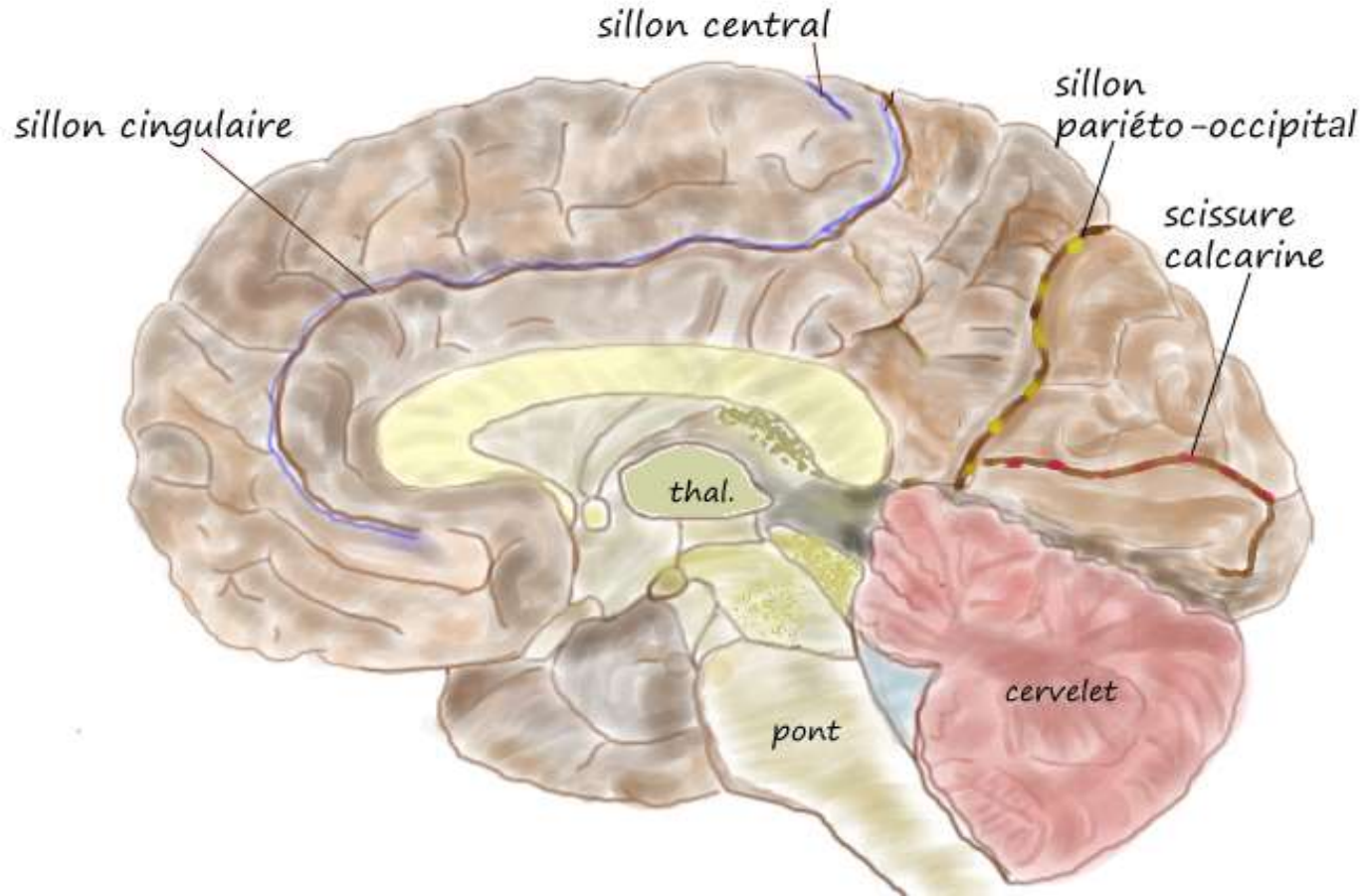




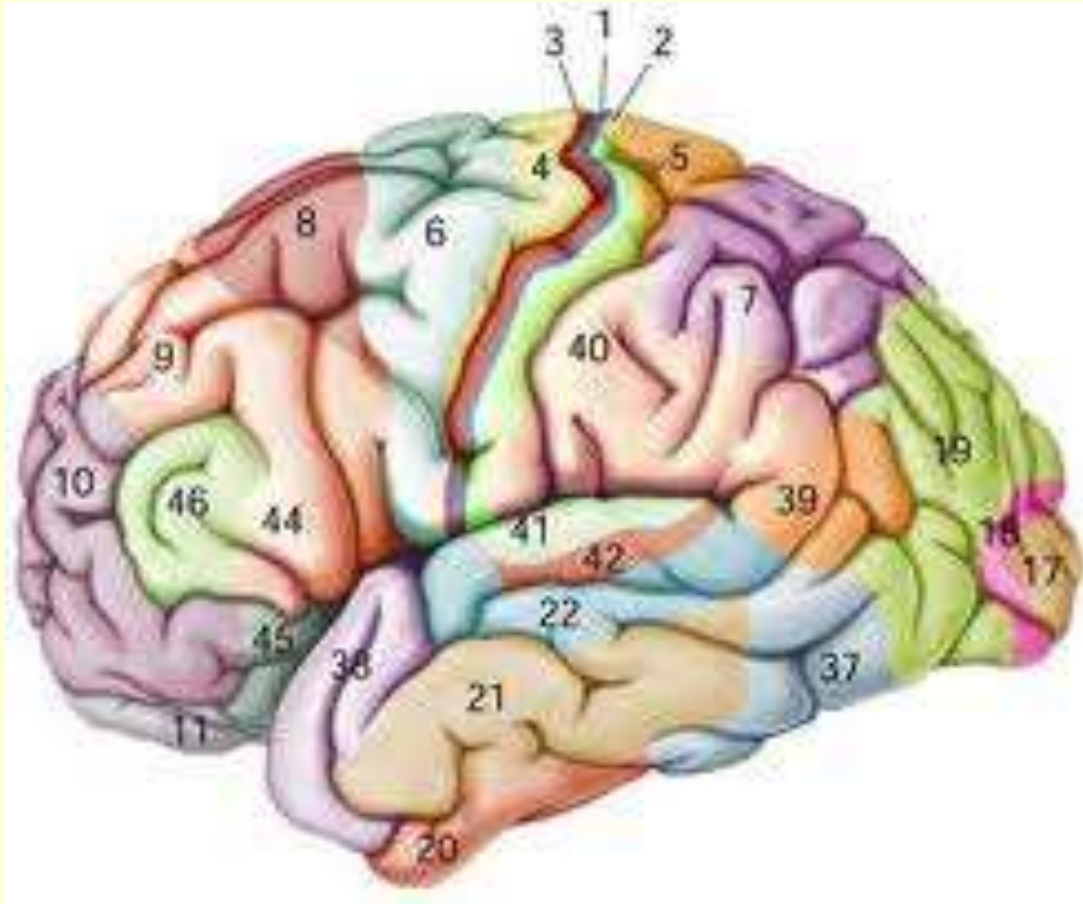
Scissure Centrale
(de Rolando)



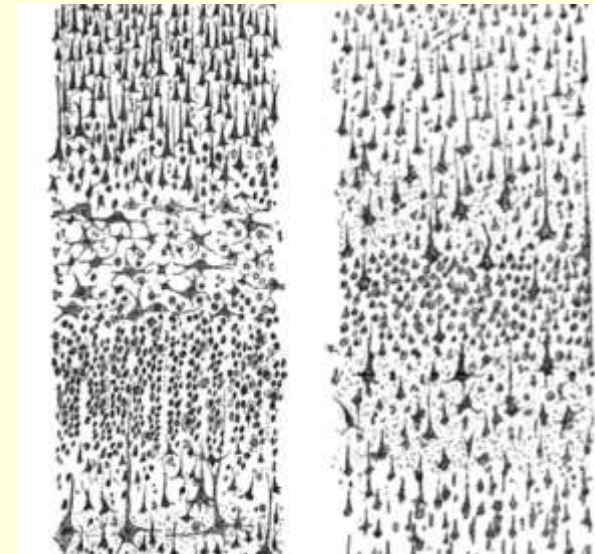
Scissure Latérale
(de Sylvius)

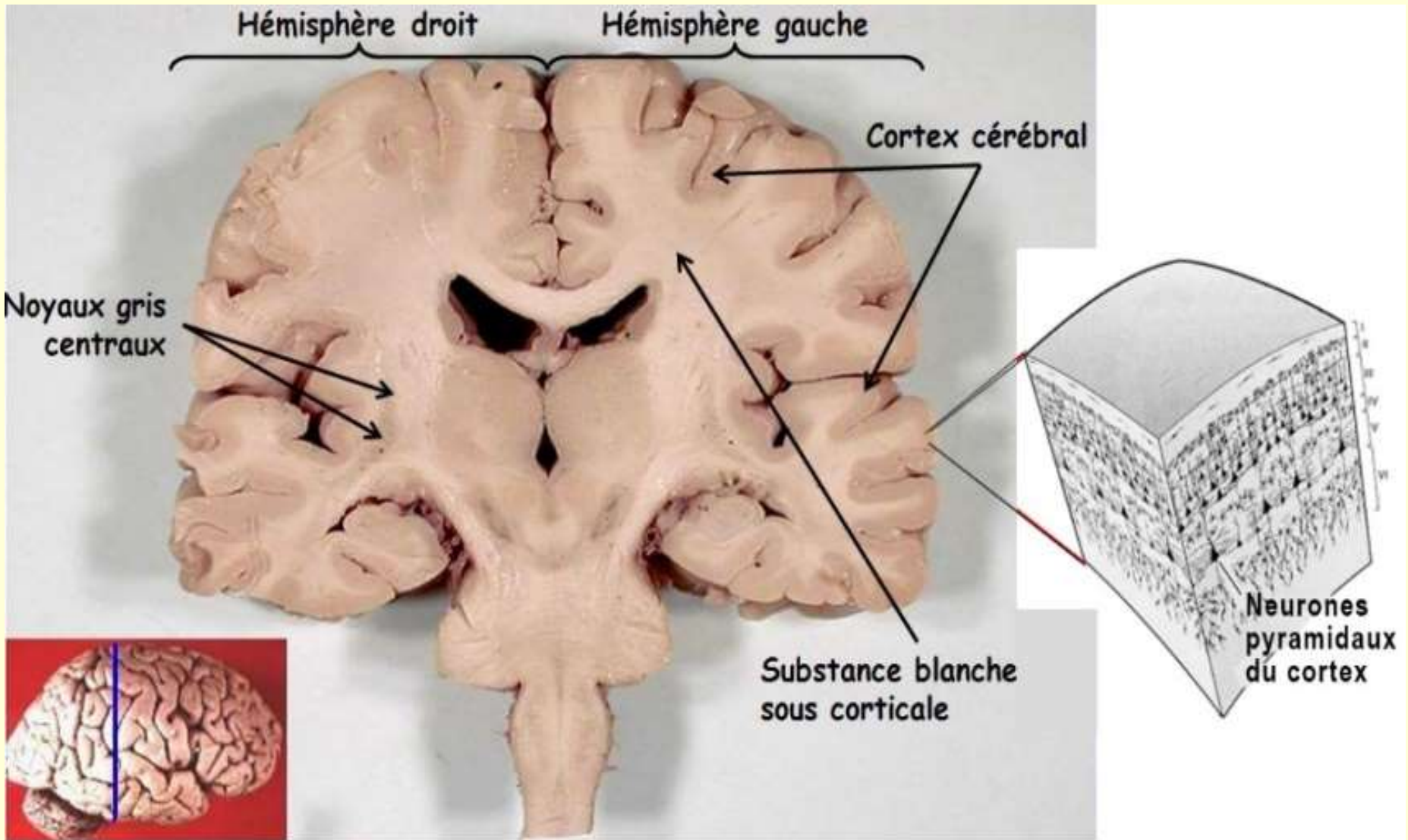


Les premières cartes cérébrales comme celle de Brodmann étaient basées sur la cytoarchitecture

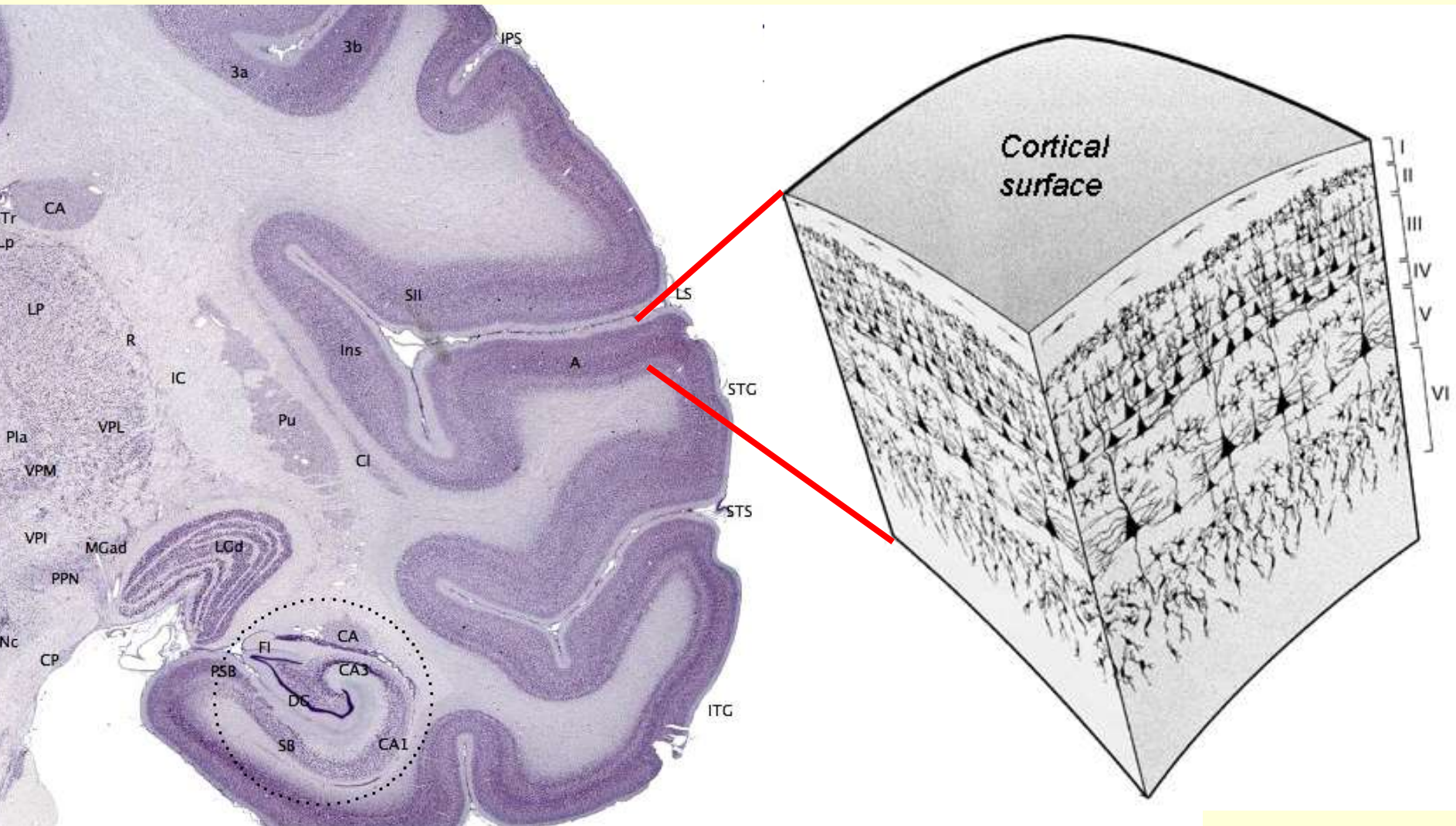


c'est-à-dire la **densité**,
la **taille** des neurones et
le **nombre de couches**
observées sur des
coupes histologiques.

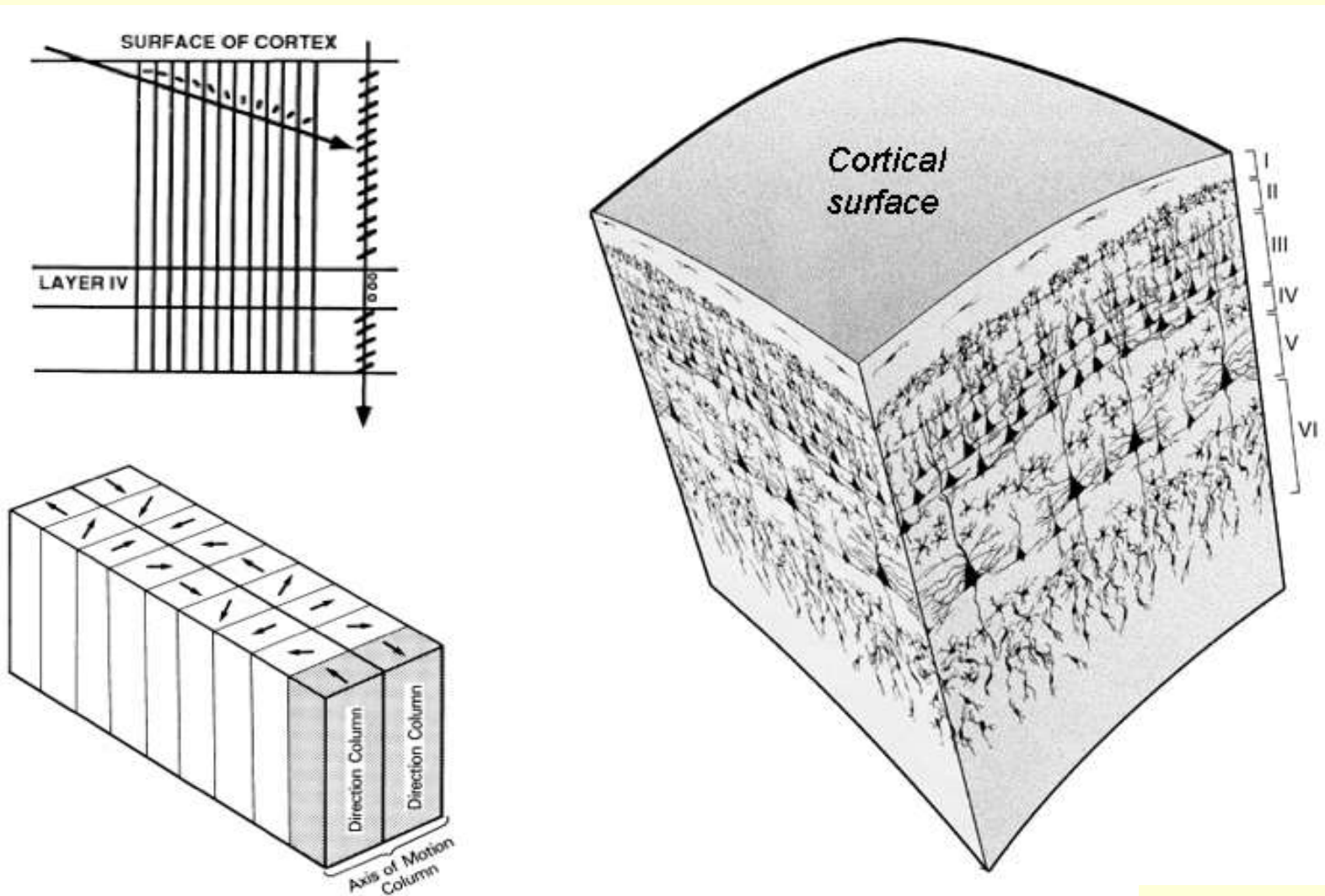




Car il y a une organisation en **couches** dans le cortex...



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

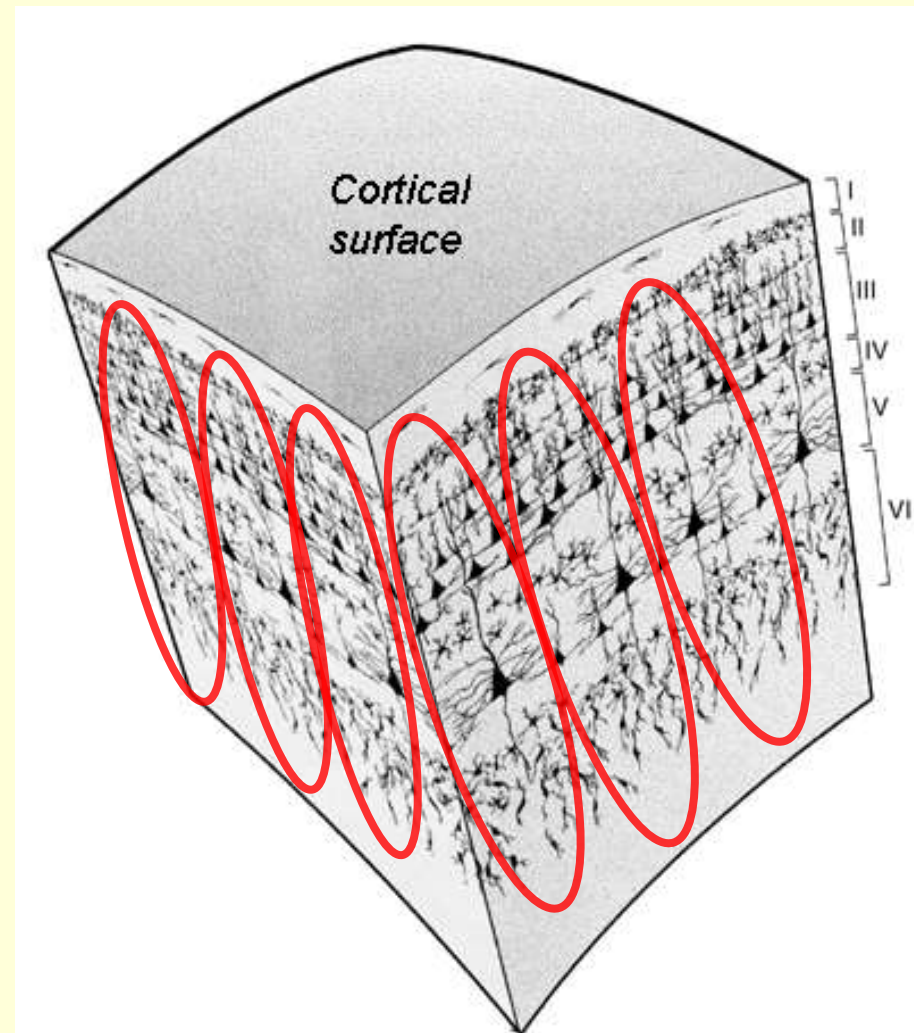


...il y a également une organisation **en colonne** !

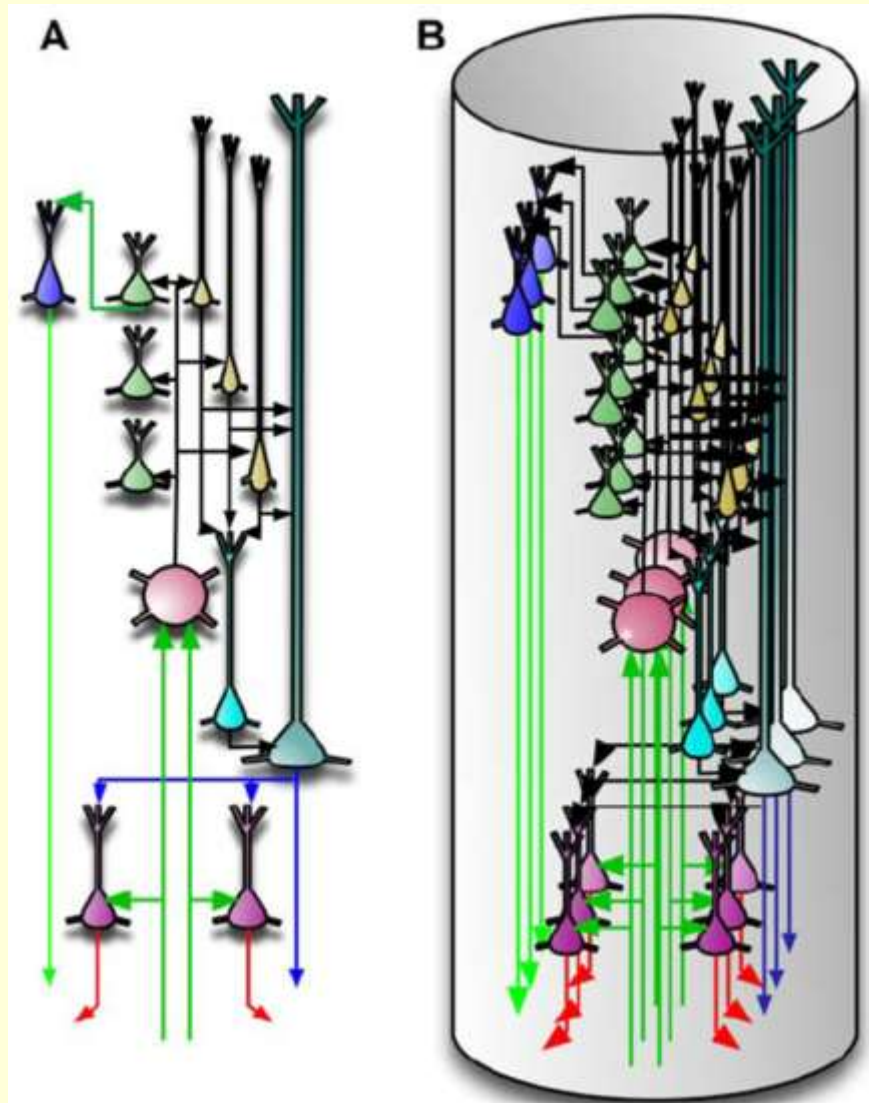
Mais ces colonnes ne sont **pas visibles** par coloration comme les couches du cortex;

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

→ les neurones ont des connexions préférentielles **à la verticale**.



Chaque colonne = plusieurs milliers de neurones



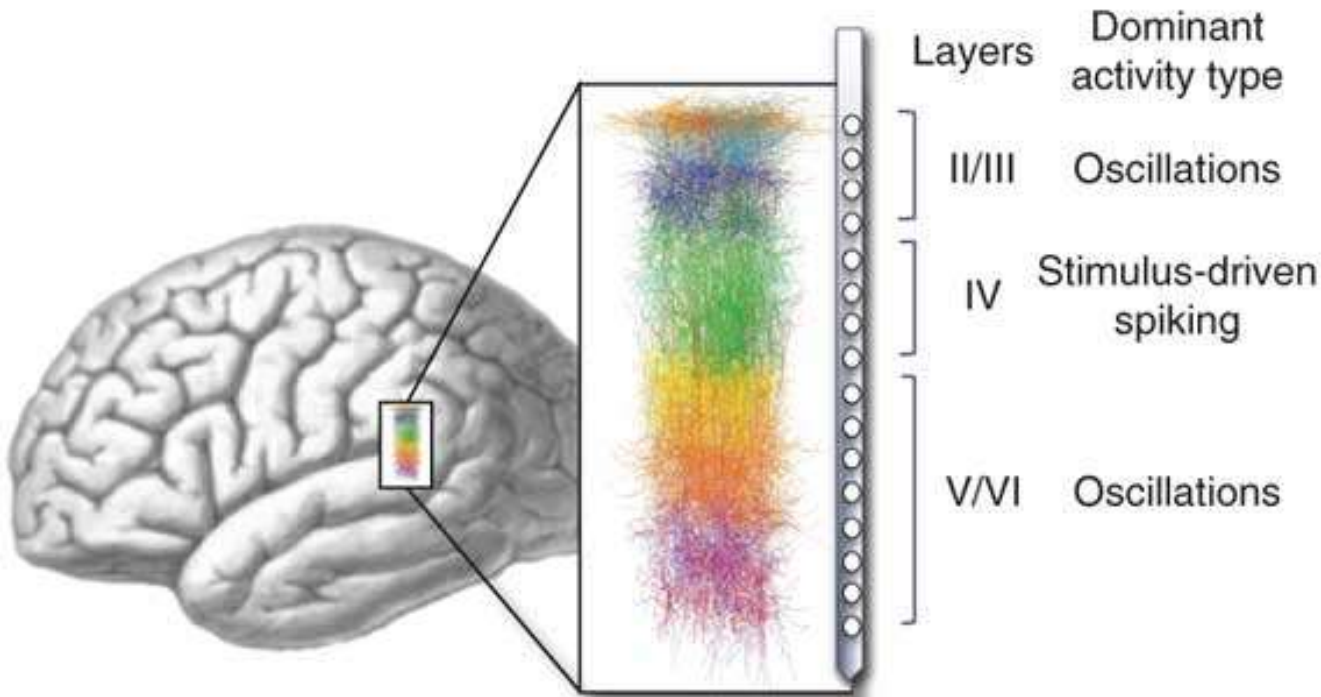
→ **Cortex** : grande diversité de fonctions, mais circuits remarquablement similaires

Le problème devient soudainement plus abordable:

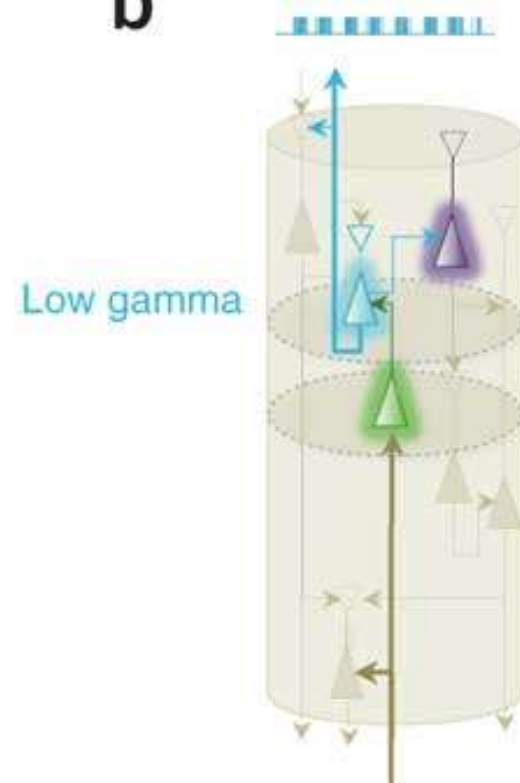
comprenez une colonne, et vous les comprendrez toutes !

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

a

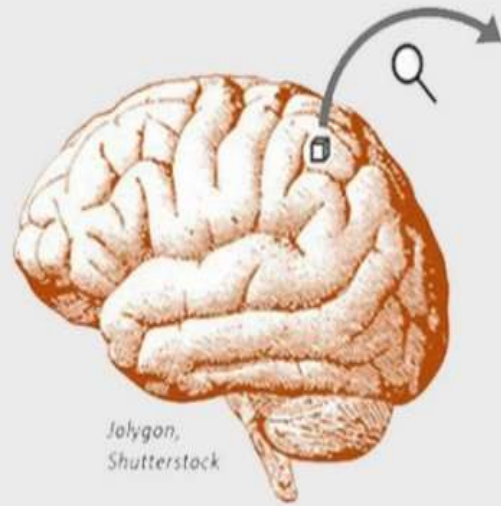


b



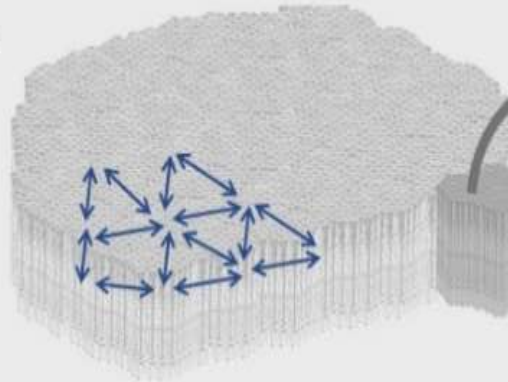
Surface corticale

2 millions de macrocolonnes
200 millions de minicolonnes
Entre 16 et 20 milliards de neurones



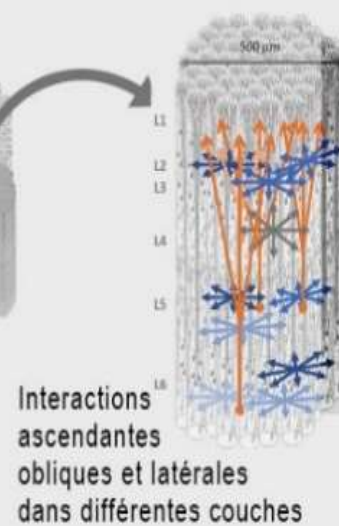
Aire corticale

~ 5 mm de diamètre
~ 1 million de neurones



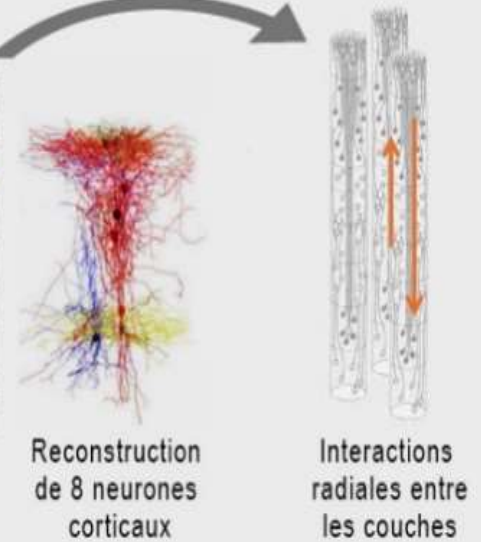
Macrocolonne

~ 500 microns de diamètre
~ 10 000 neurones

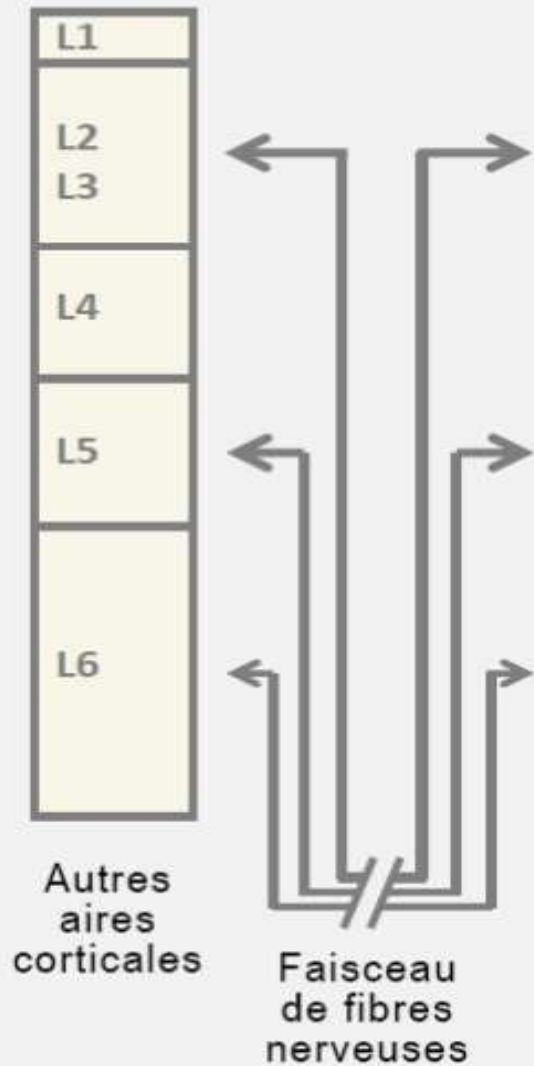


Minicolonne

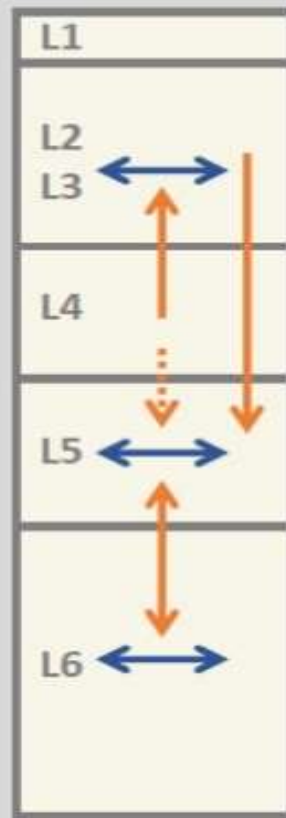
~50 microns de diamètre
~100 neurones



Interactions cortico-corticales à longue distance



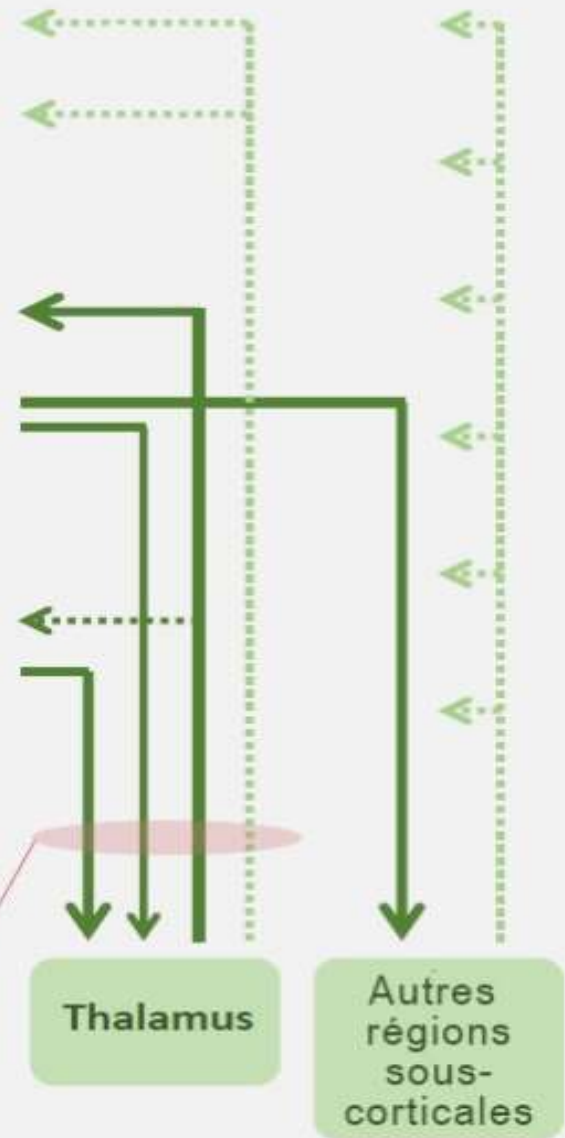
Interactions locales (latérales et radiales)



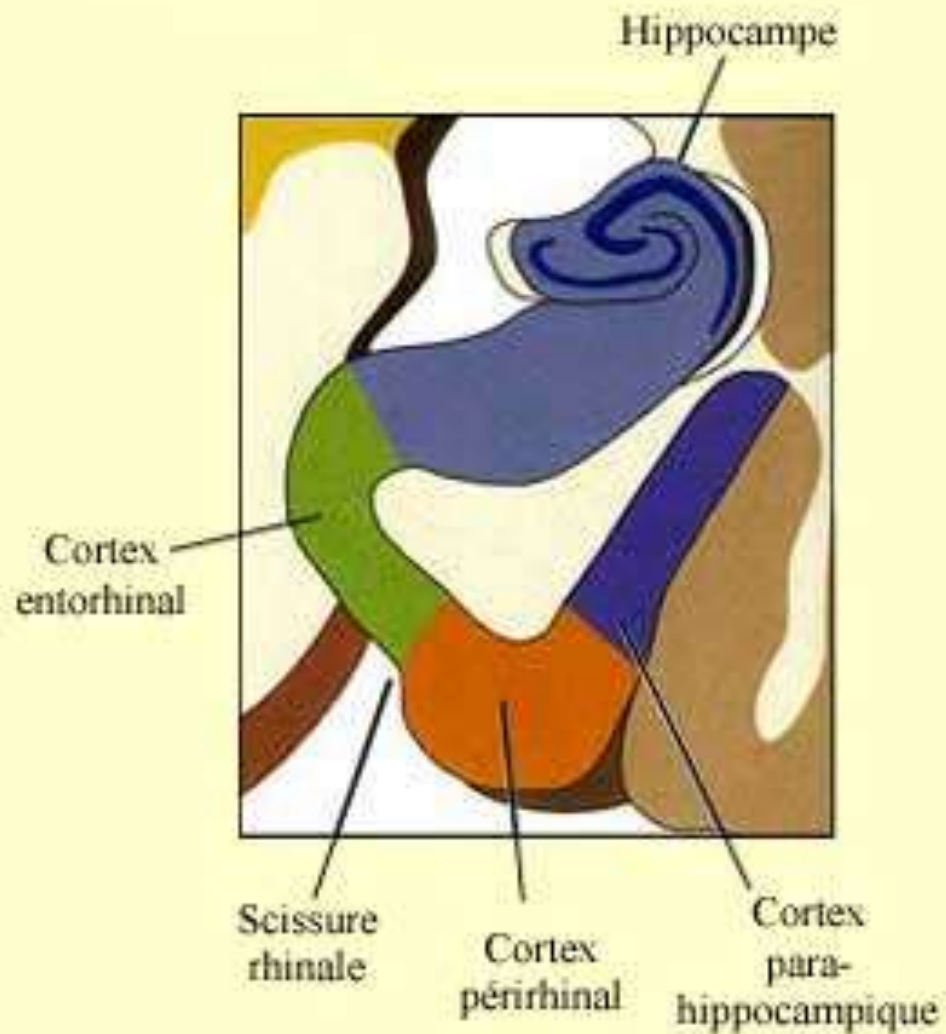
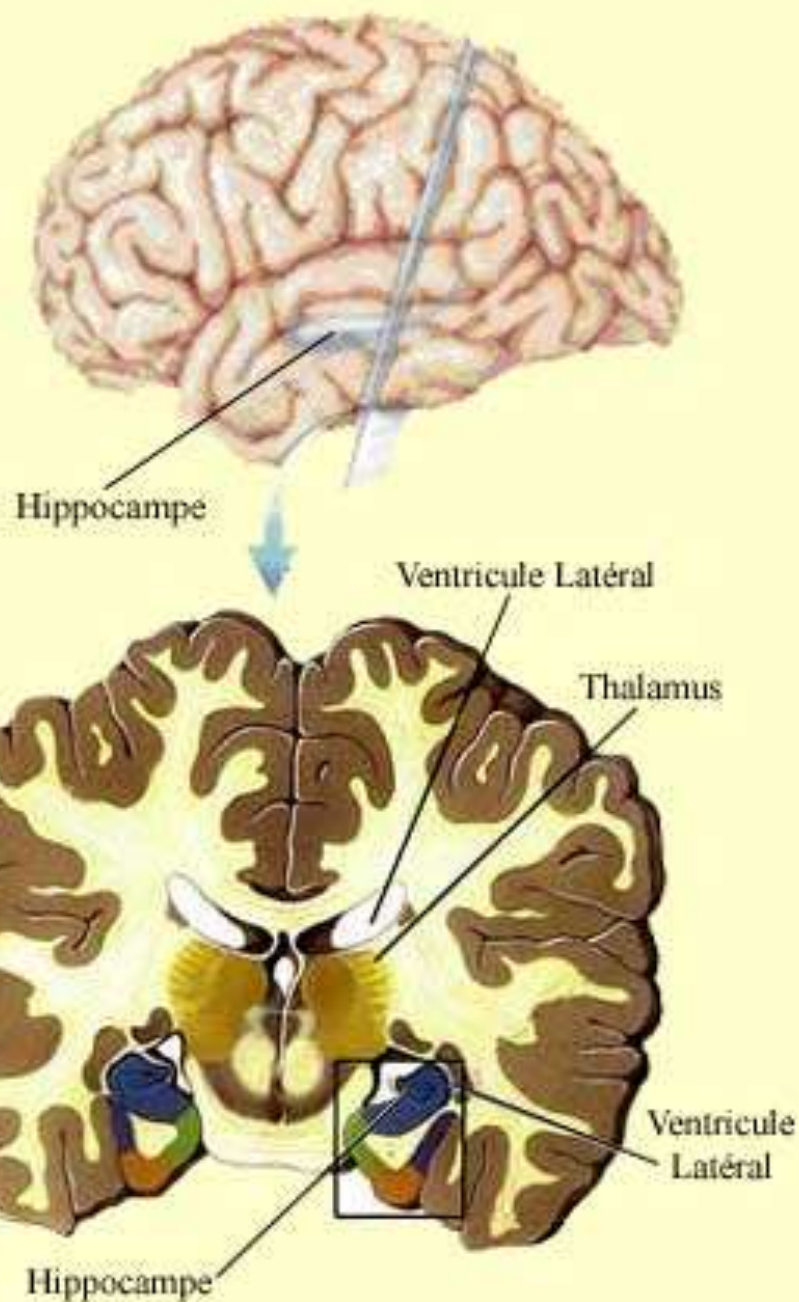
Aire corticale

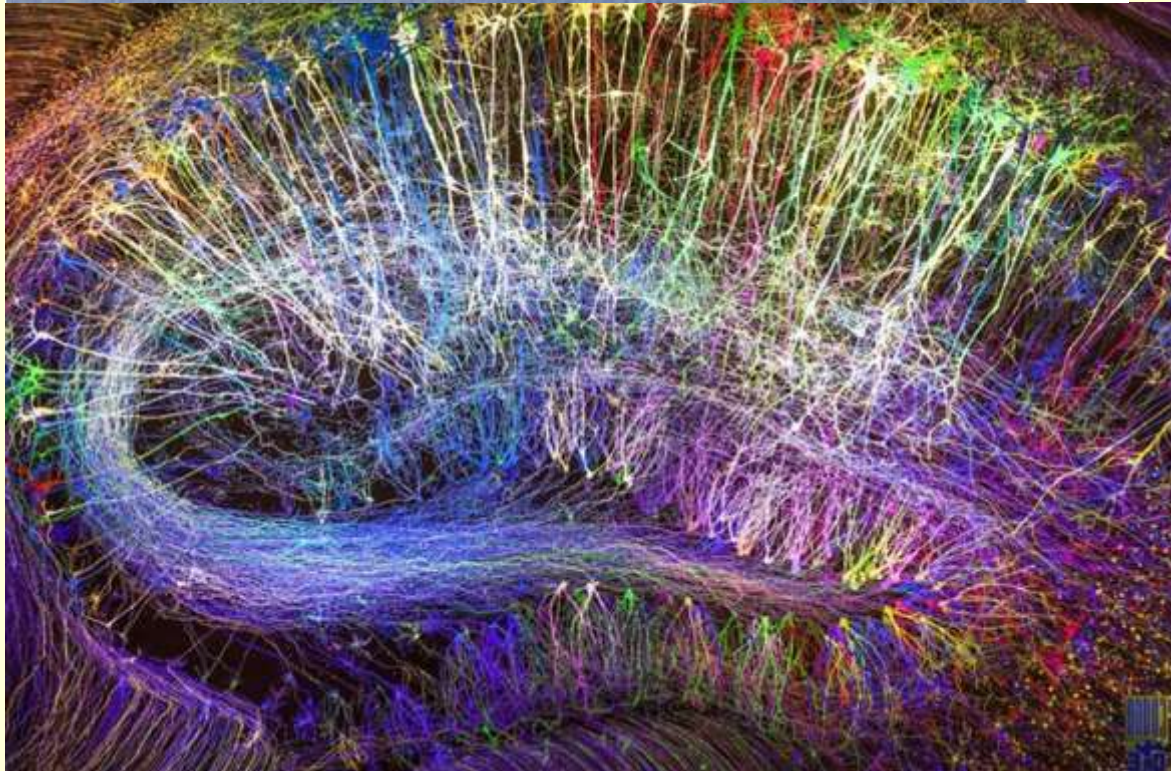
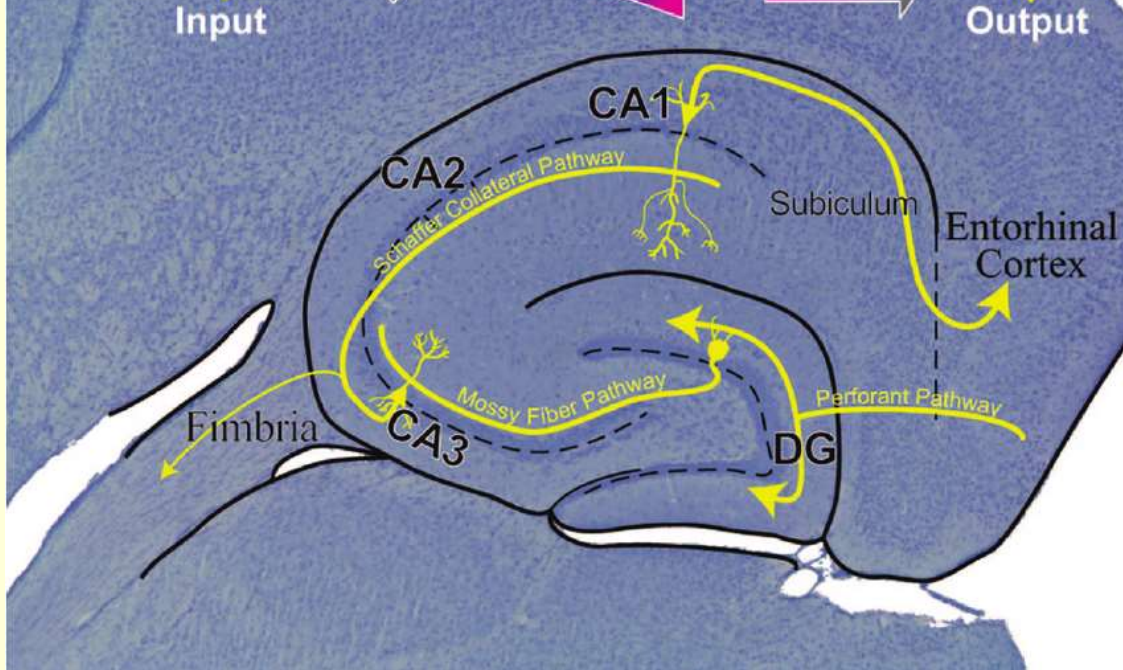
Boucle thalamo-corticale

Interactions sous-corticales à longue distance





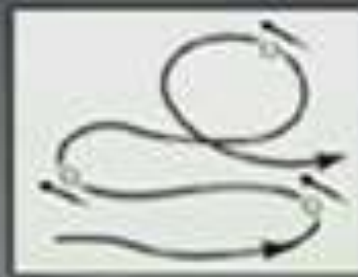




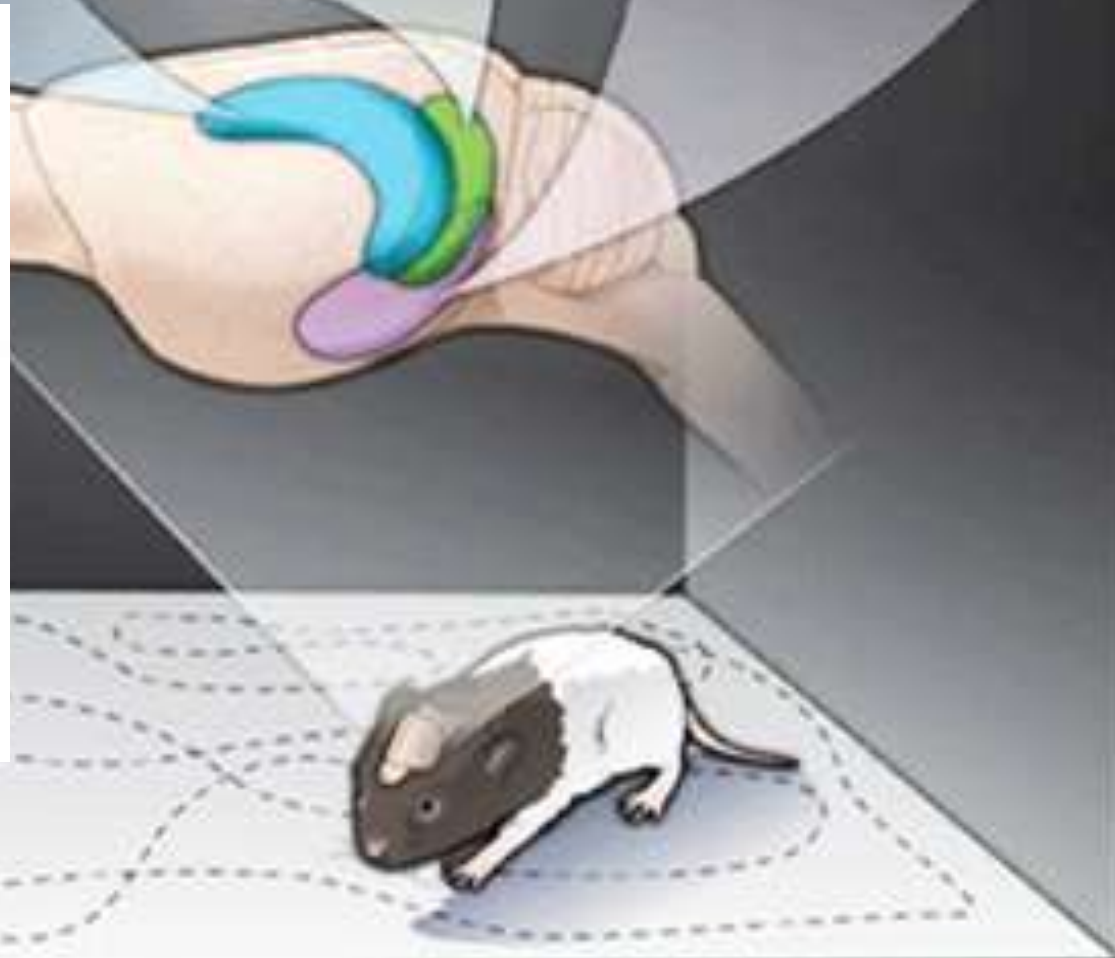
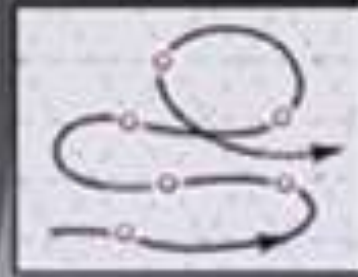
Hippocampus
"place cell"



Subiculum
"direction cell"

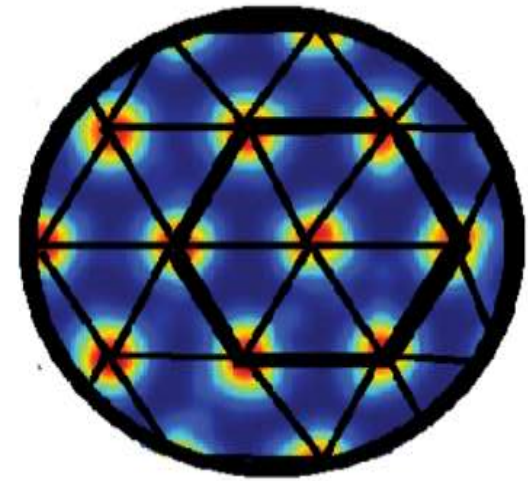
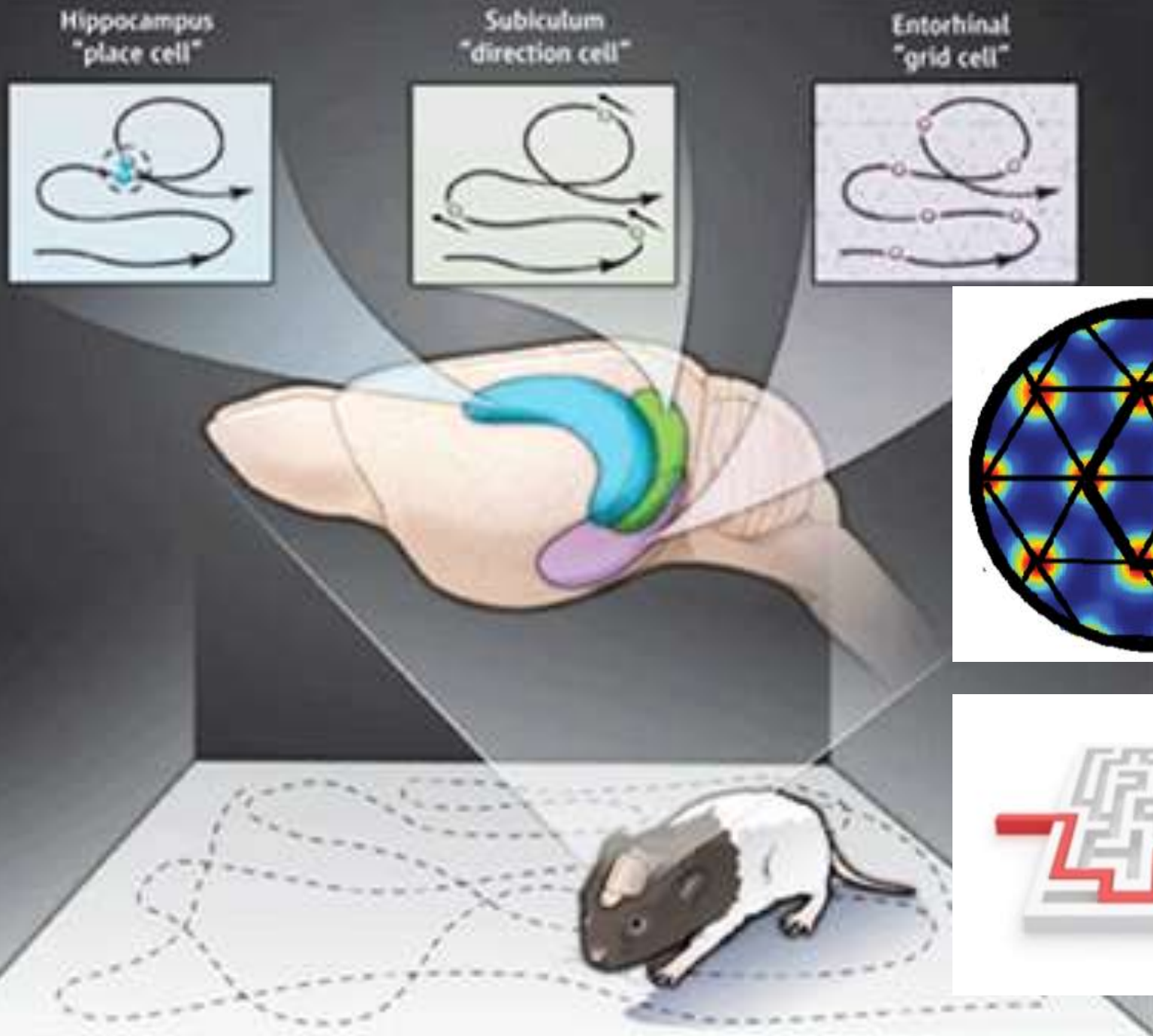


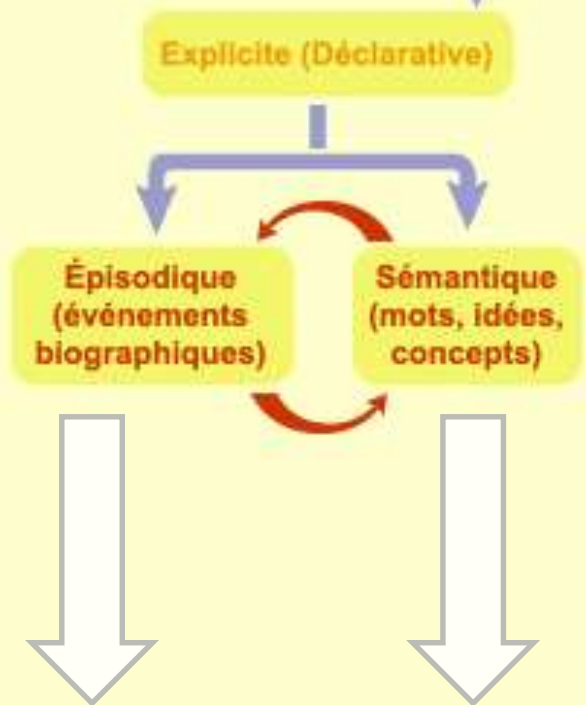
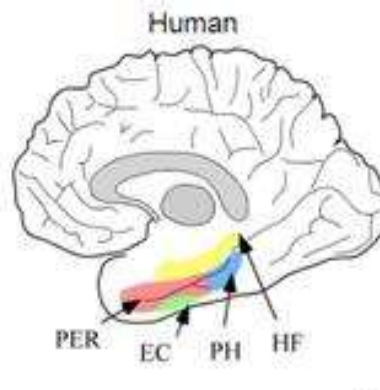
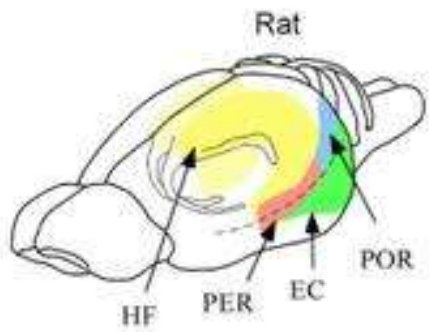
Entorhinal
"grid cell"



ARISEL

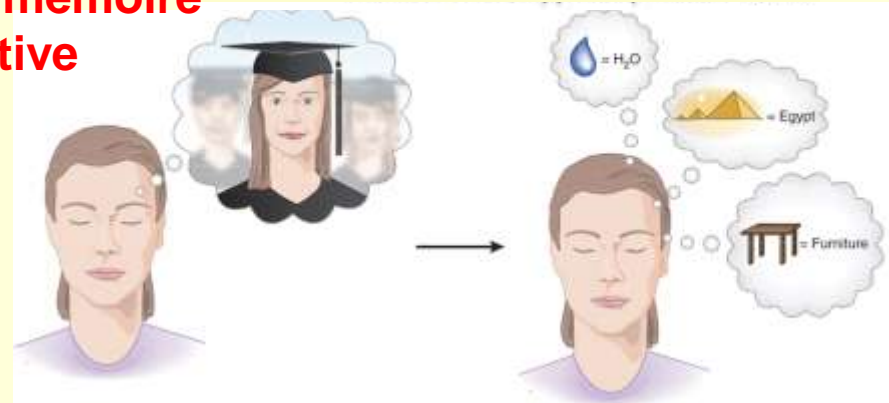
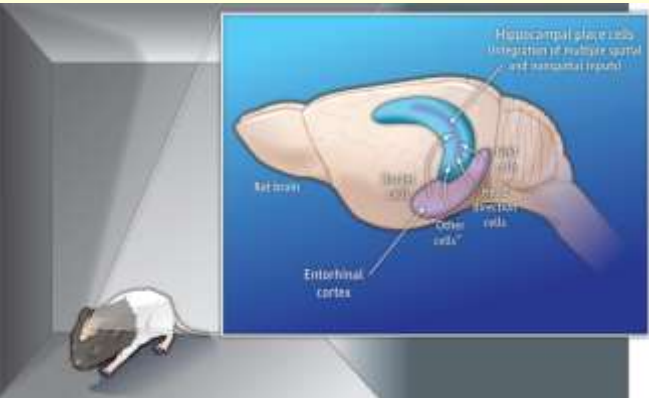
Le système de grid cells serait impliqué dans la navigation mentale.





Navigation spatiale

Navigation spatiale + Recyclage des mêmes circuits pour la mémoire déclarative



Grid cells :
navigation mentale dans l'espace

Place cells :
position dans une carte spatiale

Grid cells :
navigation mentale mais dans le temps !

Place cells :
position mais dans une carte conceptuelle !

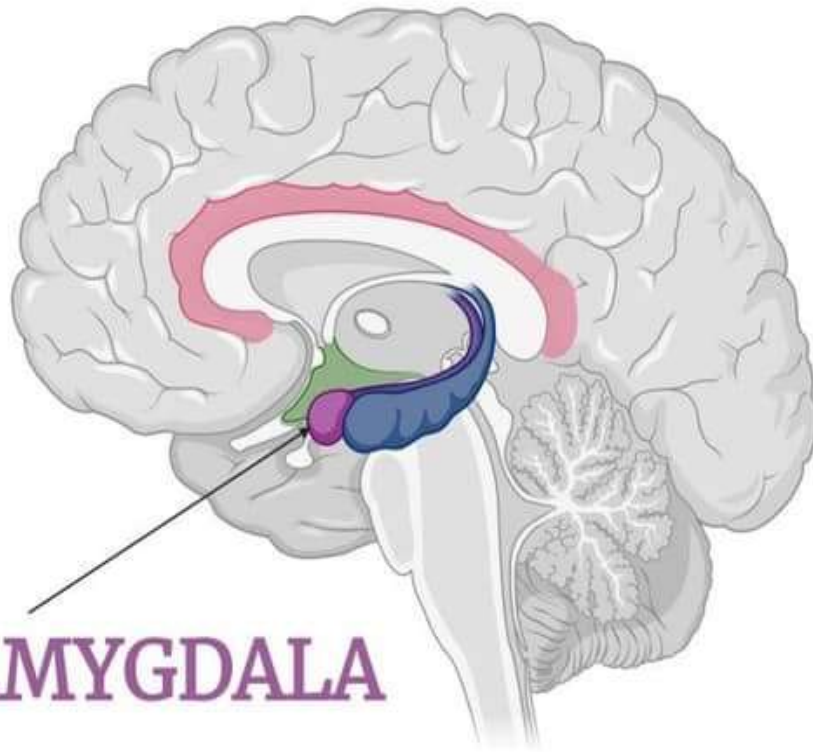


avec une approche alternative
fondée sur ce qu'il appelle
la « **réutilisation neuronale** »

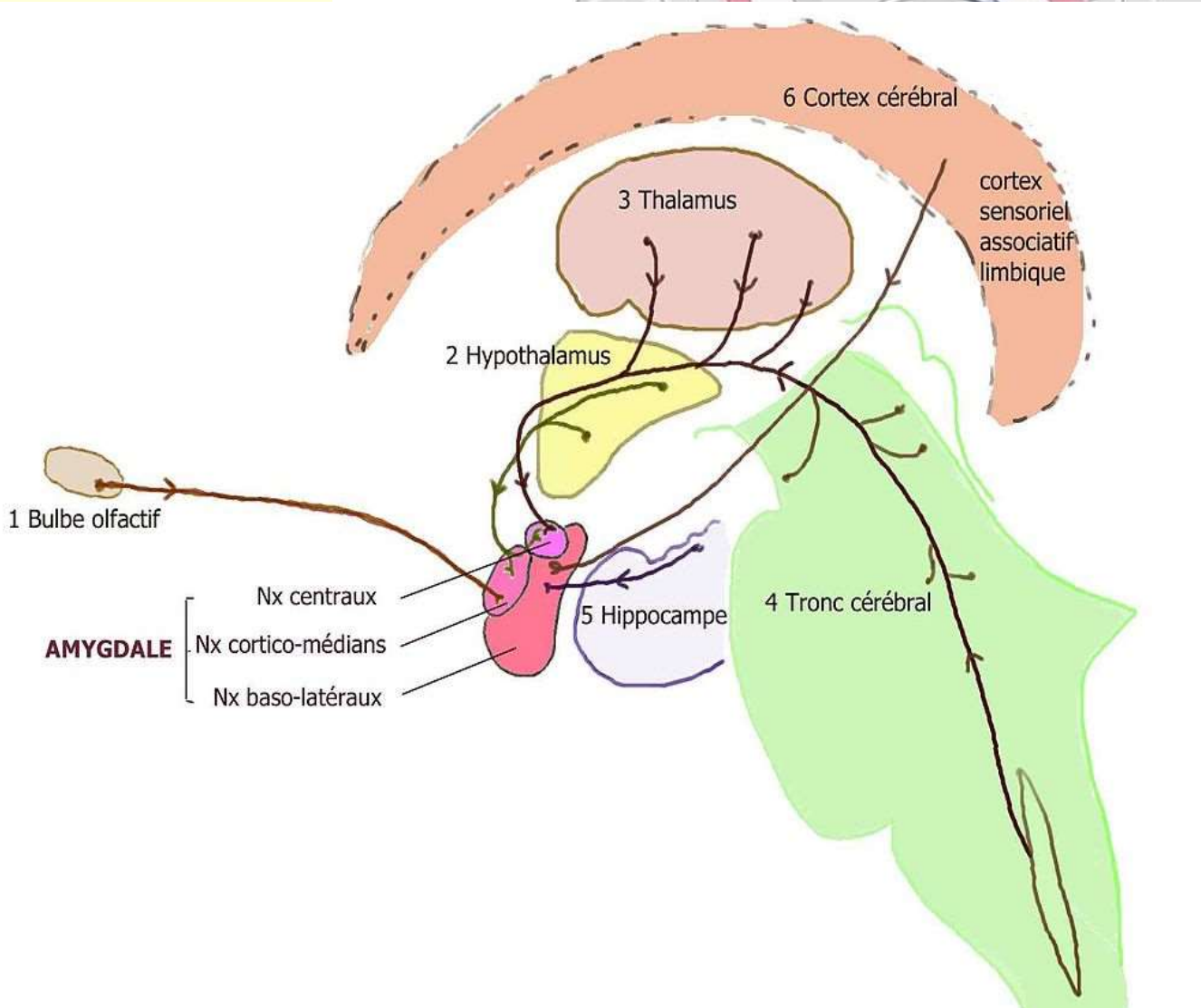
(« neural reuse », en anglais,
un cas de recyclage neuronal).

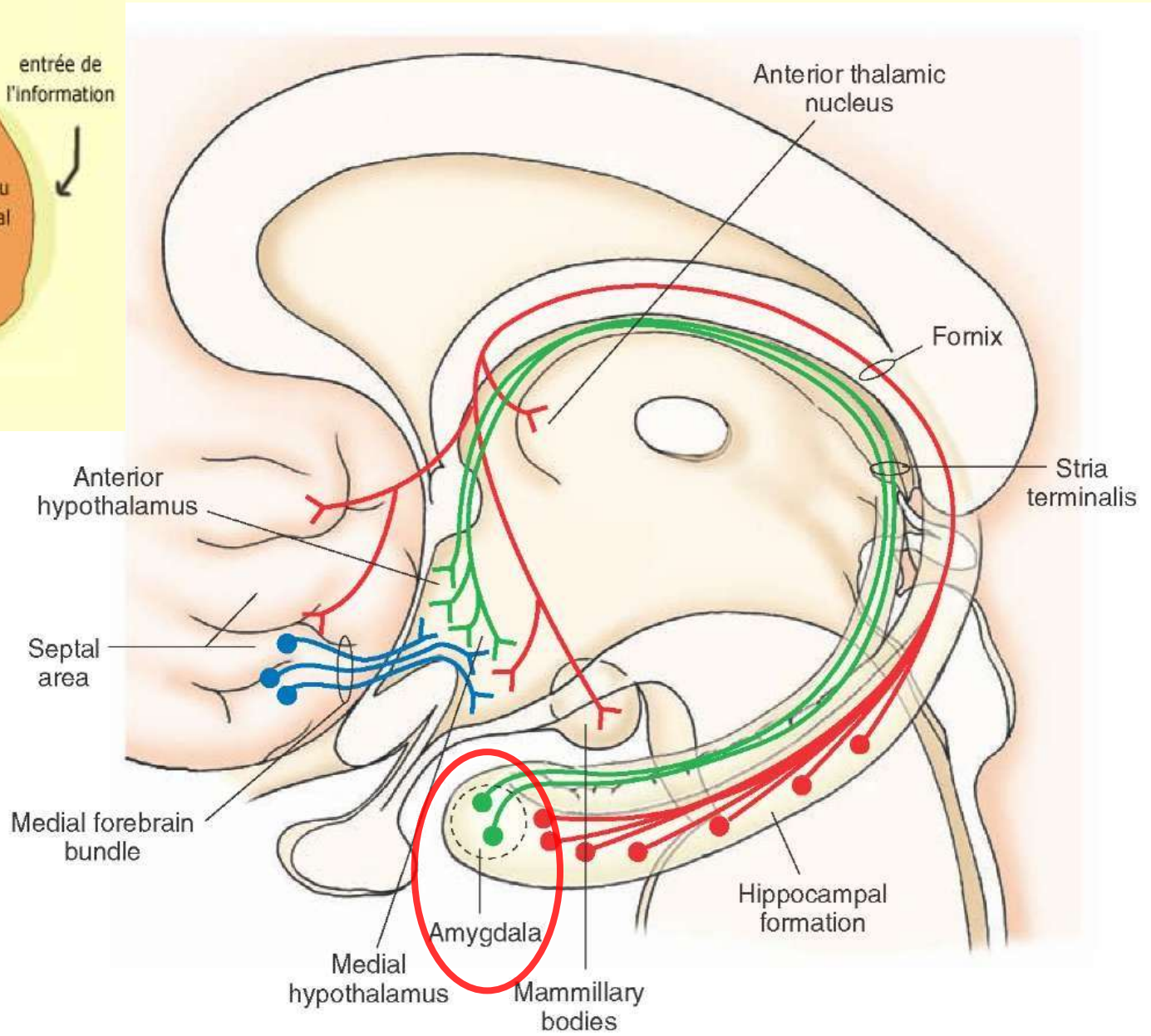
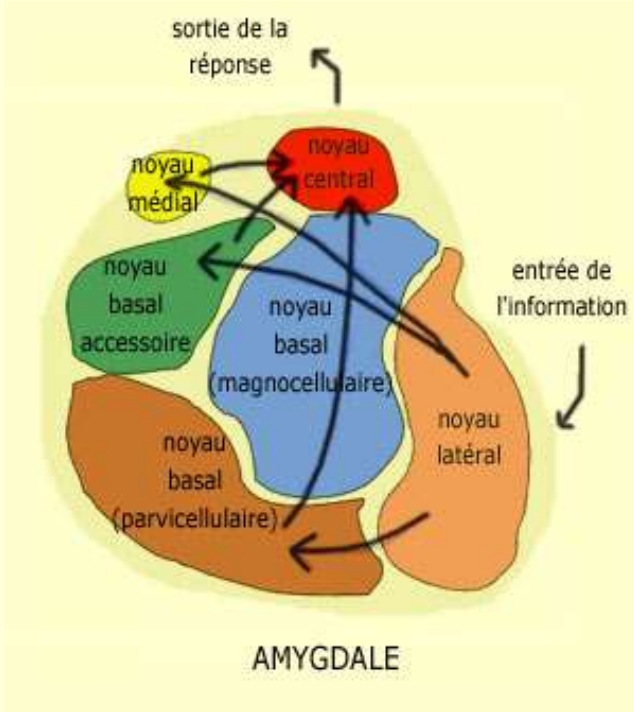


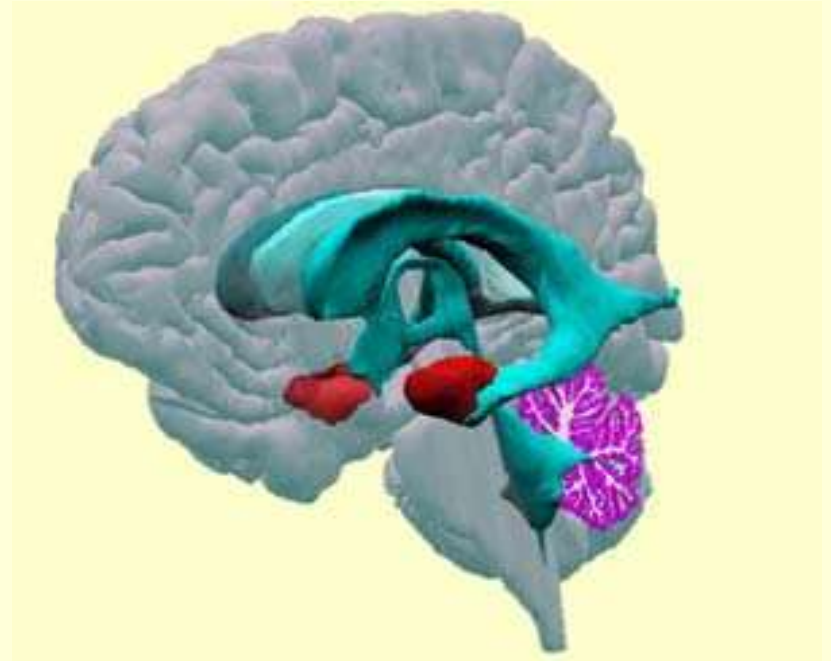




THE AMYGDALA



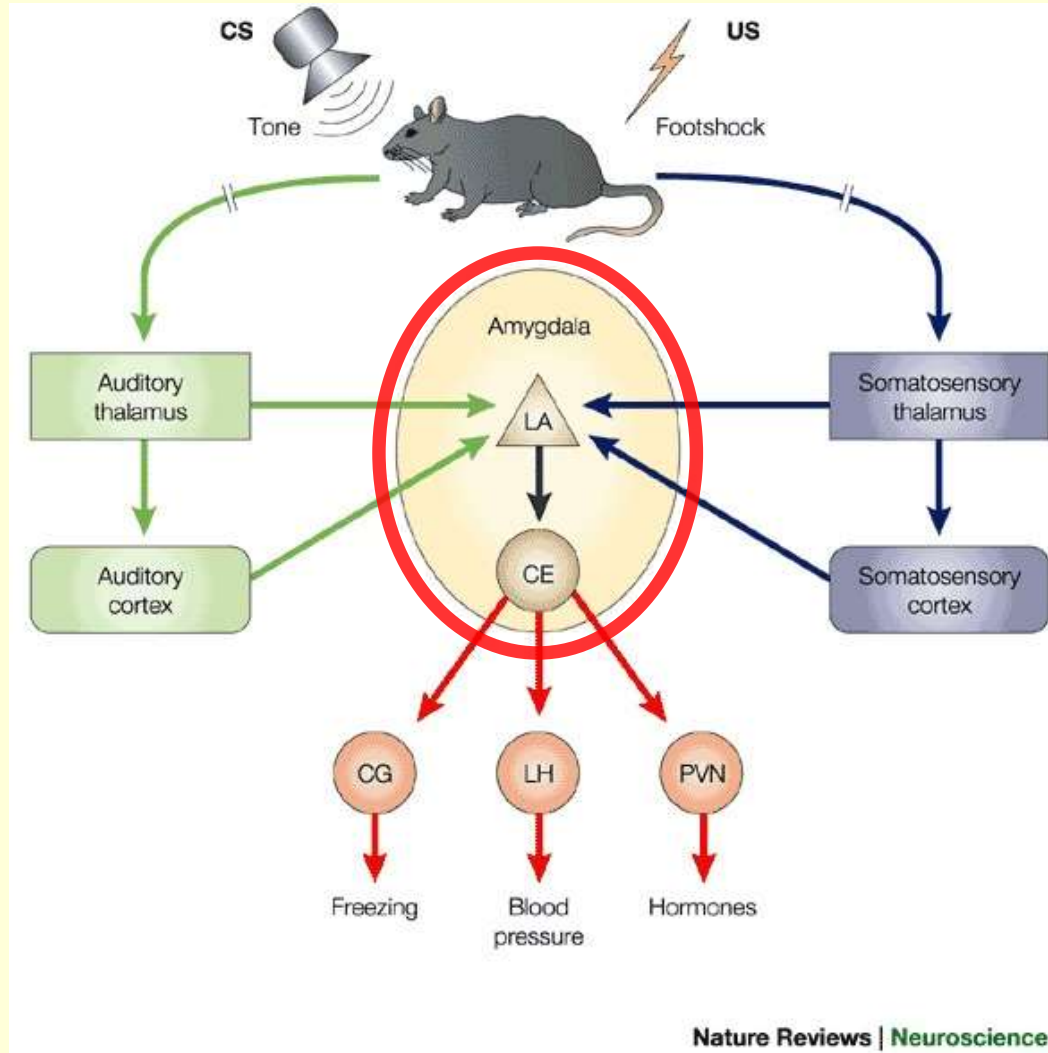




Amygdale = peur ?



Amygdala = peur ?



Nature Reviews | Neuroscience

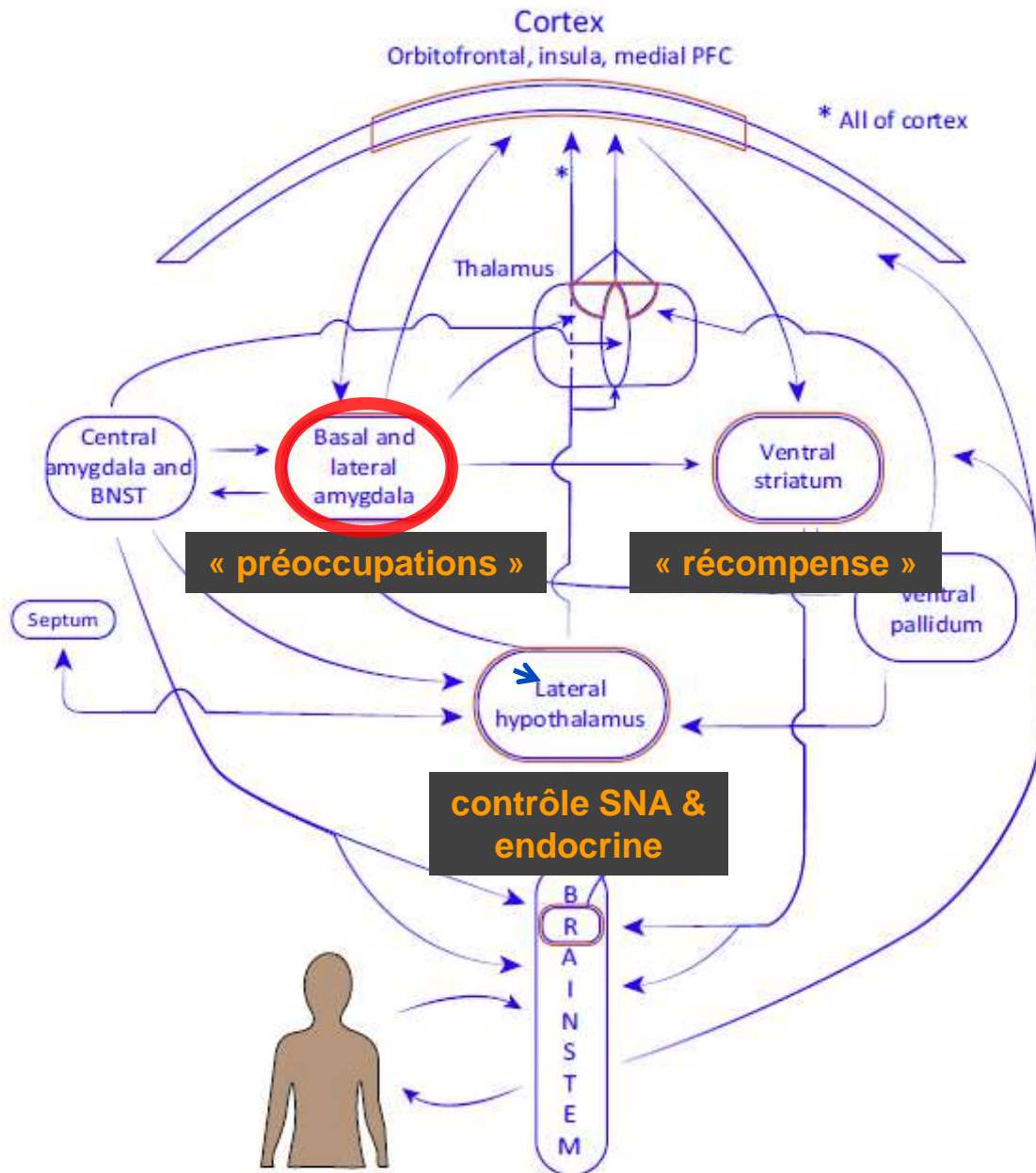
https://www.researchgate.net/publication/11523425_Parallels_between_cerebellum_and_amygdala-dependent_conditioning



Amygdale ~~X~~ peur ?

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





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

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

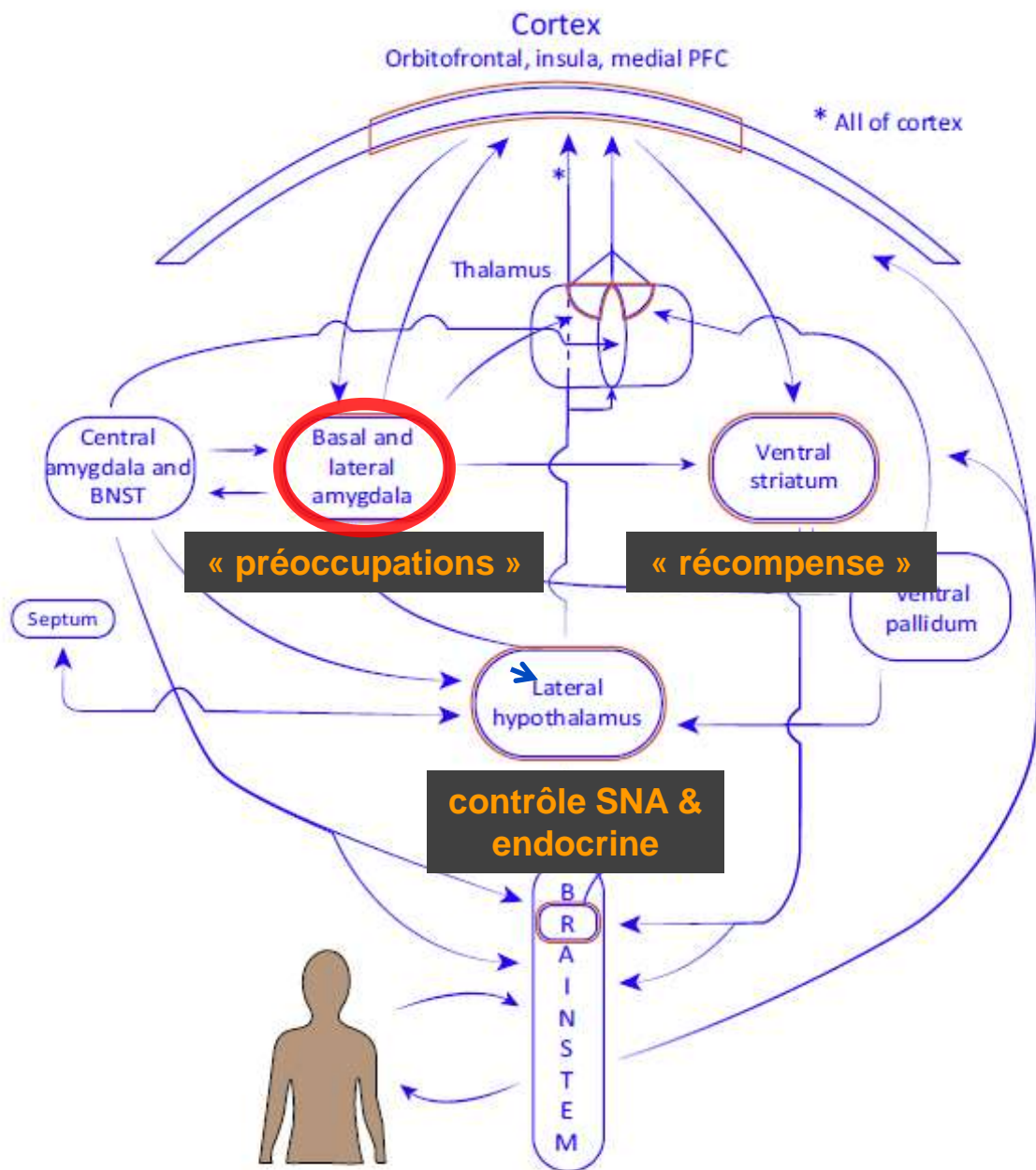
ici dans un réseau relié aux **émotions.**

A Network Model of the Emotional Brain

Luiz Pessoa

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

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



a 'functional diversity profile'

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

A Network Model of the Emotional Brain

Luiz Pessoa

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

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

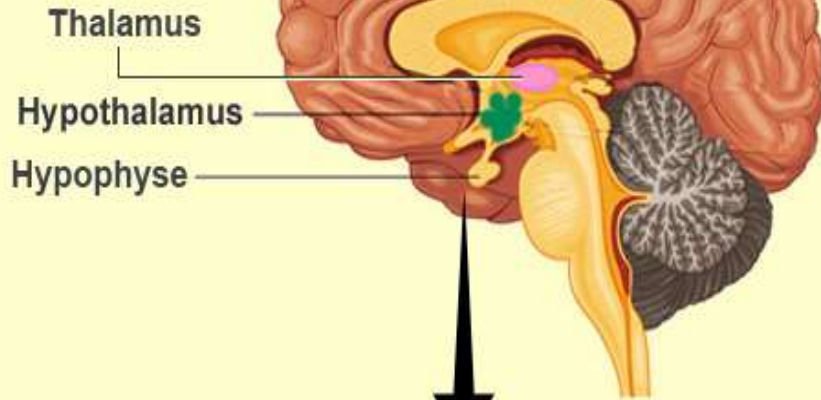
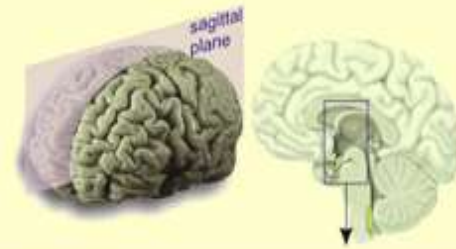
La tentation **des étiquettes fonctionnelles**
avec quelques exemples :



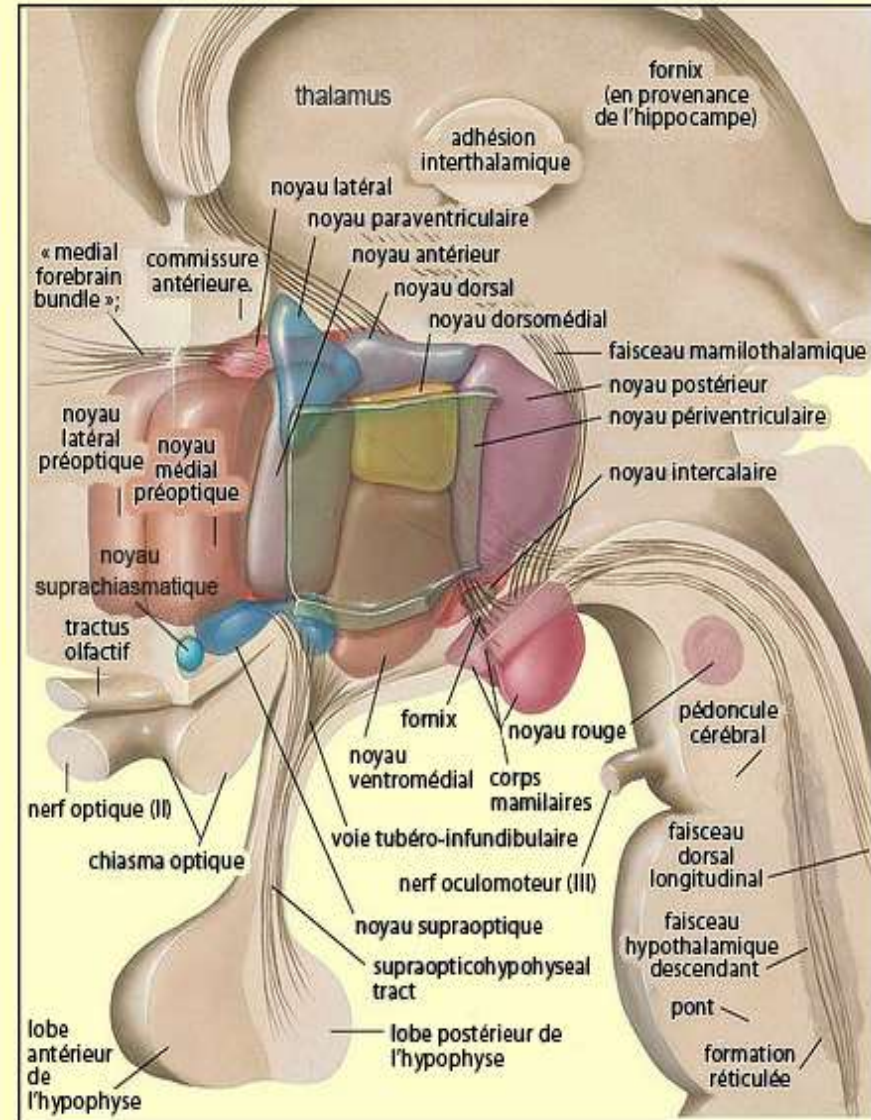
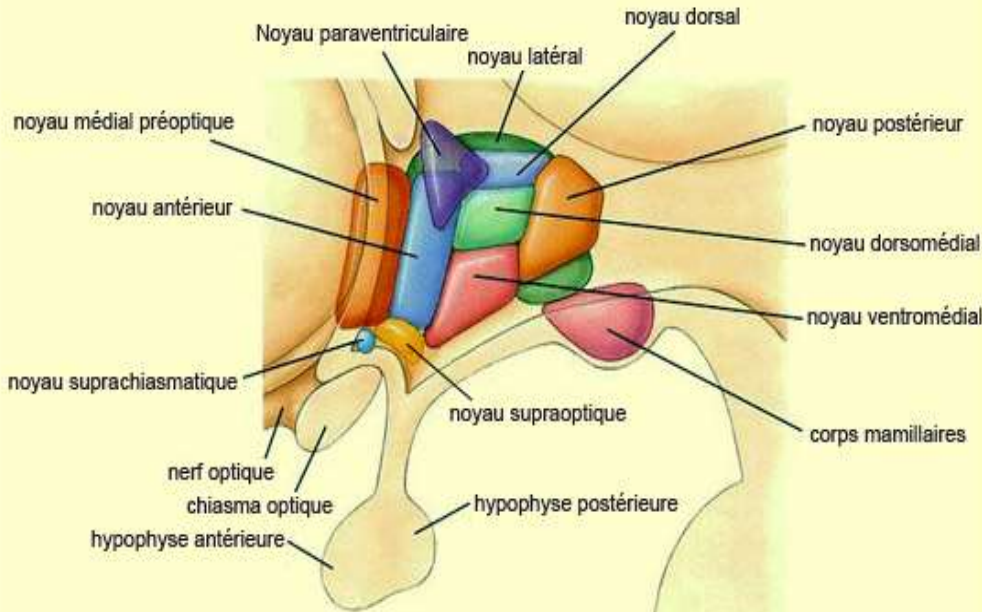
l'amygdale

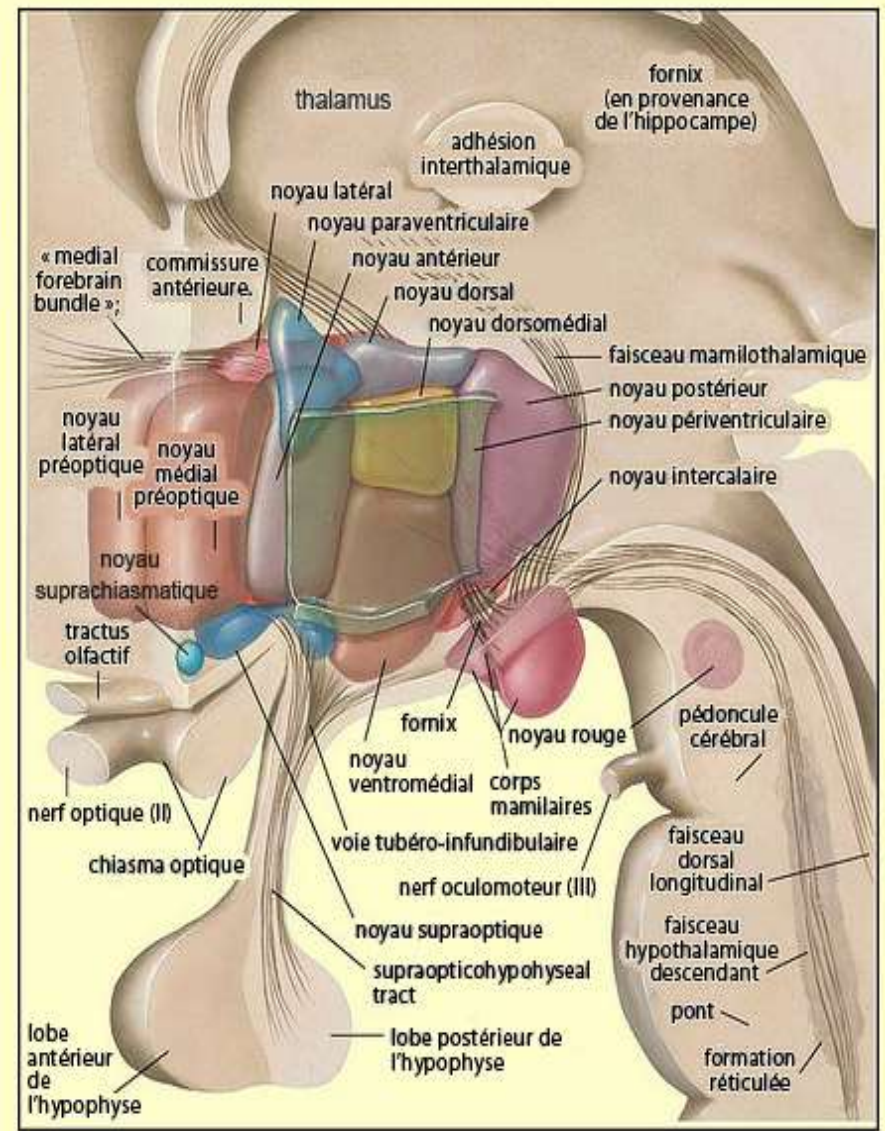
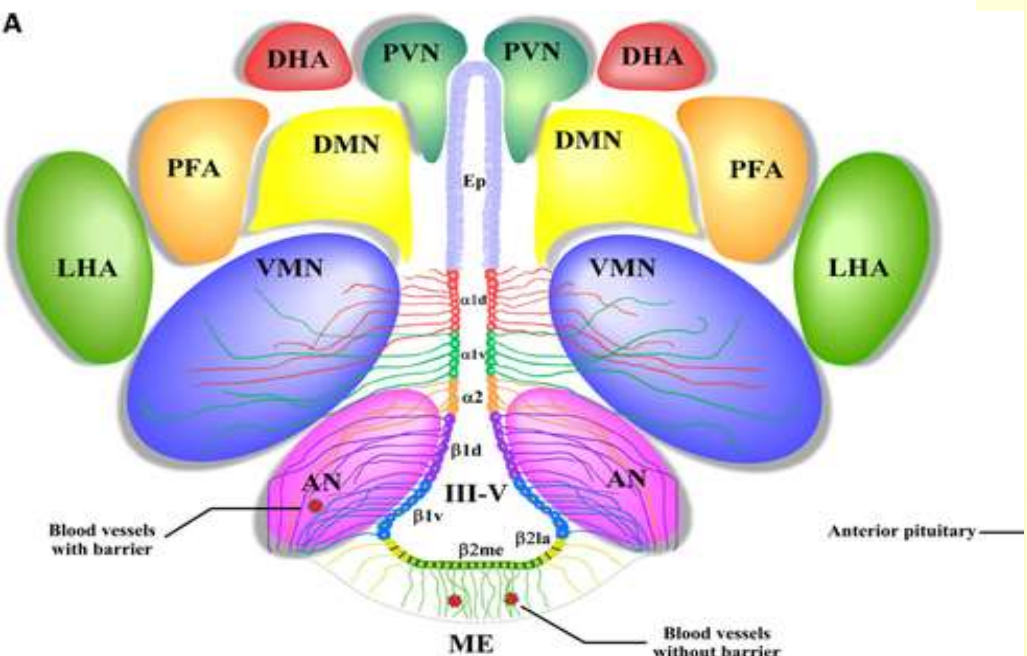
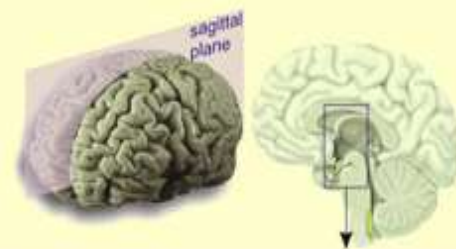
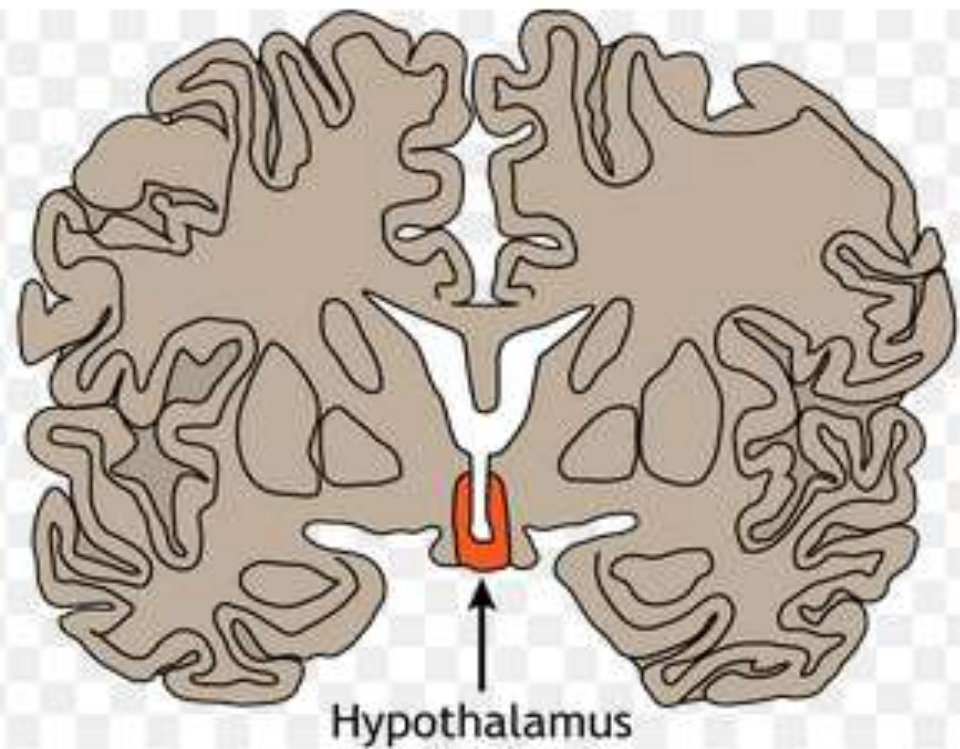
- l'aire de Broca
- le cortex insulaire (ou insula)
- le « cas » du cervelet

Hypothalamus

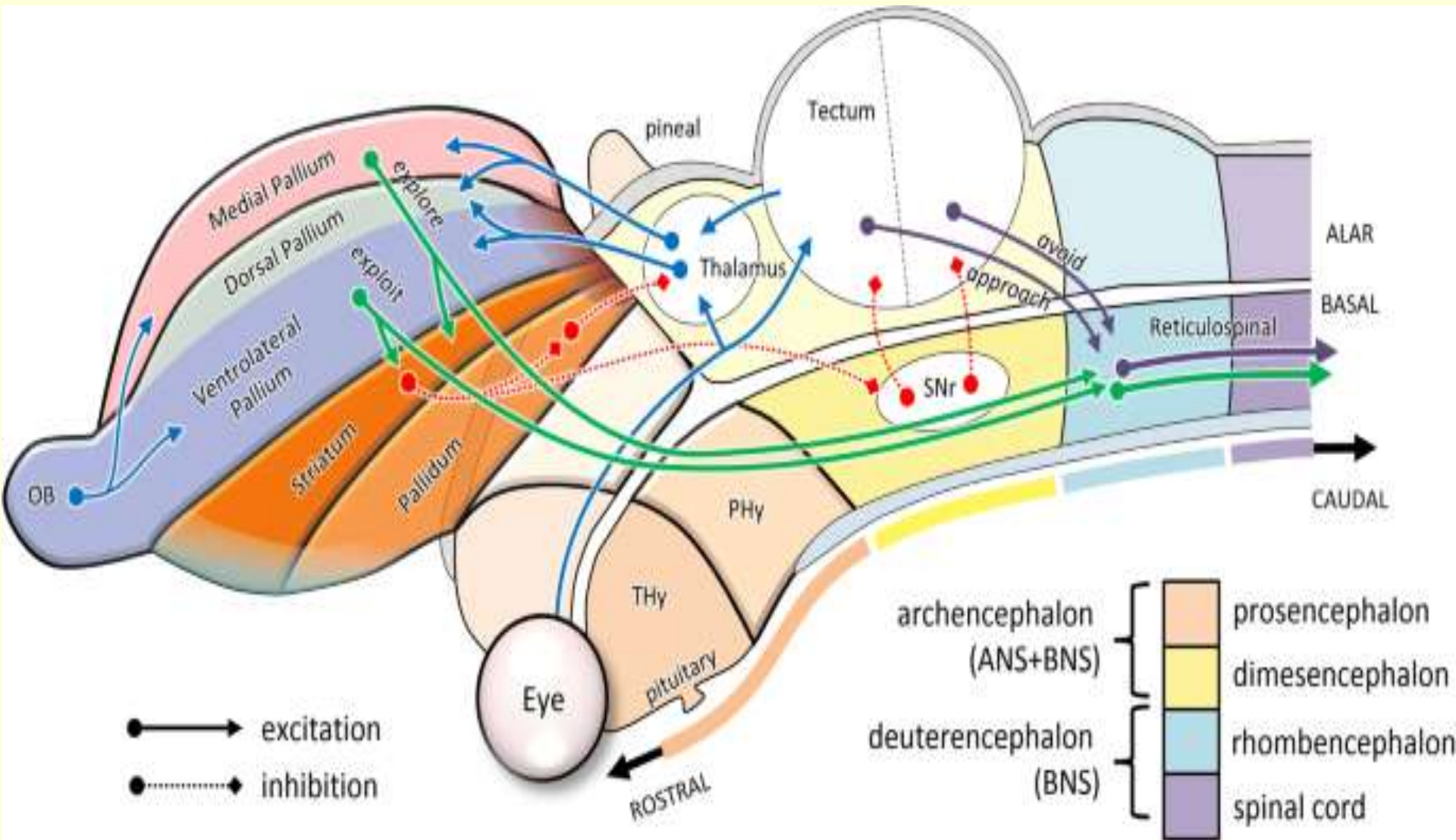


Noyaux hypothalamiques





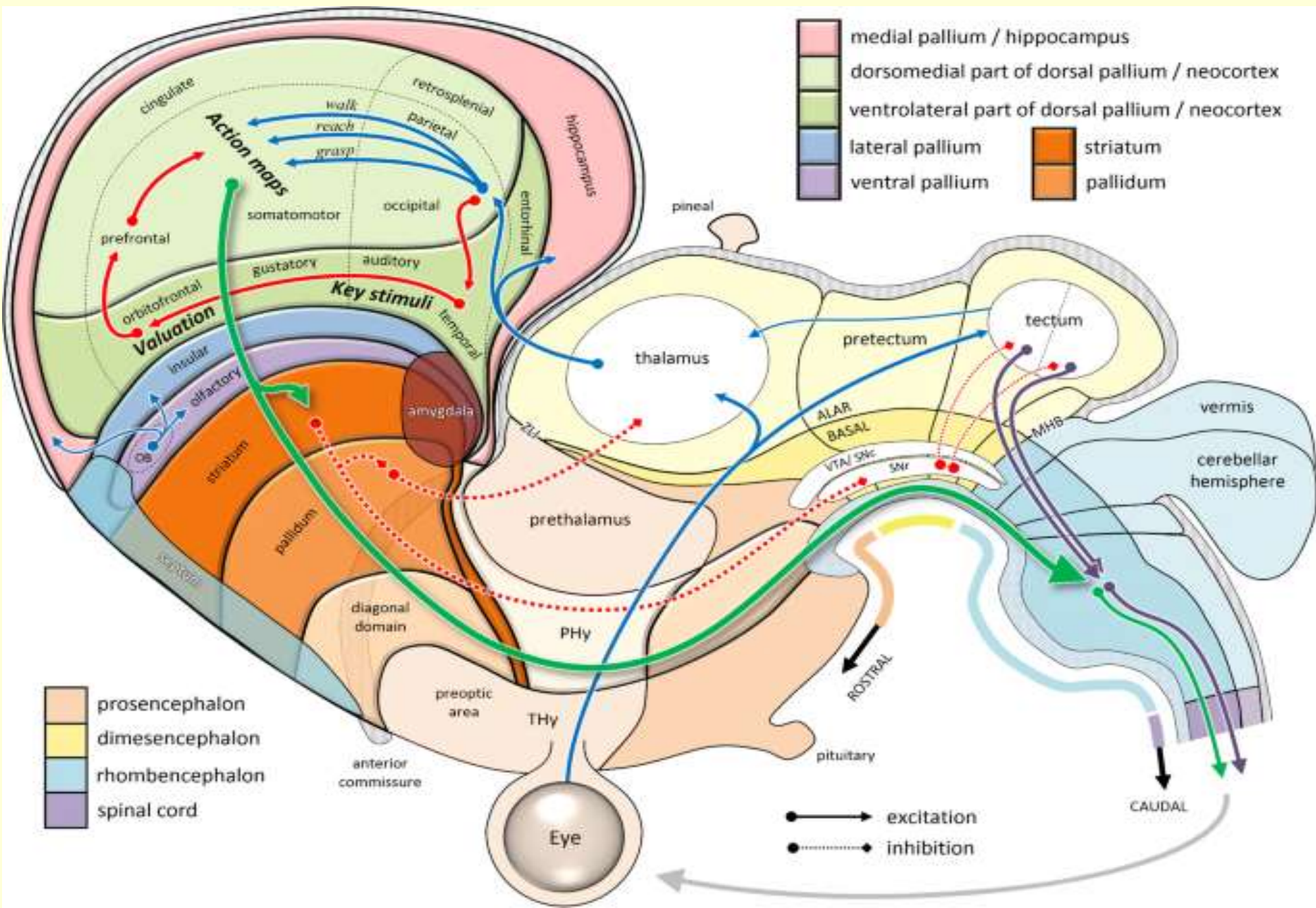
Sagittal view of the basic organization of the ancestral vertebrate brain.



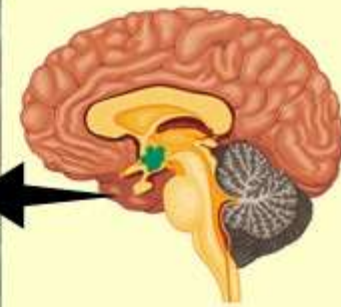
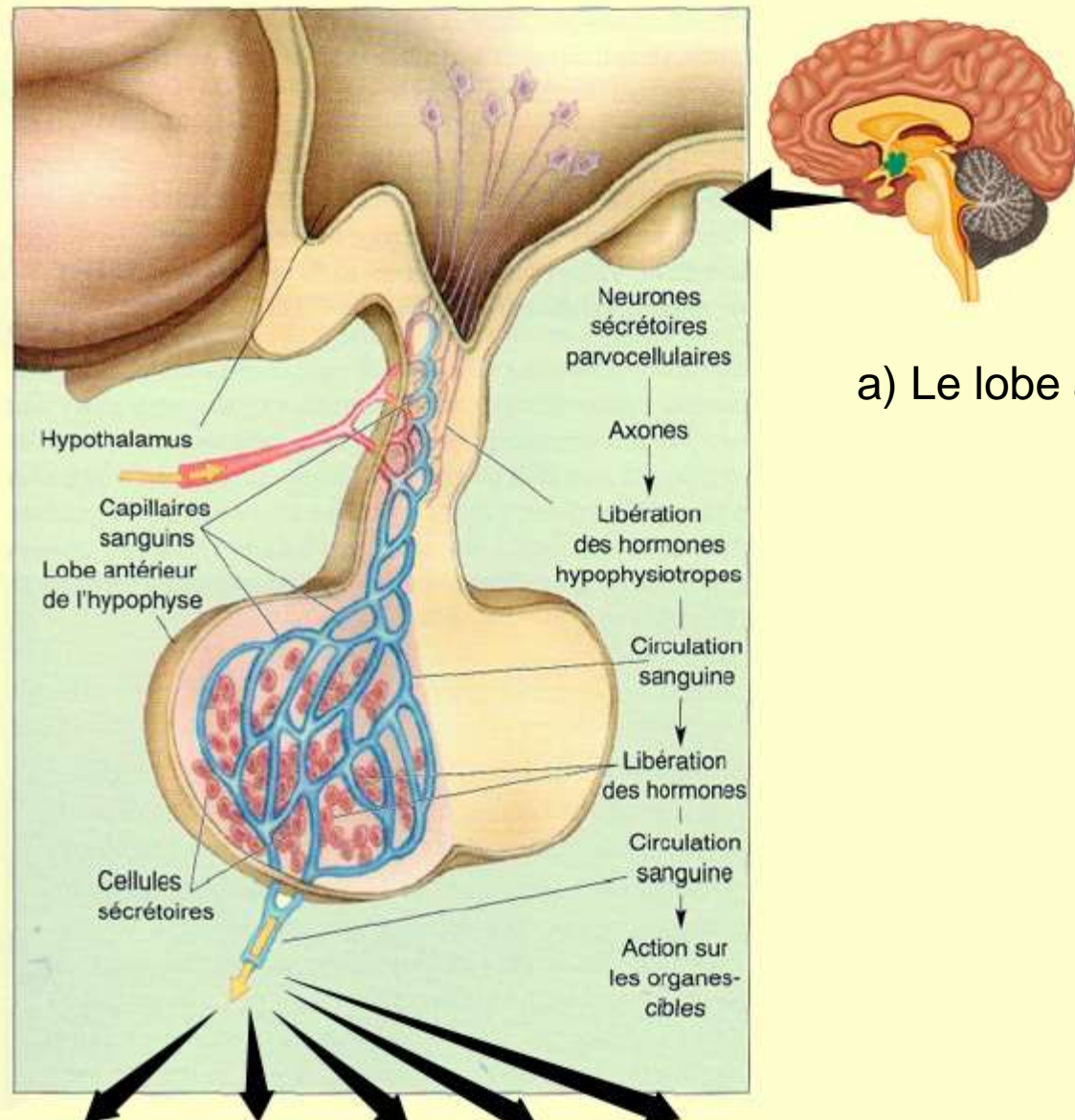
Resynthesizing behavior through phylogenetic refinement

https://www.researchgate.net/publication/333586383_Resynthesizing_behavior_through_phylogenetic_refinement

Schematic organization of the mammalian brain



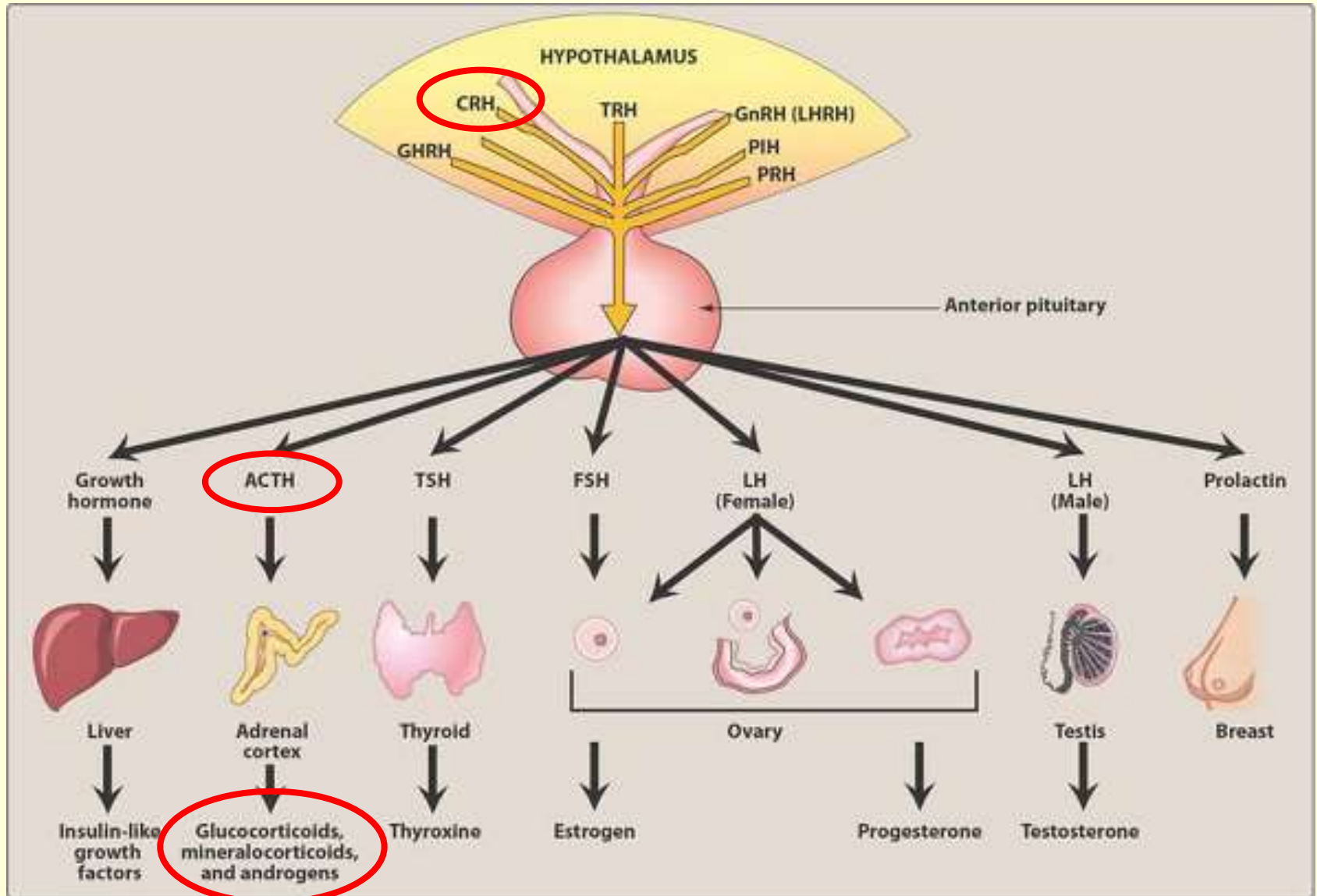
L'hypophyse et ses 2 lobes



a) Le lobe antérieur



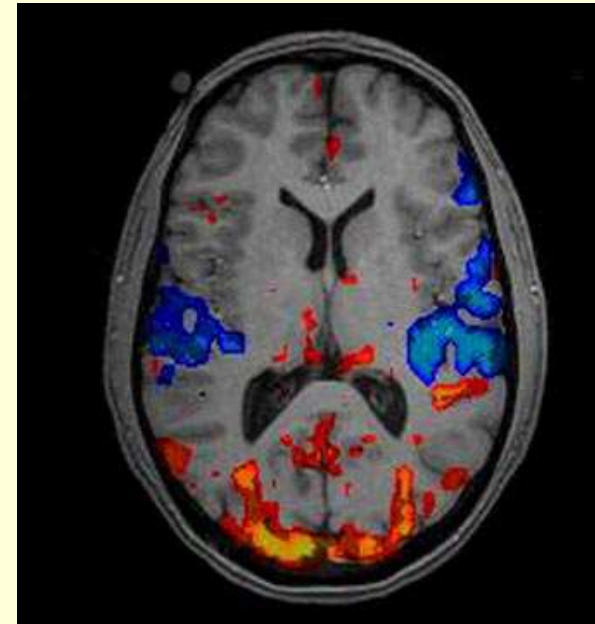
C'est cette voie hypothalamo-hypophysio-surrénalienne qui va nous permettre de mobiliser plus de ressources dans certains systèmes pour faire face à un **stress**.





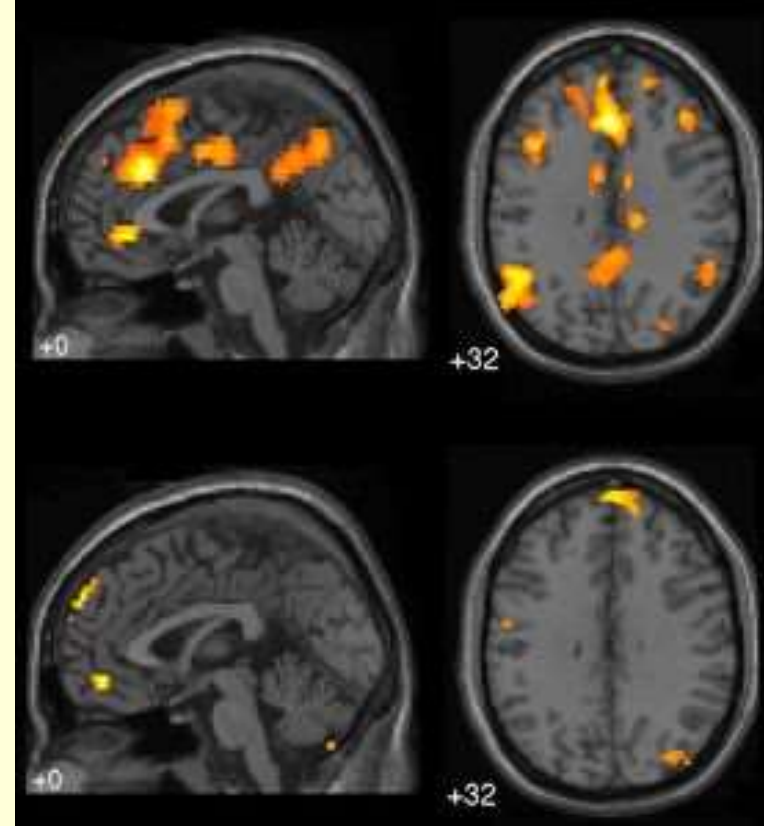
Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

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



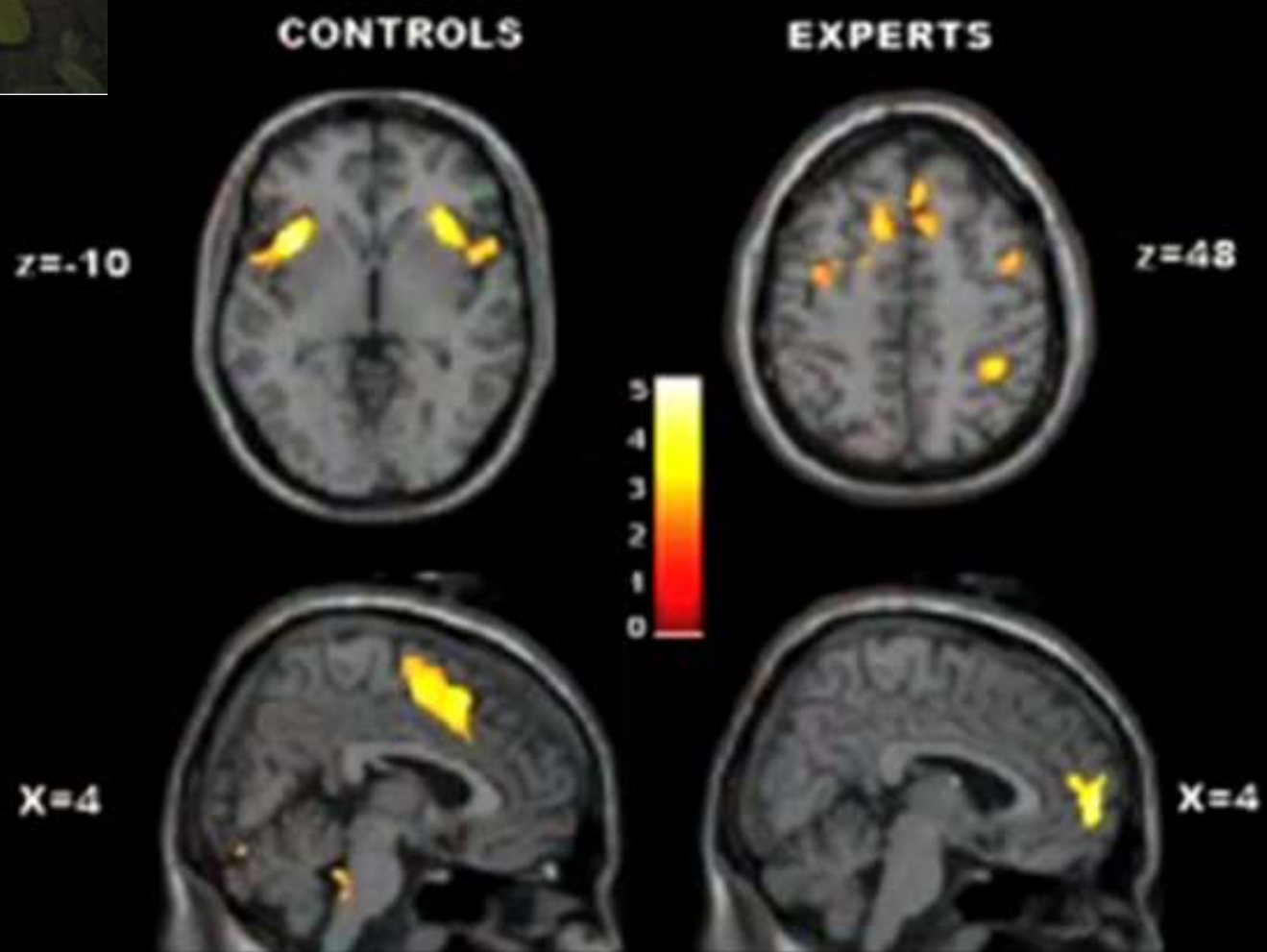
Peut être utilisée sans l'injection de substance dans l'organisme du sujet

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

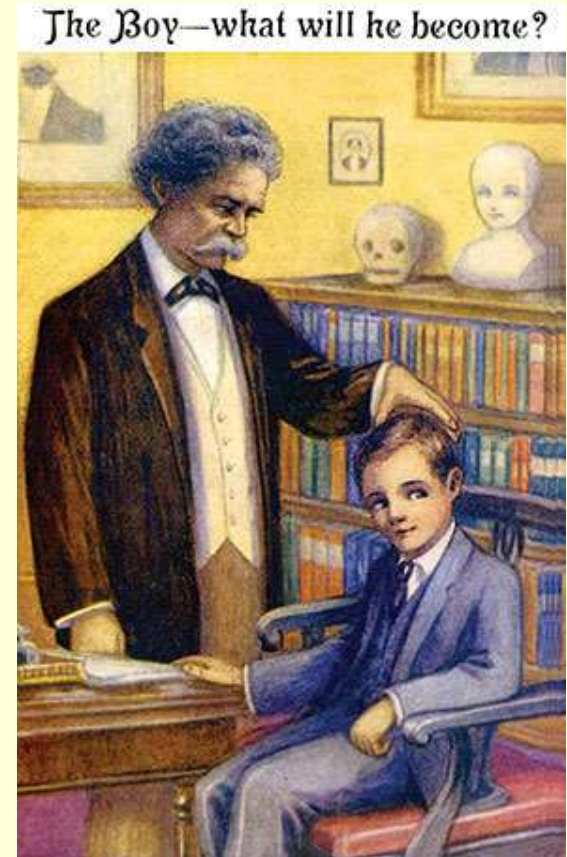
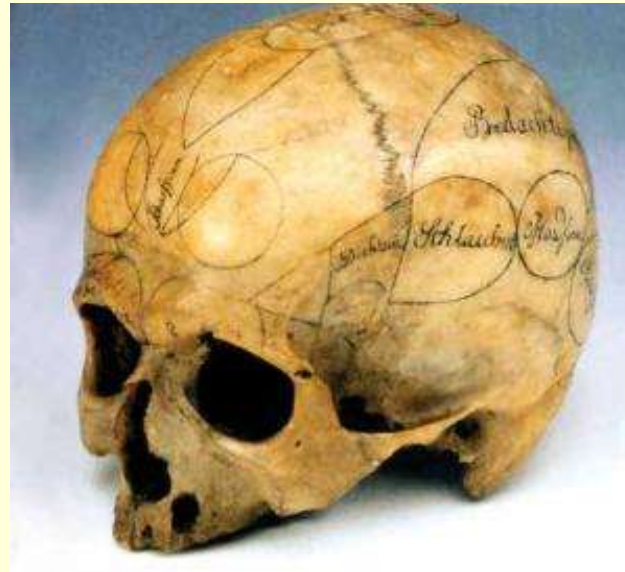
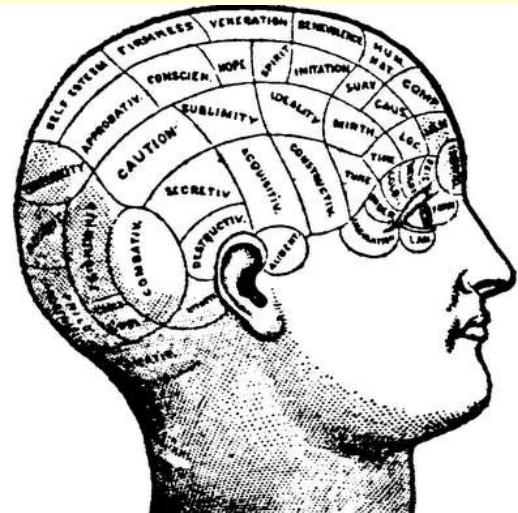


La **résolution spatiale** est de l'ordre du millimètre (de **3 - 4 mm** pour les machines à 3 Tesla à **1 - 0,5 mm** pour celles à 7 Tesla) ($\geq 5 - 10$ mm pour le PET scan)

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



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

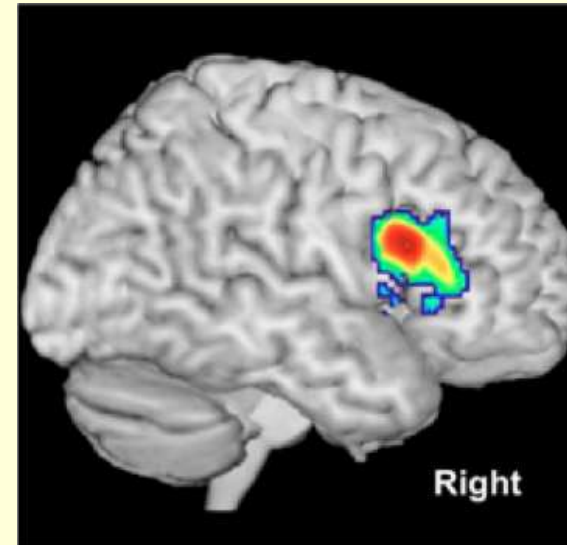


« Not this ridiculous fMRI phrenology shit again ! »

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

- William Uttal

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

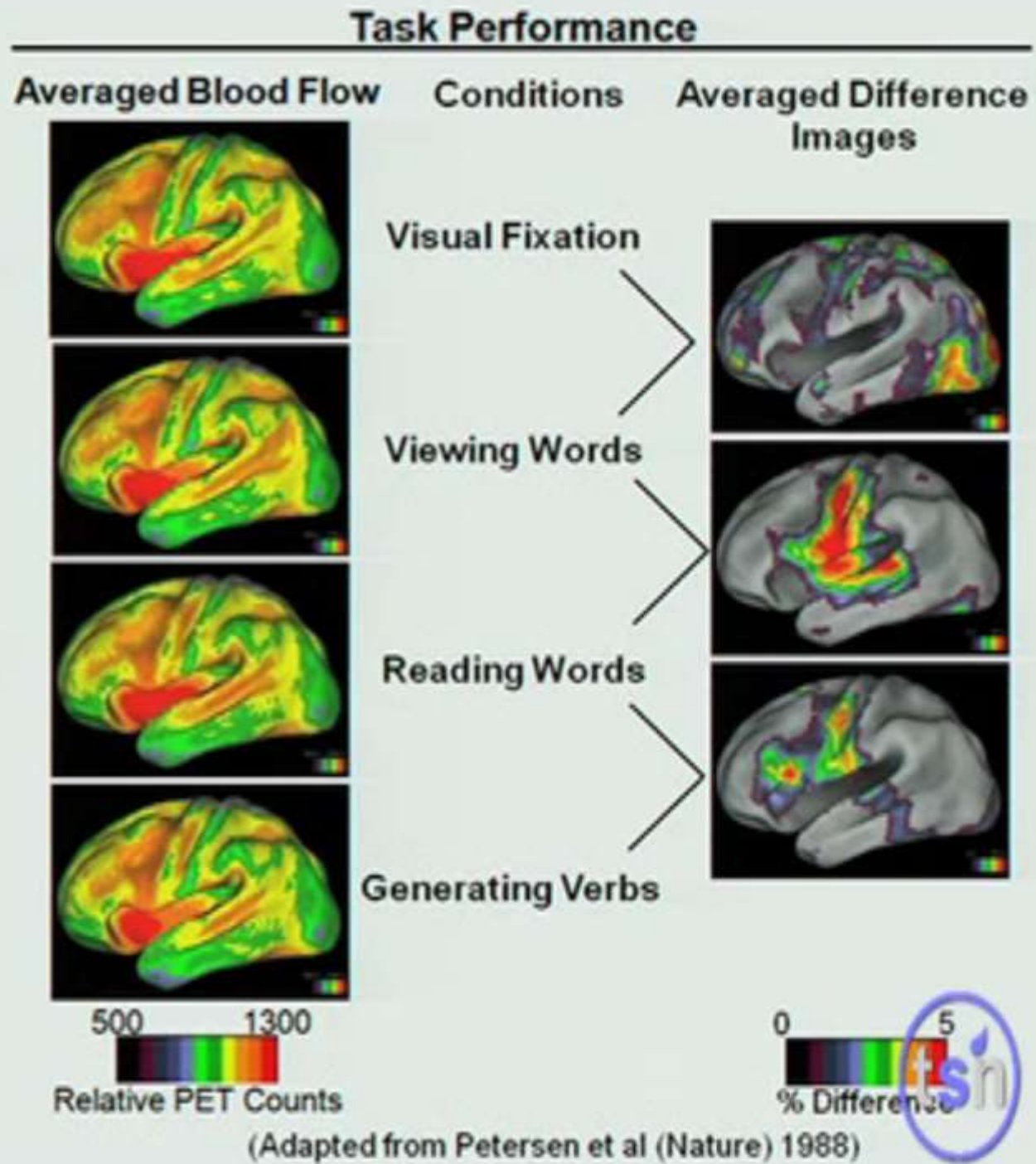


Et bien sûr, c'est toujours **une activité différentielle issue d'une soustraction** entre un état contrôle et l'état de lors d'une tâche.

« Our resting brain is never at rest. »

- Marcus Raichle

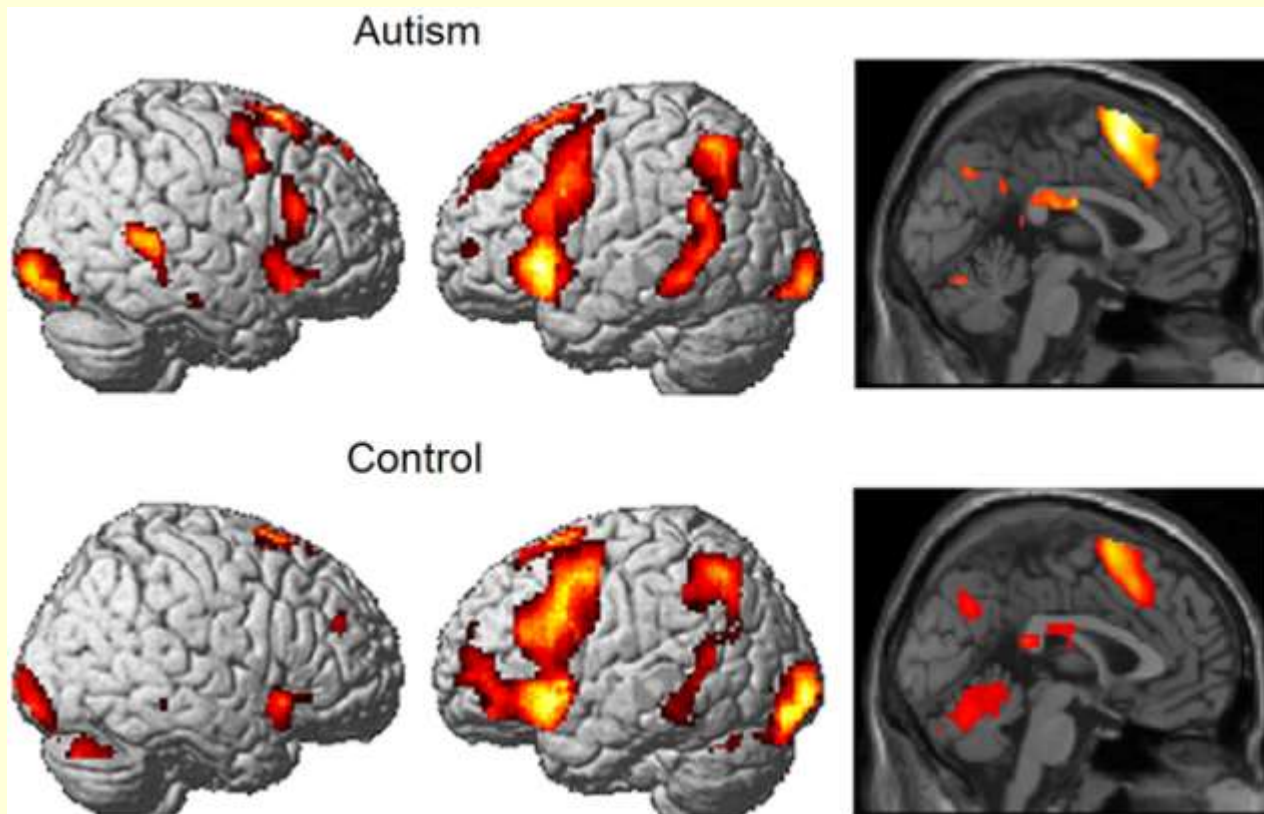
Two views of brain function
<http://www.cell.com/trends/cognitive-sciences/fulltext/S1364-6613%2810%2900029-X>



Certain.e.s se portent 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 à un endroit unique

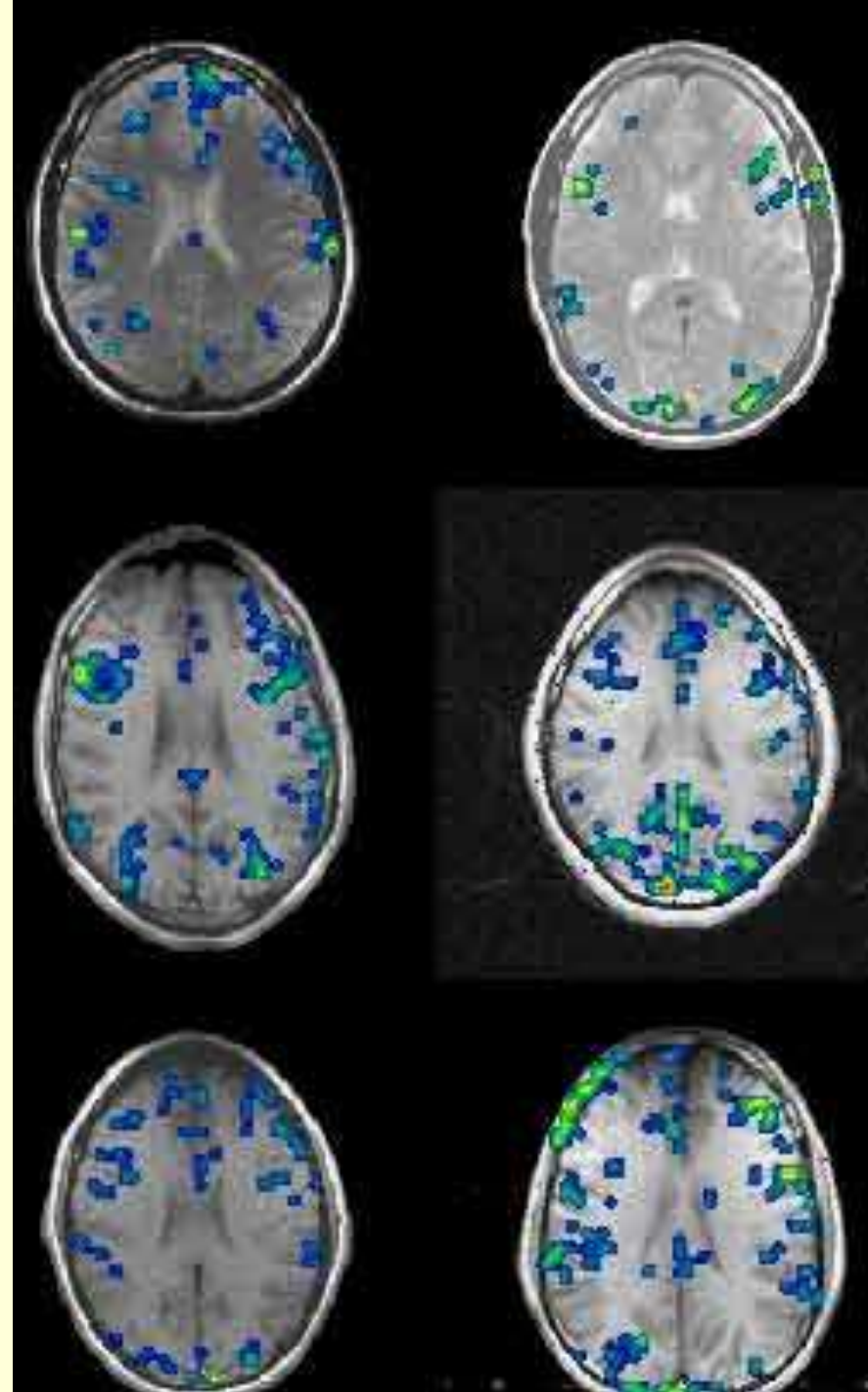
mais justement à **cartographier les régions d'un système qui s'activent en différentes combinaisons pour différentes tâches.**



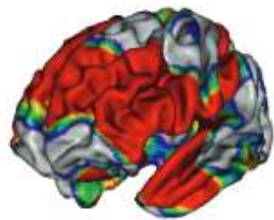
Diagnostiquer l'autisme de haut niveau & le syndrome d'Asperger à partir d'images cérébrales liées aux **pensées sociales** (PsychoMedia, décembre 2014)

<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/>

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



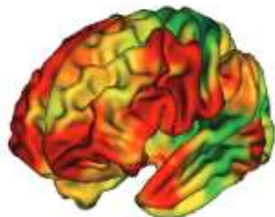
Principe d'équifinalité : capacité à atteindre le même état final à partir de différents points de départ.



Stratégie Mentale I



Stratégie Mentale II



Stratégie Mentale III



Pour une même tâche,
par exemple :

JAUNE	BLEU	BLEU
NOIR	ROUGE	VERT
VIOLET	JAUNE	ROUGE
JAUNE	VERT	NOIR
BLEU	ROUGE	VIOLET
VERT	BLEU	JAUNE

Cela nous ramène à parler de la tentation
des étiquettes fonctionnelles

“Strict localization” :

Nancy Kanwisher

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



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

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

- But at the same time:

we may have more of these specialized components

we may have a few extra fancy ones unique to humans

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

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

“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

MAIS...

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

→ The “**expertise hypothesis**”

https://en.wikipedia.org/wiki/Fusiform_face_area

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

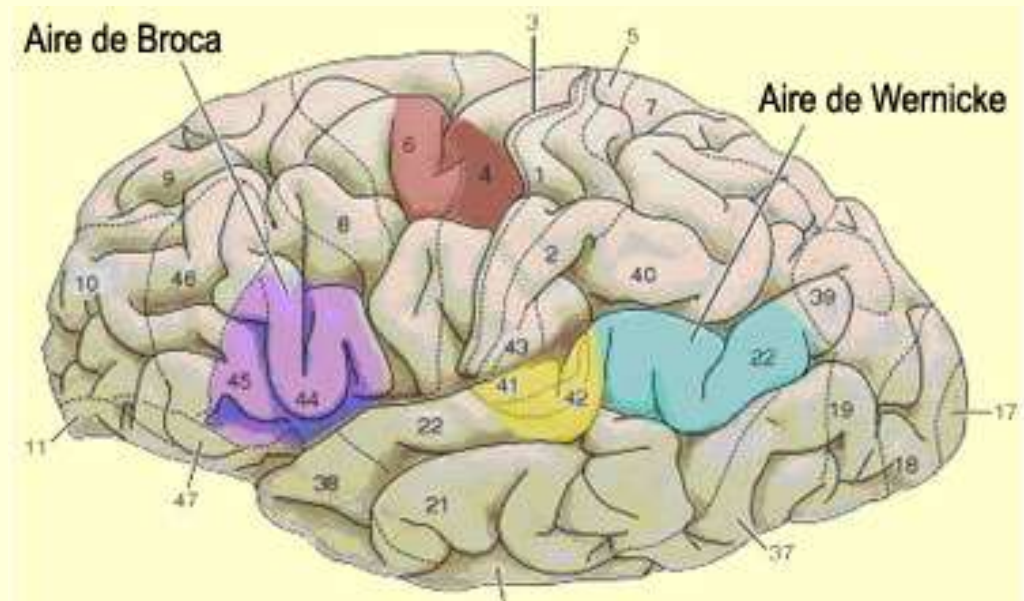
La tentation **des étiquettes fonctionnelles**
avec quelques exemples :

- l'aire de Broca
- le cortex insulaire (ou insula)
- le « cas » du cervelet

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

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

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



Le BLOGUE du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

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

[Parler sans aire de Broca](#)

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

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

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

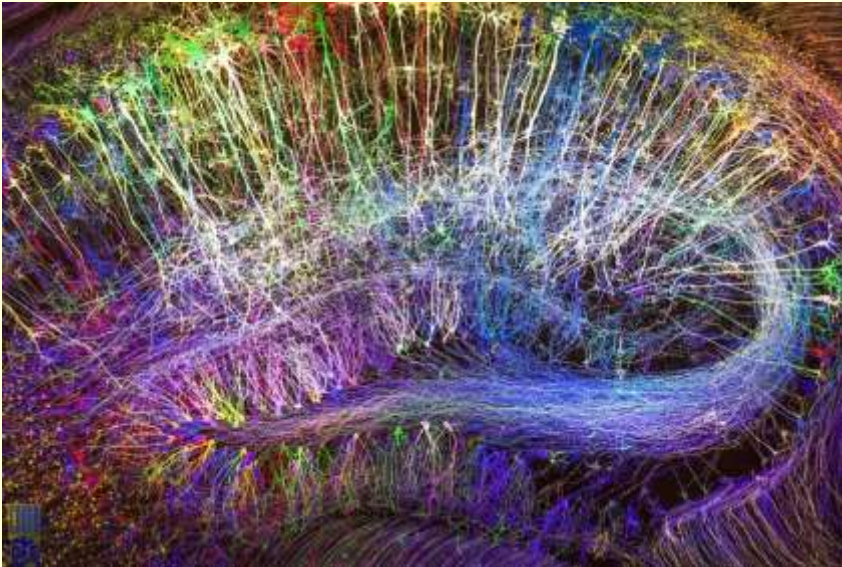


Cela dit, ce n'est pas parce qu'il y a très peu de chance de trouver des « centre de » quoi que ce soit dans le cerveau que l'on ne peut pas y trouver des structures cérébrales bien **différenciées** avec circuits neuronaux aux **capacités computationnelles particulières** comme :

l'hippocampe

ou

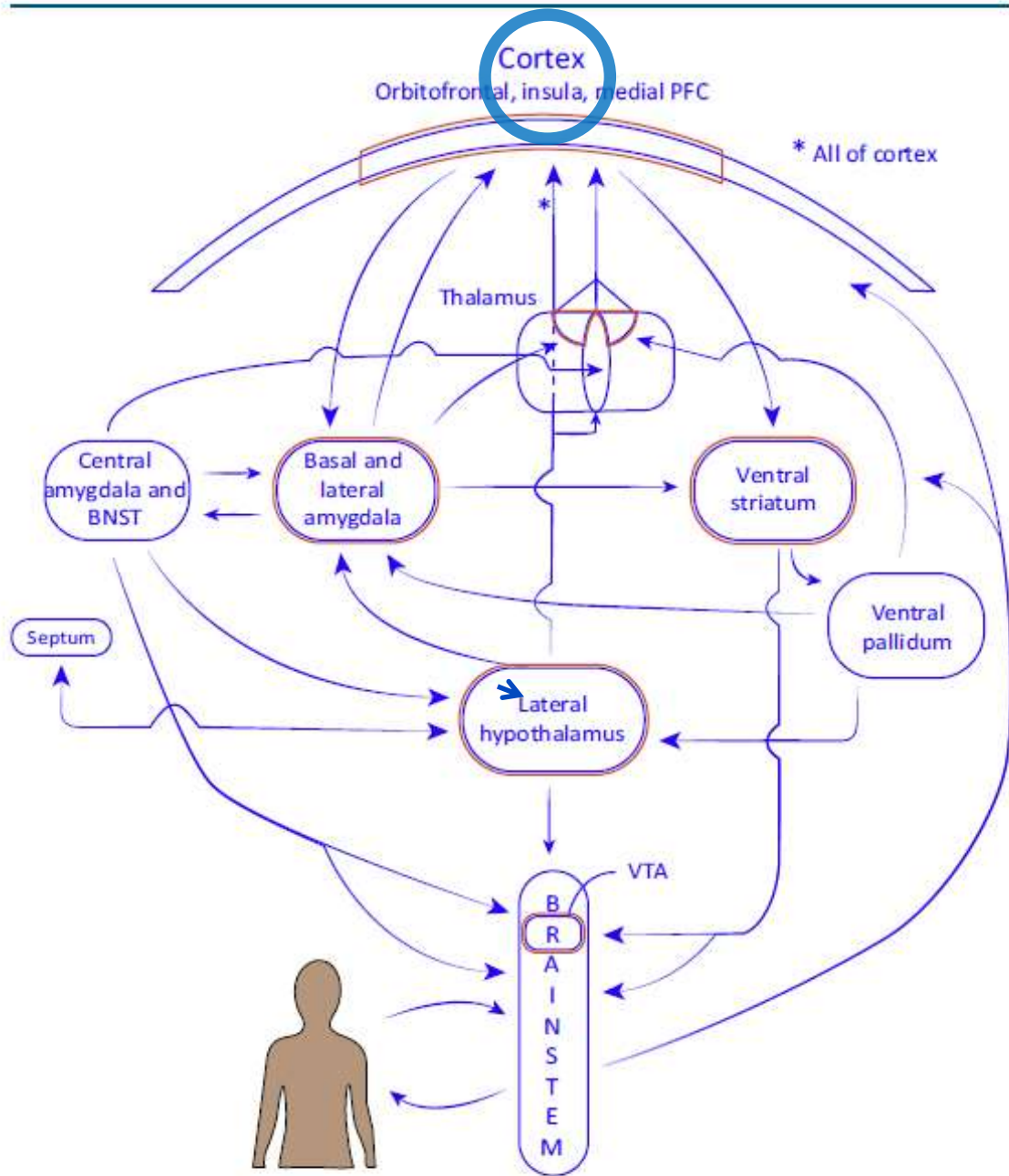
le cervelet.



Mais on ne peut leur accoler une étiquette fonctionnelle unique.

La tentation **des étiquettes fonctionnelles**
avec quelques exemples :

- l'aire de Broca
- **le cortex insulaire (ou insula)**
- le « cas » du cervelet



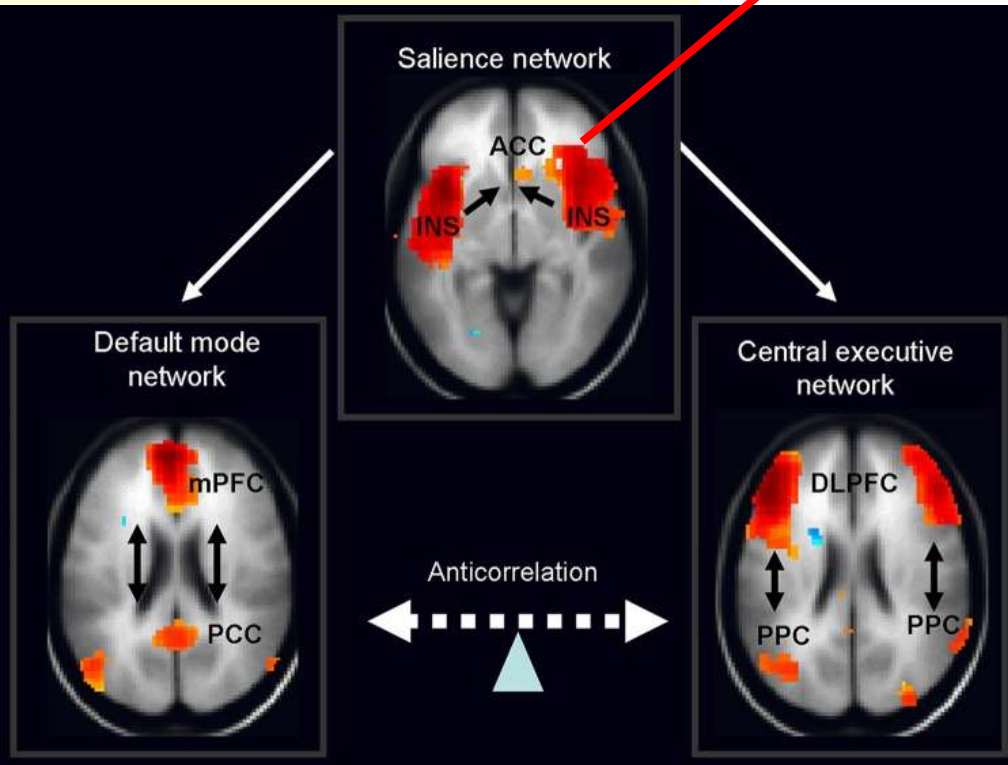
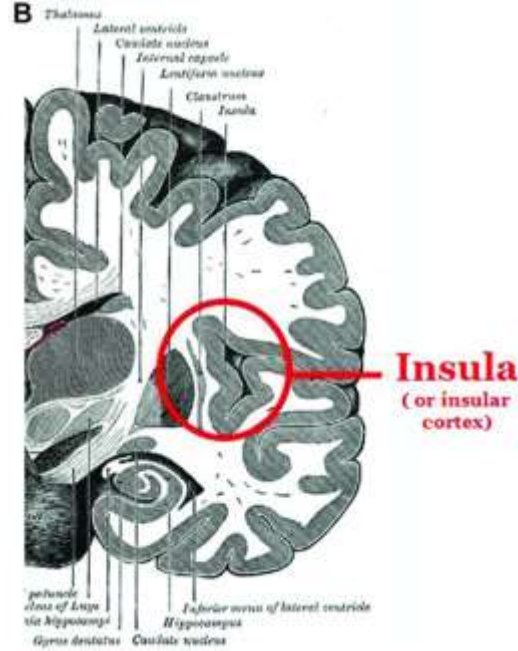
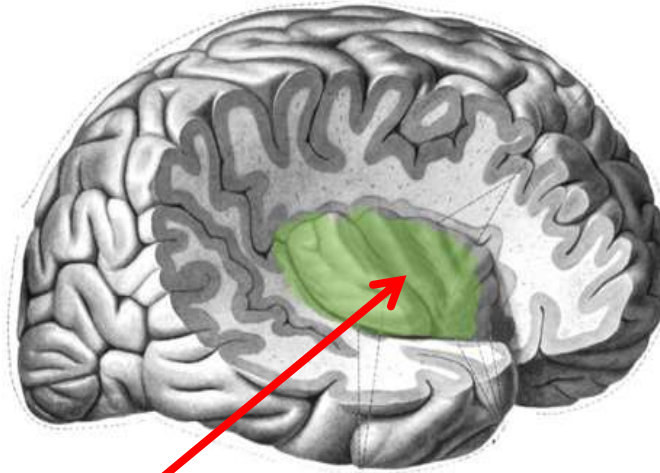
The **insula** is a brain structure implicated in **disparate** cognitive, affective, and regulatory functions, including **interoceptive** awareness, **emotional** responses, and **empathic** processes.

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

→ activée par un **dégoût** alimentaire

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

Un exemple de **recyclage neuronale**



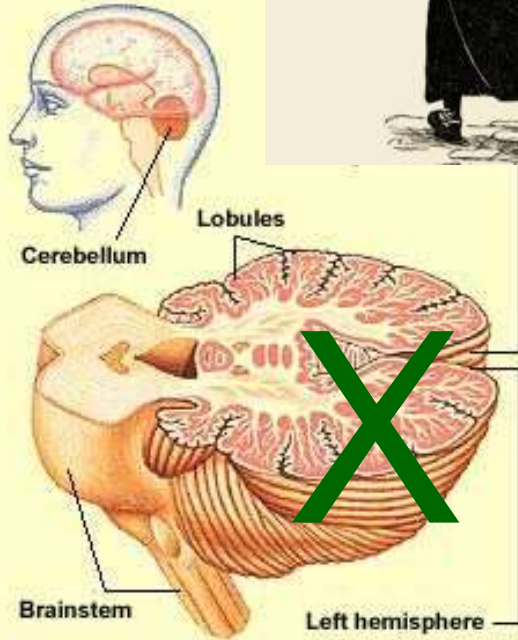
Et il ne faut jamais oublier que **l'insula** fait partie, comme toute structure cérébrale, de **différents grands réseaux** comme ici le « réseaux de la saillance »

La tentation **des étiquettes fonctionnelles**
avec quelques exemples :

- l'aire de Broca
- le cortex insulaire (ou insula)
- le « cas » du cervelet



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



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

Sauf que...

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

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

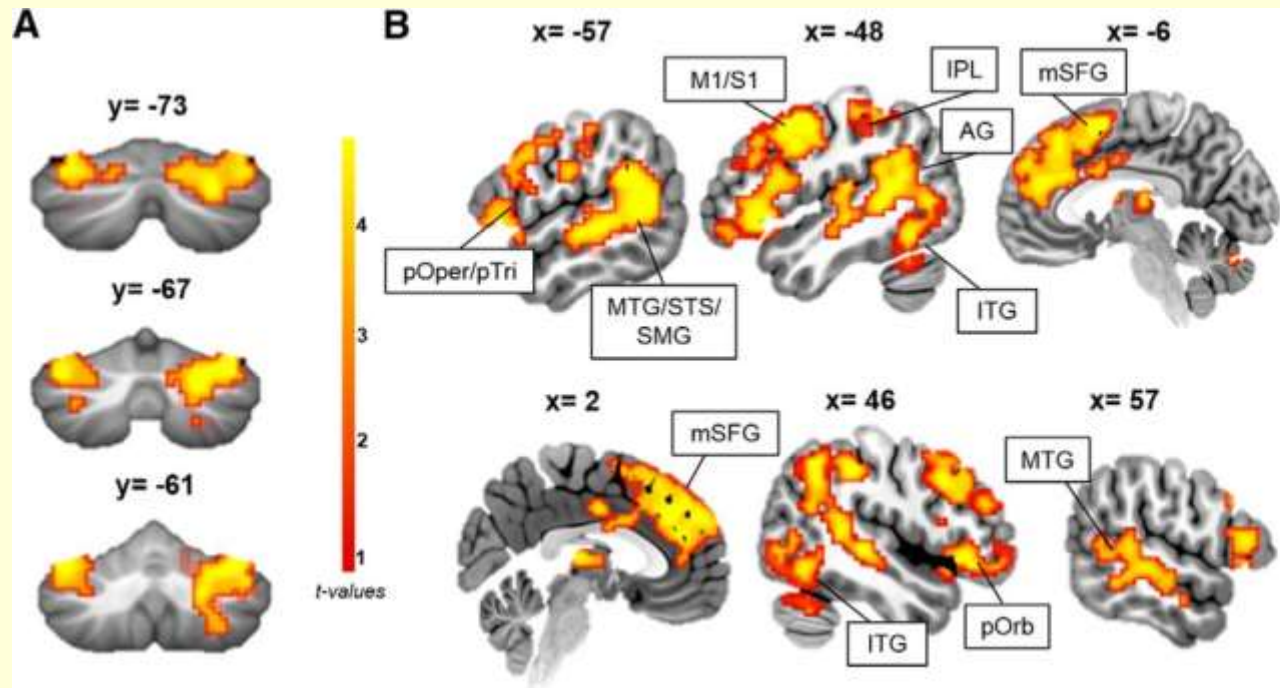
Il est maintenant clair que cette structure est impliquée dans tous les processus pour lesquels nous utilisons également le reste de notre cerveau : **les pensées, les émotions, le langage et même la mémoire** » - Jörn Diedrichsen, neuropsychologue .

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

Anecdote révélatrice :

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

Car le cervelet « s'allume » dans presque toutes les tâches en imagerie cérébrale

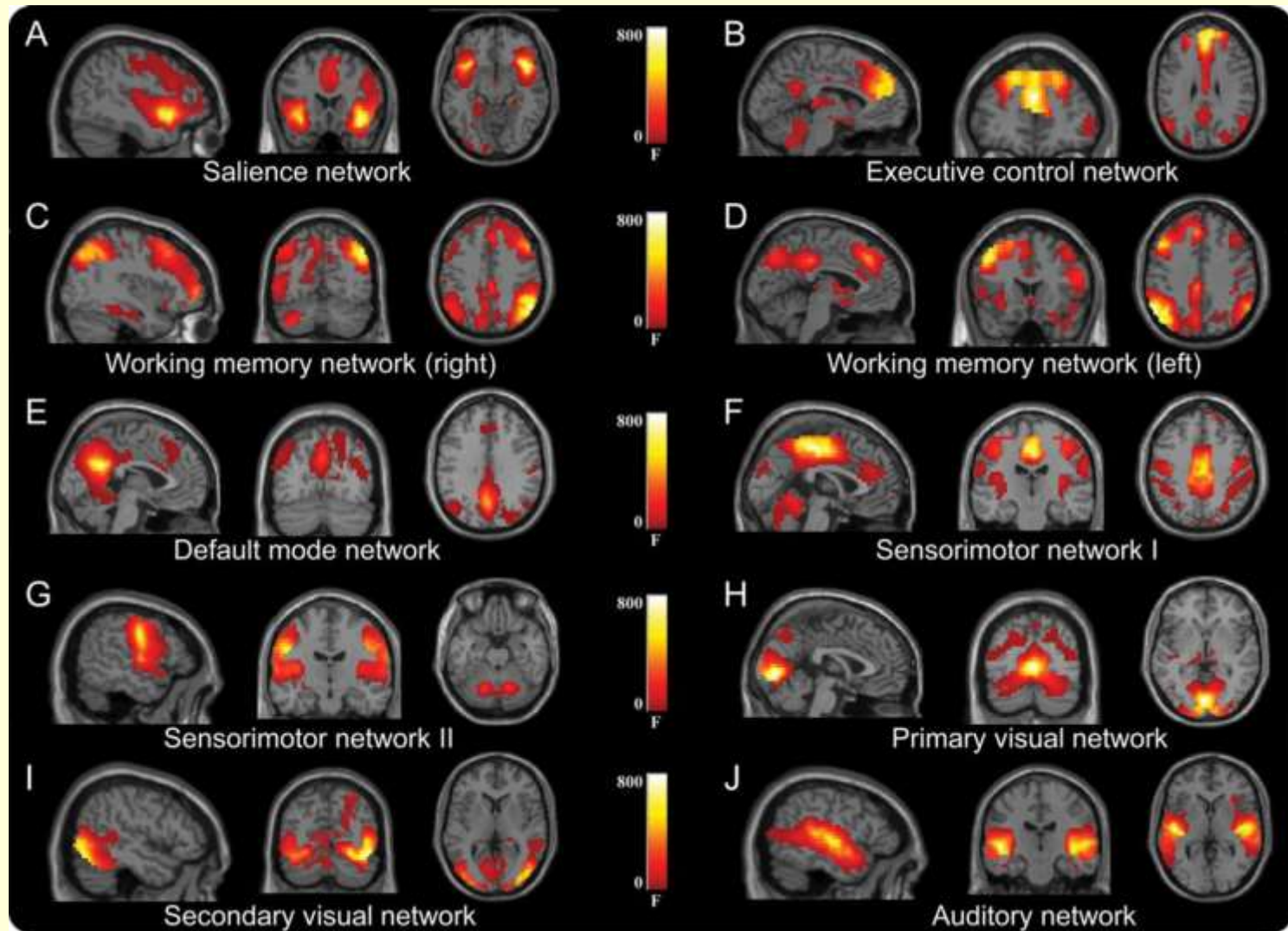


A, **Cerebellar** results of conjunction analysis across the three task conditions (predictive, nonpredictive, and scrambled) show **activation** of left VI/Crus I and right lobules VI/Crus I/Crus II.

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

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

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



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

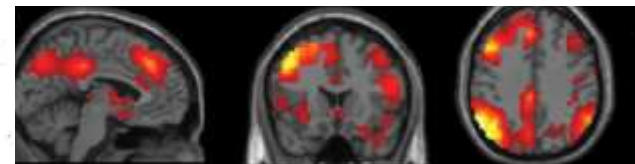


BEHAVE

THE BIOLOGY
of HUMANS at OUR
BEST and WORST



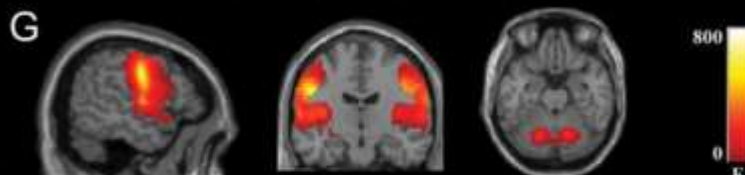
ROBERT M.
SAPOLSKY



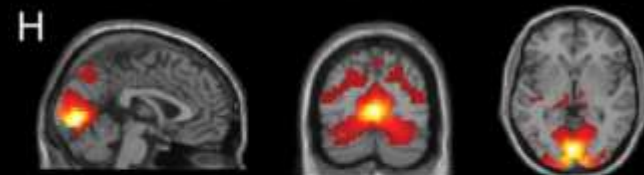
Working memory network (left)



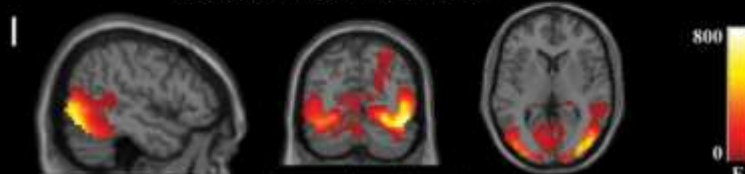
Sensorimotor network I



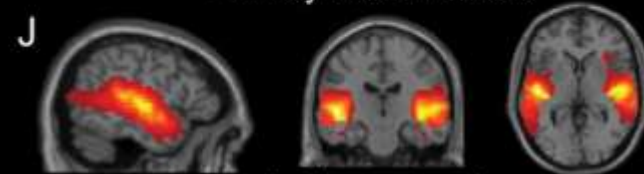
Sensorimotor network II



Primary visual network

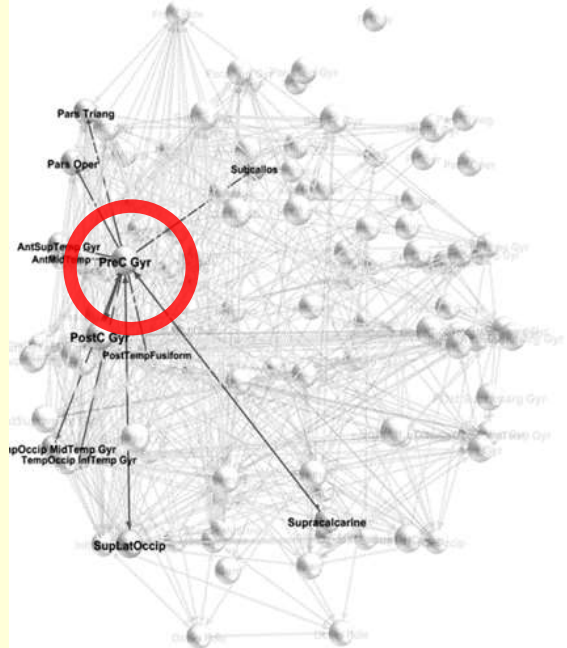


Secondary visual network

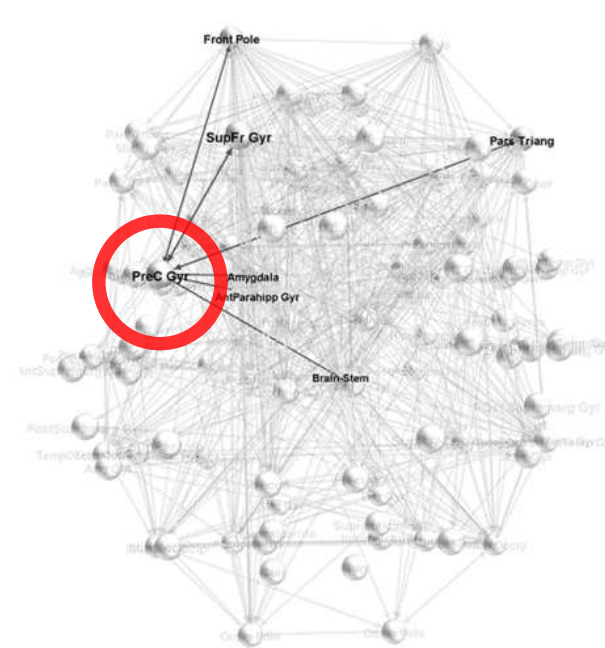


Auditory network

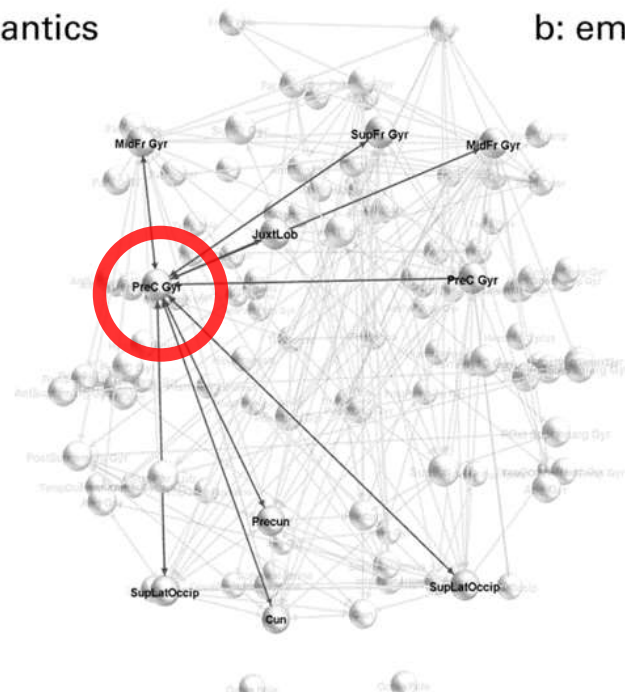
Exemple d'une **même structure** cérébrale impliquée dans **différents réseaux** dans **différentes situations**.



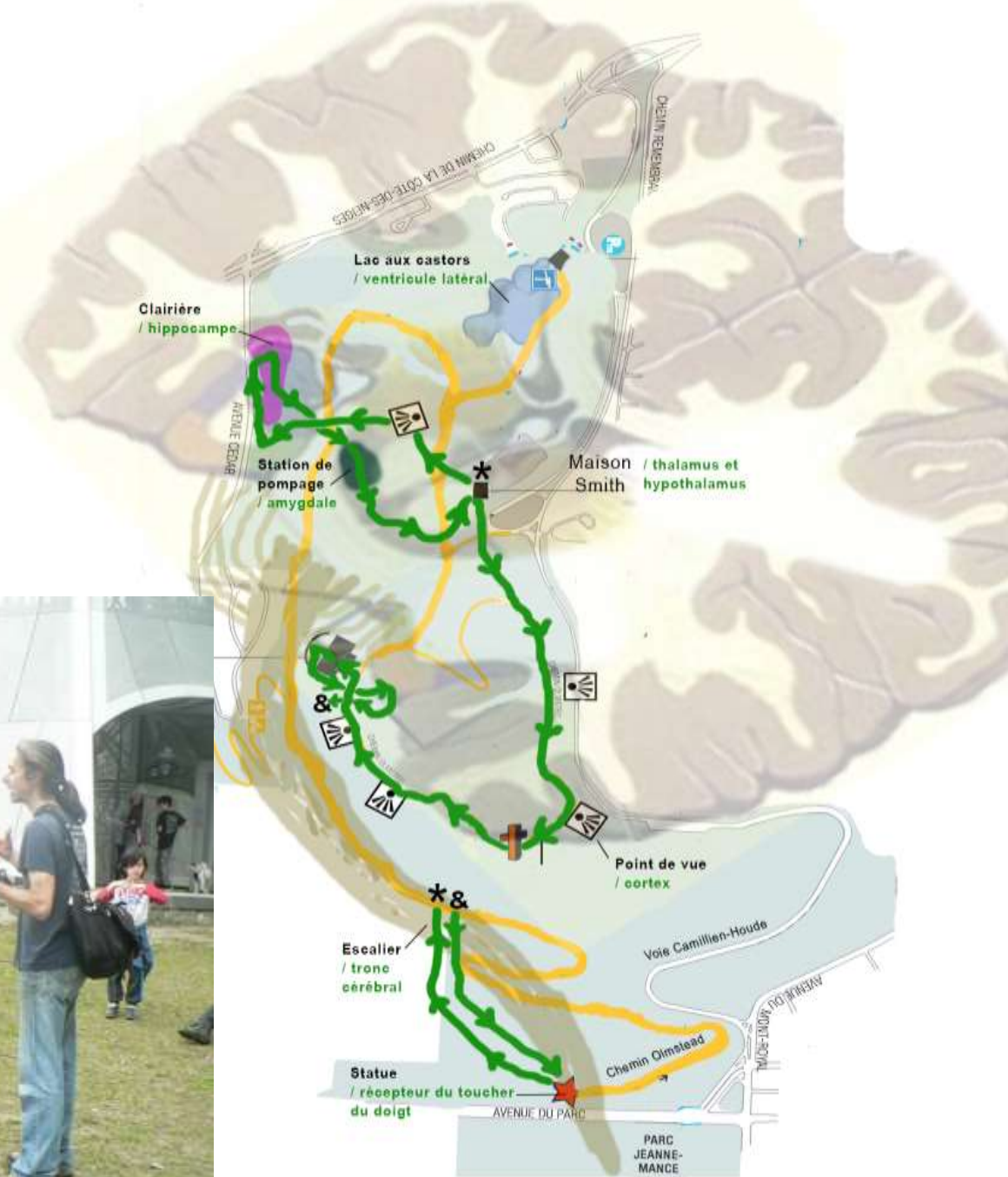
a: semantics

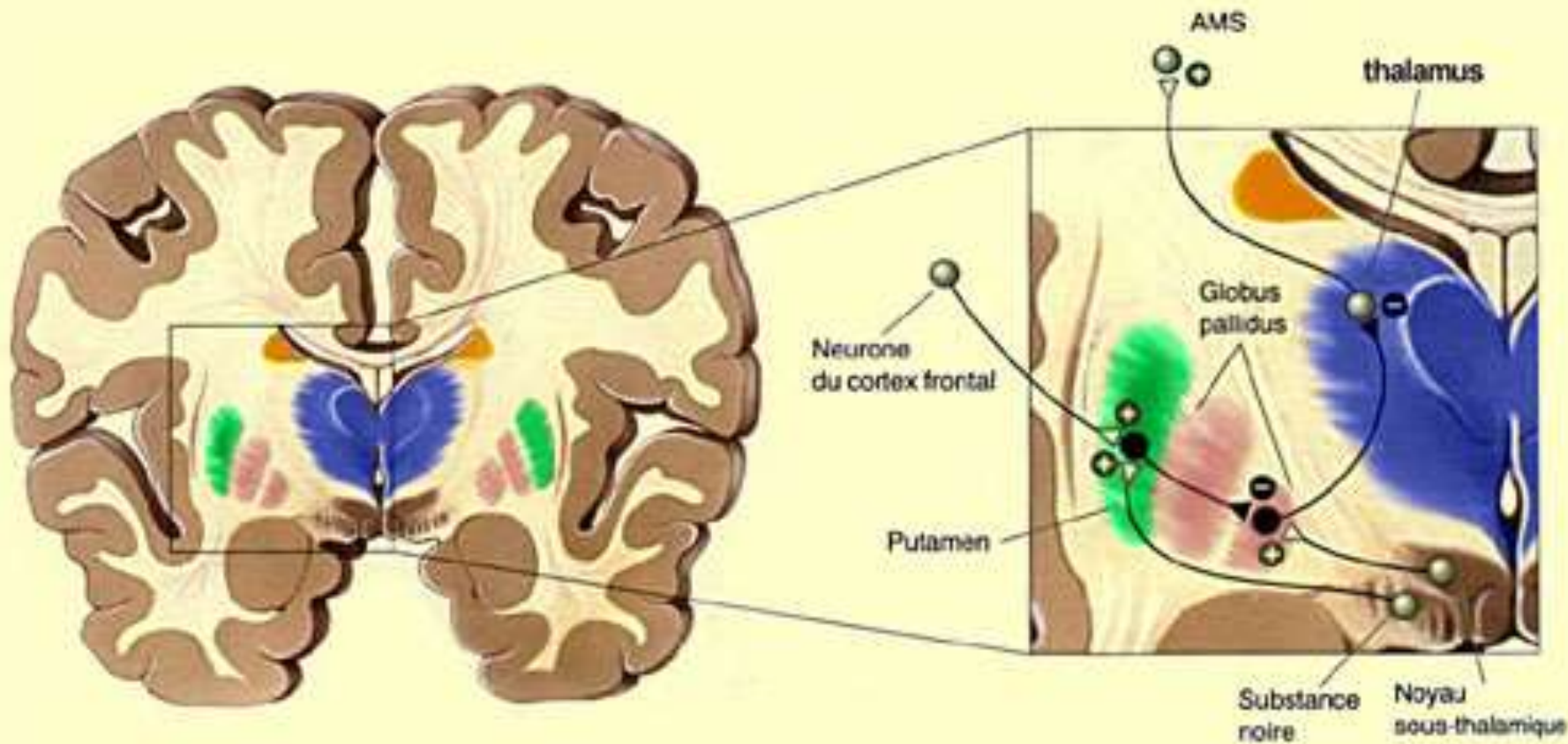


b: emotion

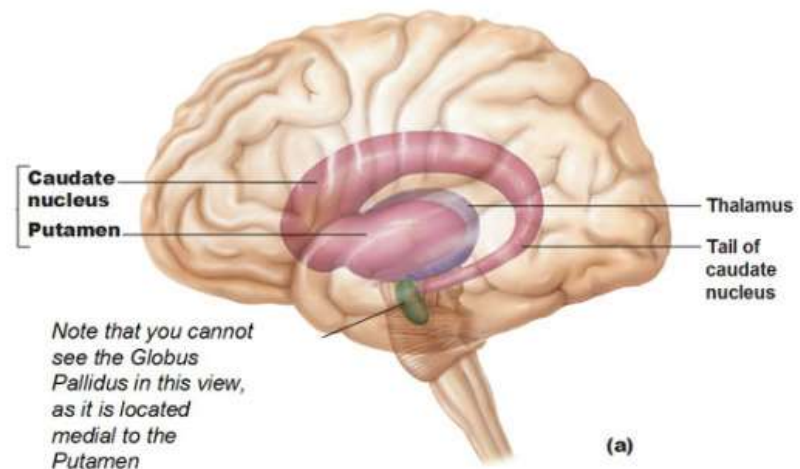


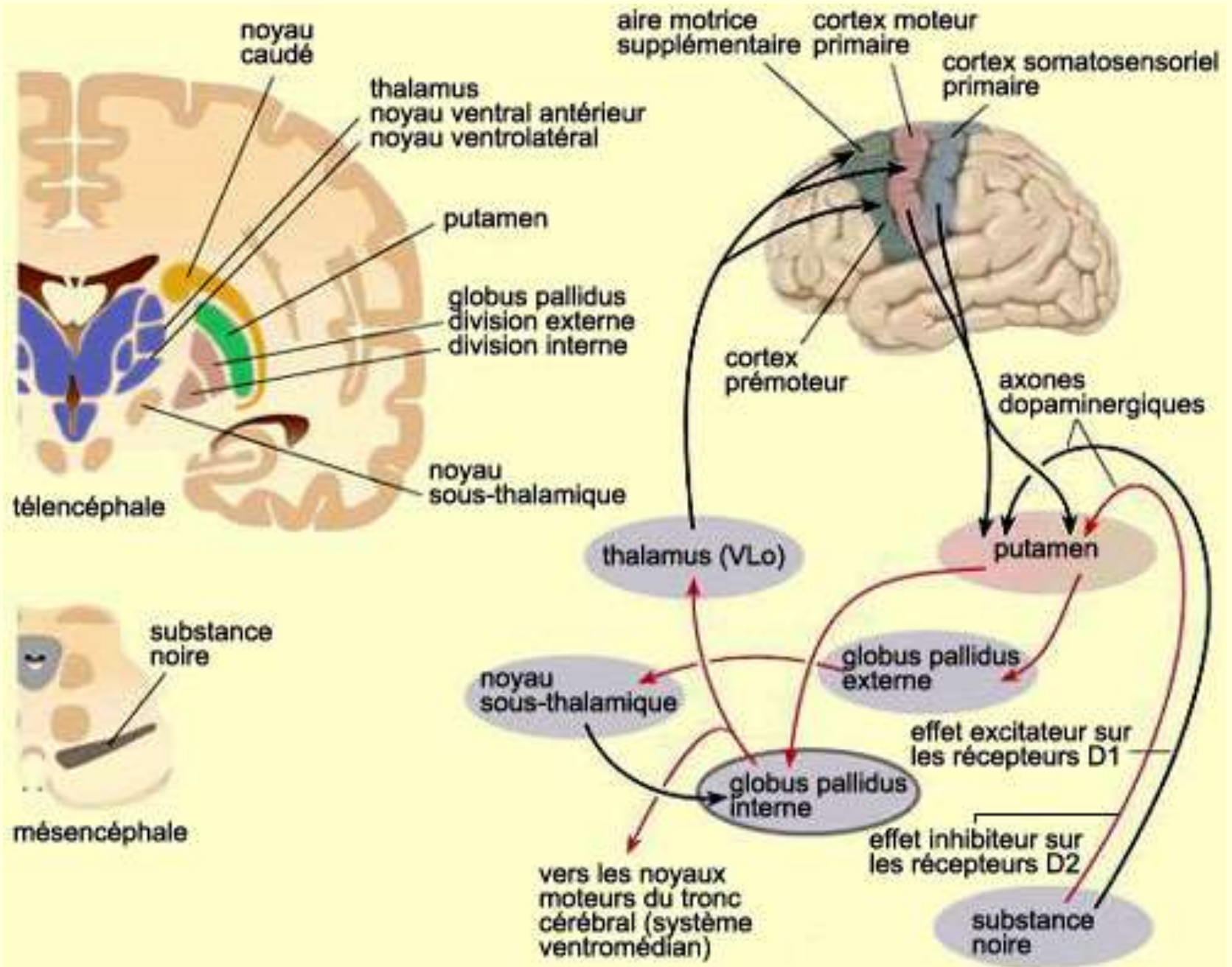
c: attention

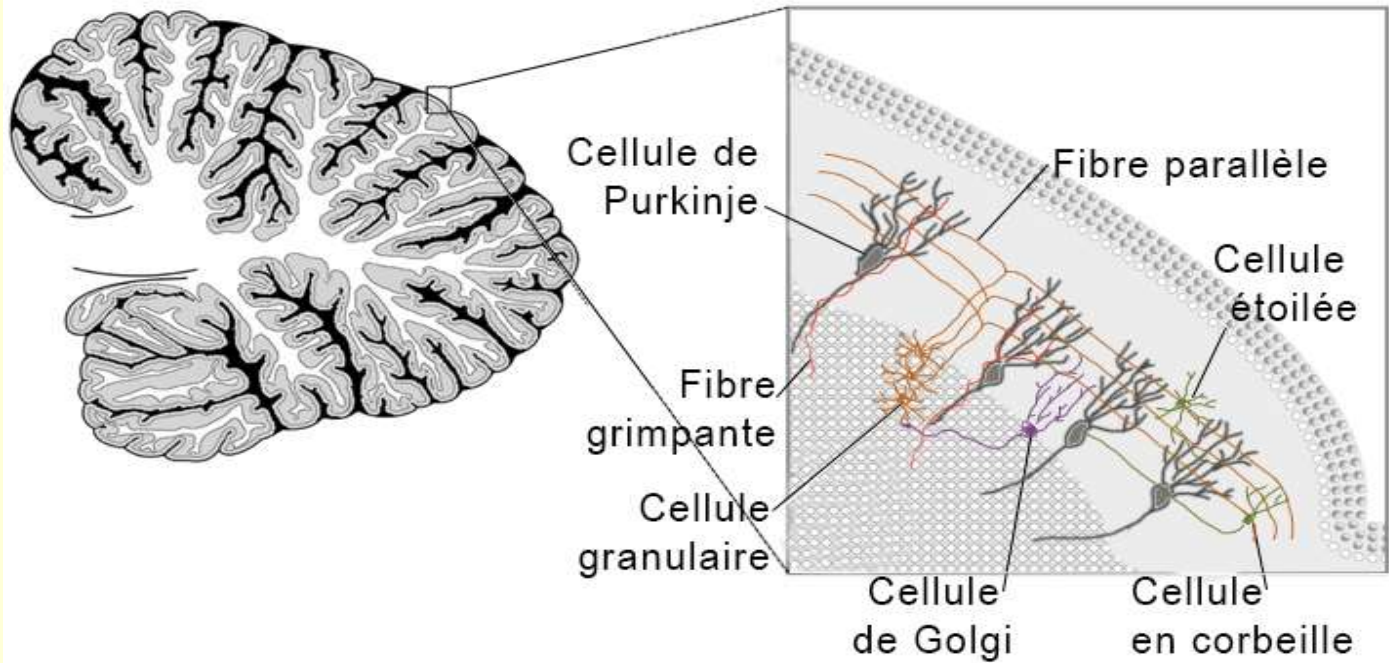
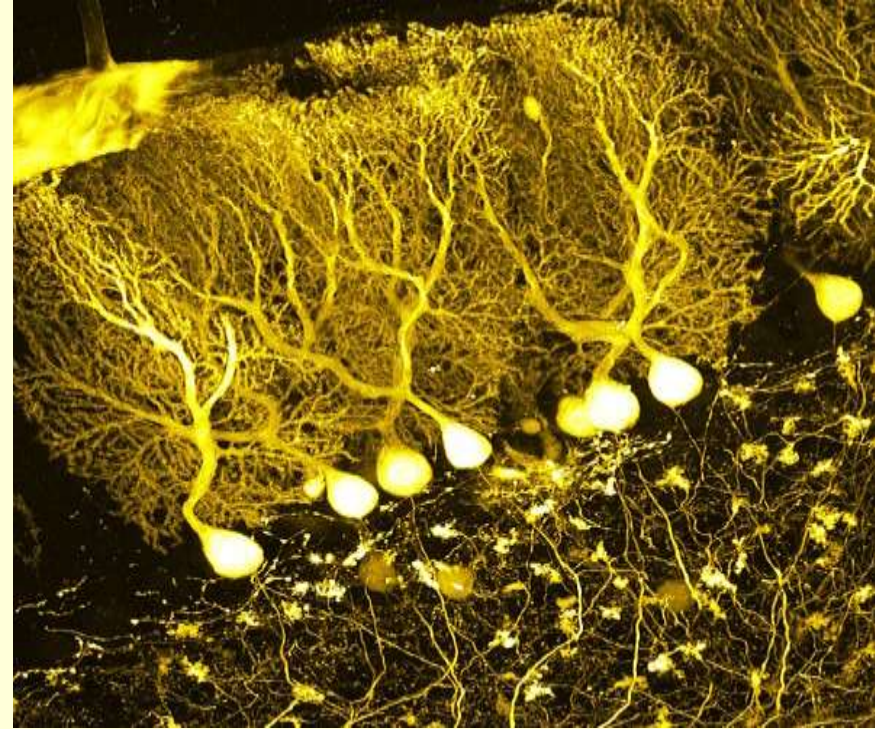


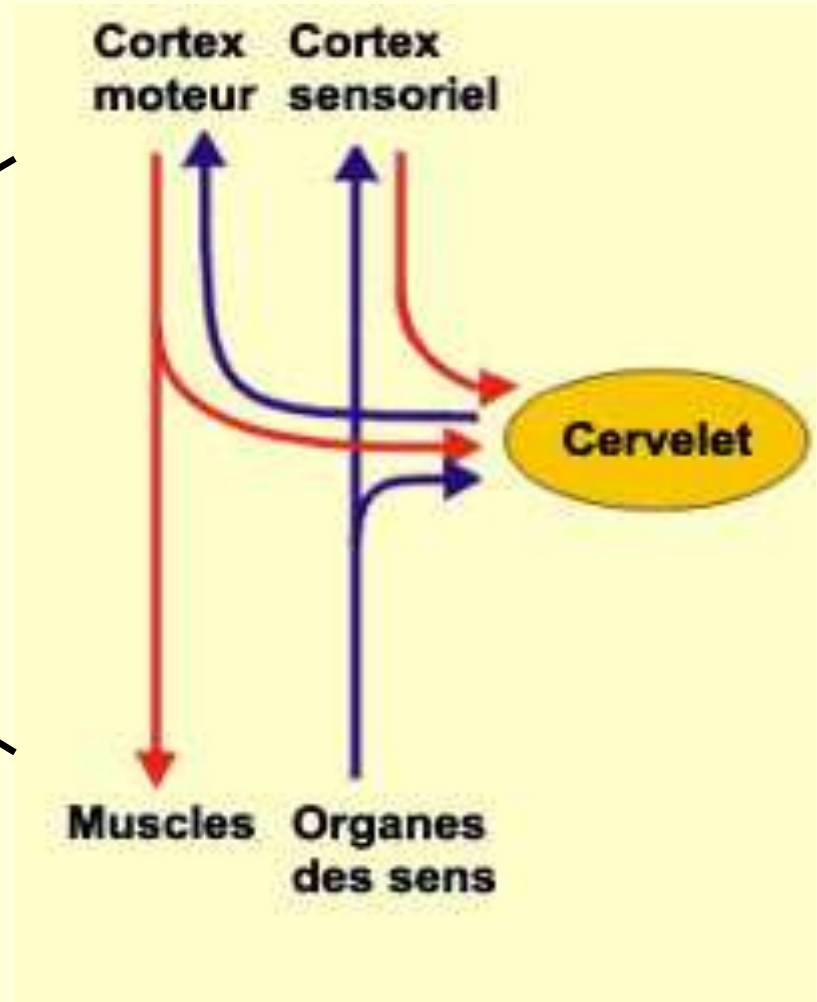
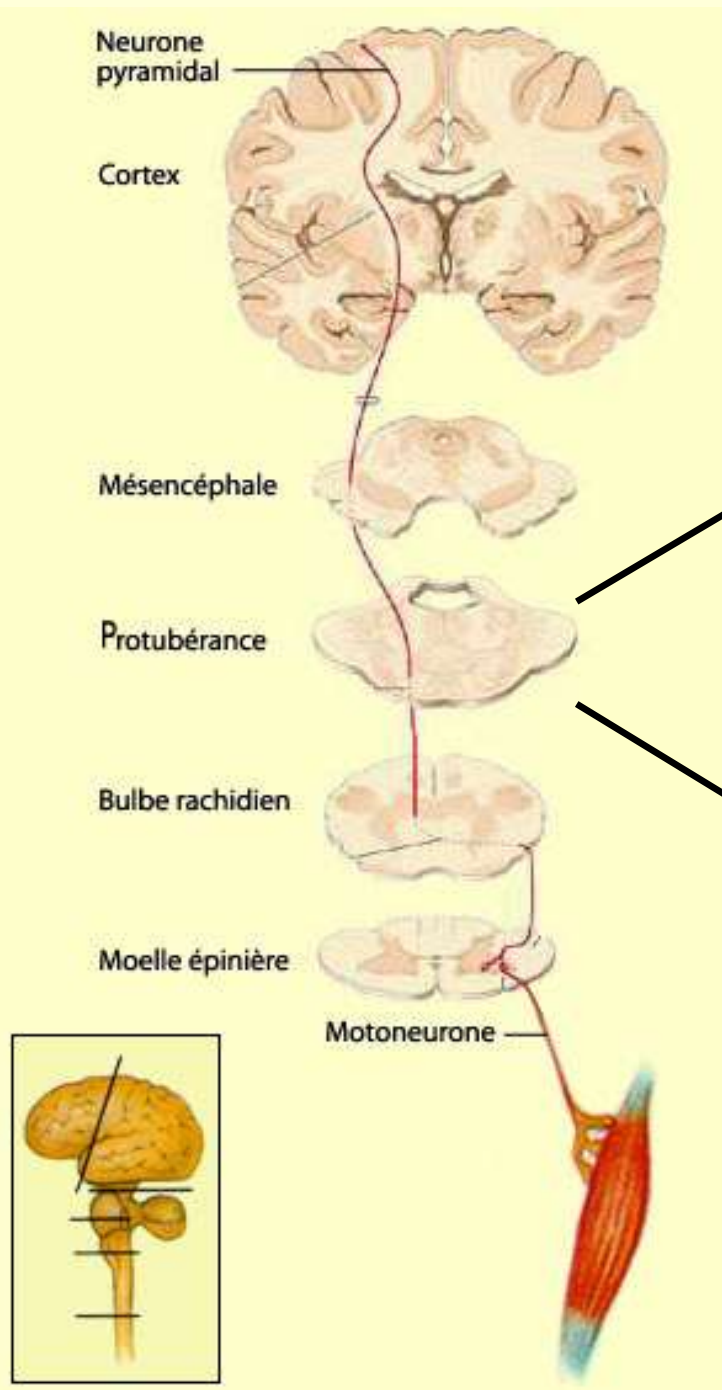


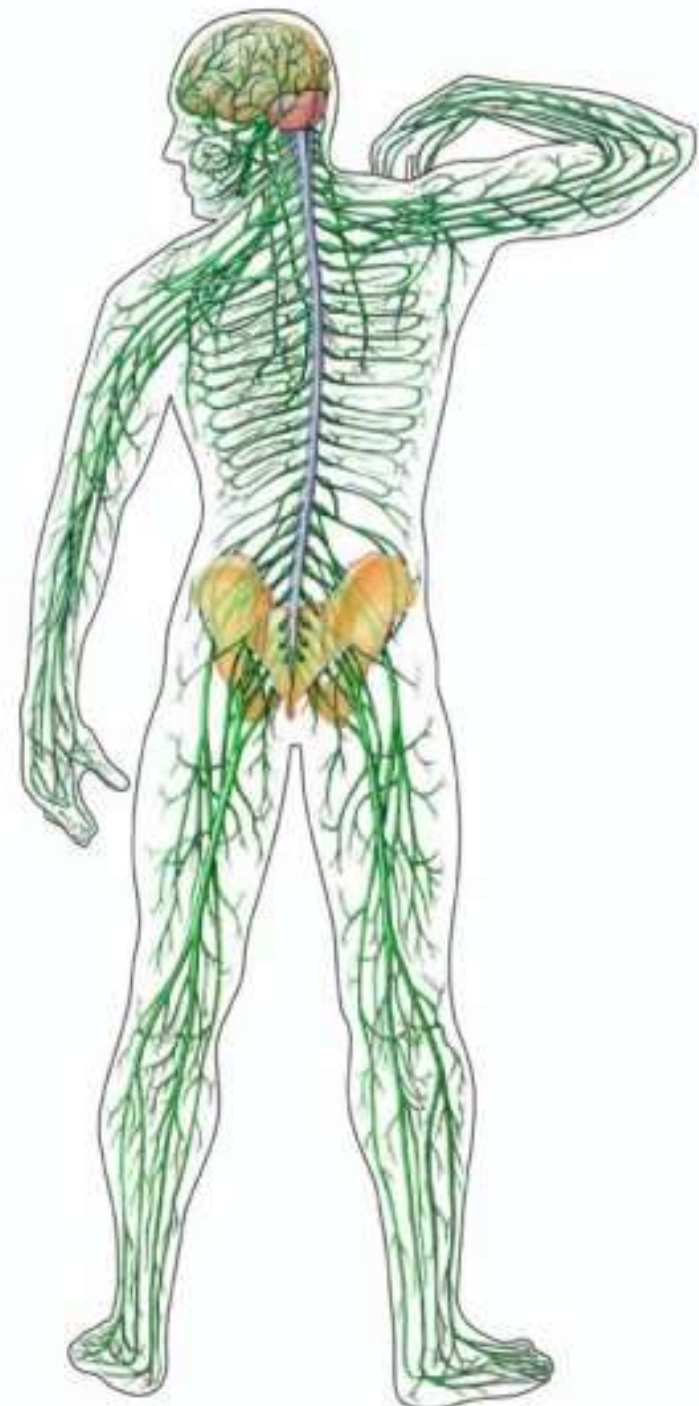
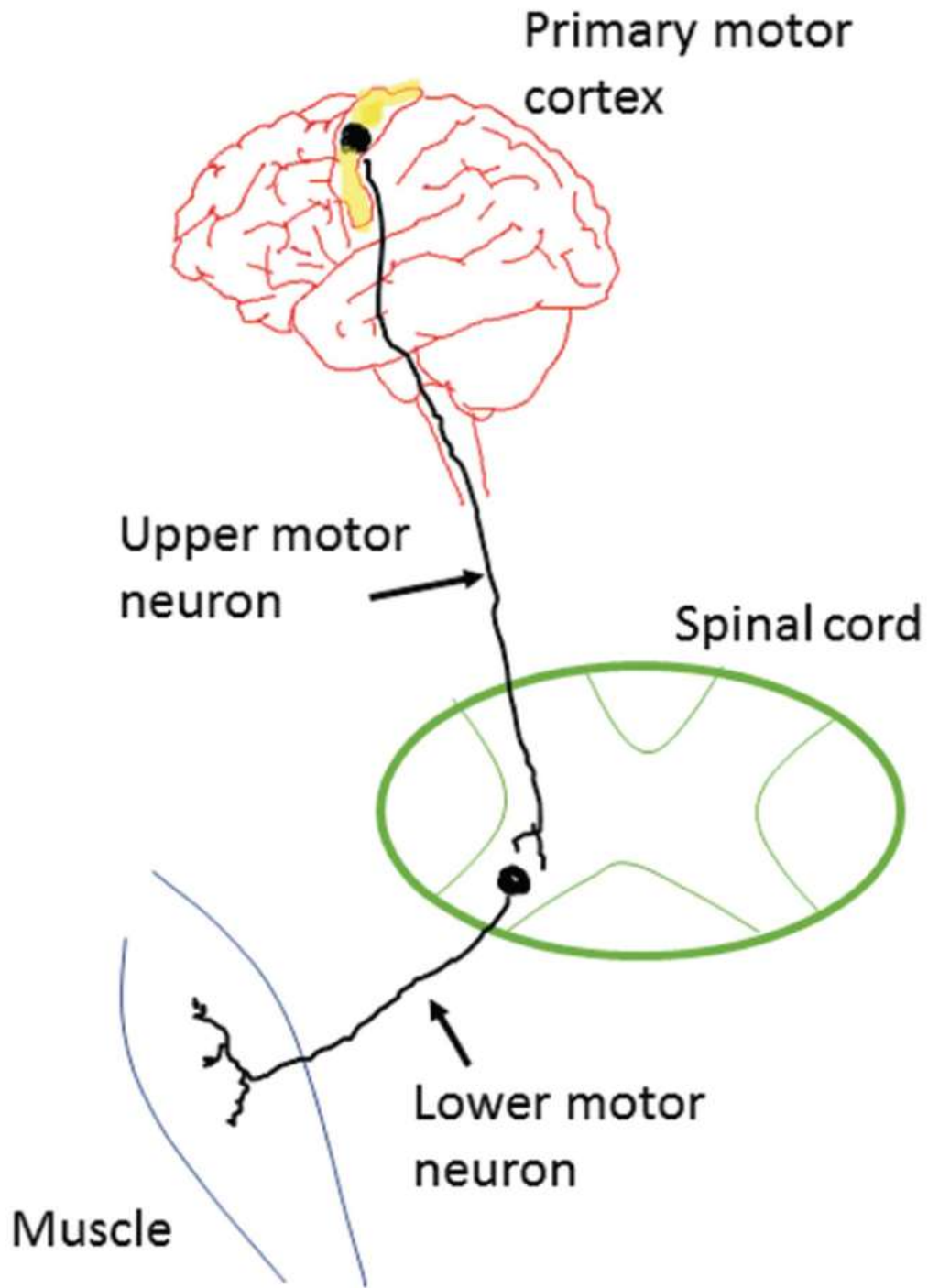
Basal Ganglia



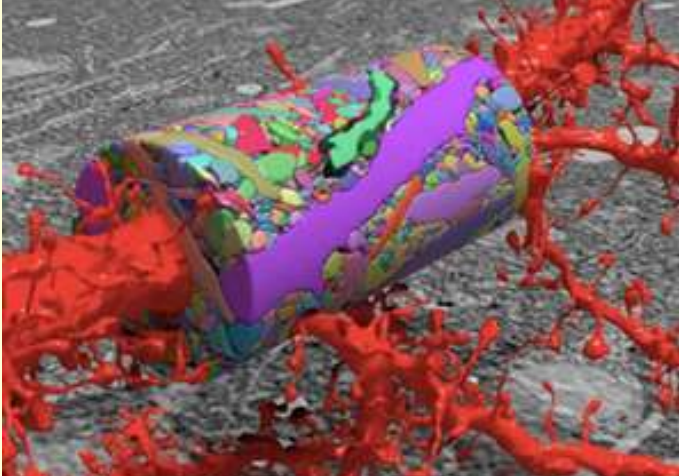








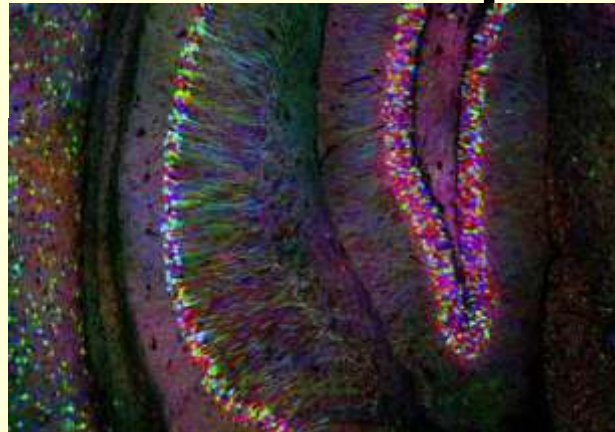




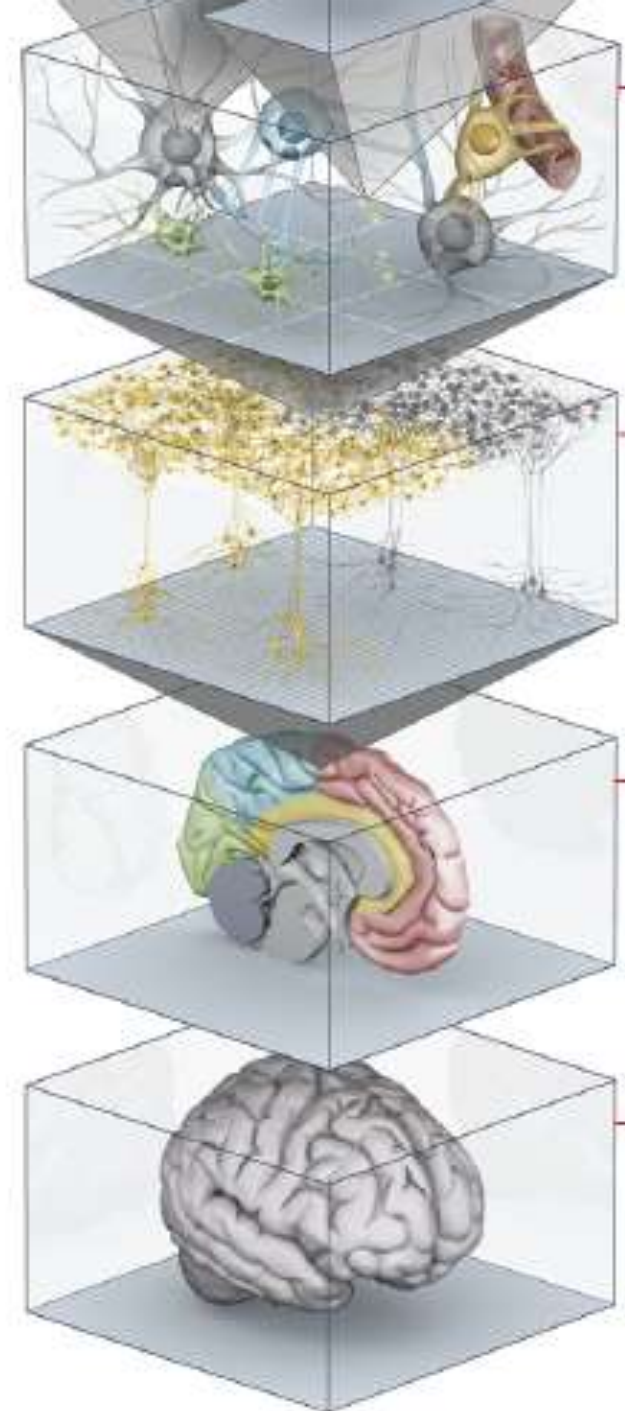
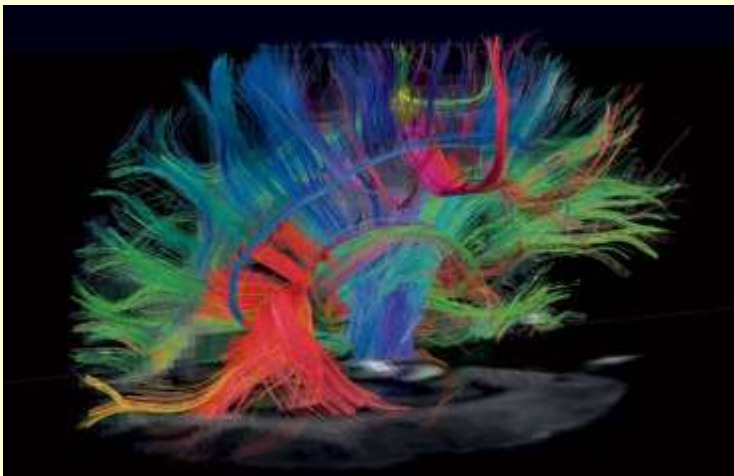
de l'échelle
« micro »



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

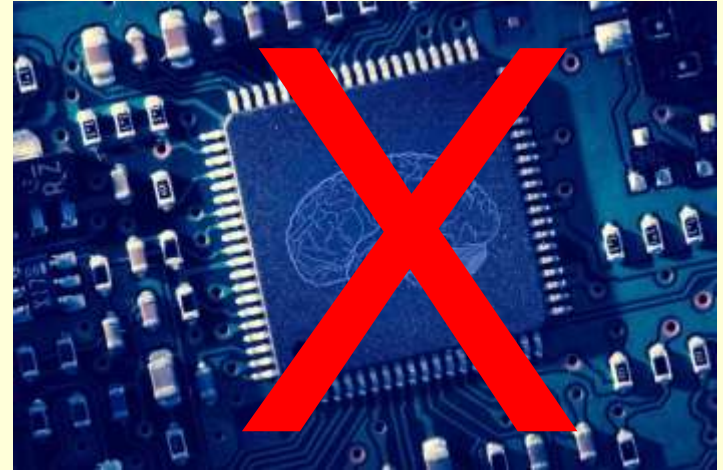
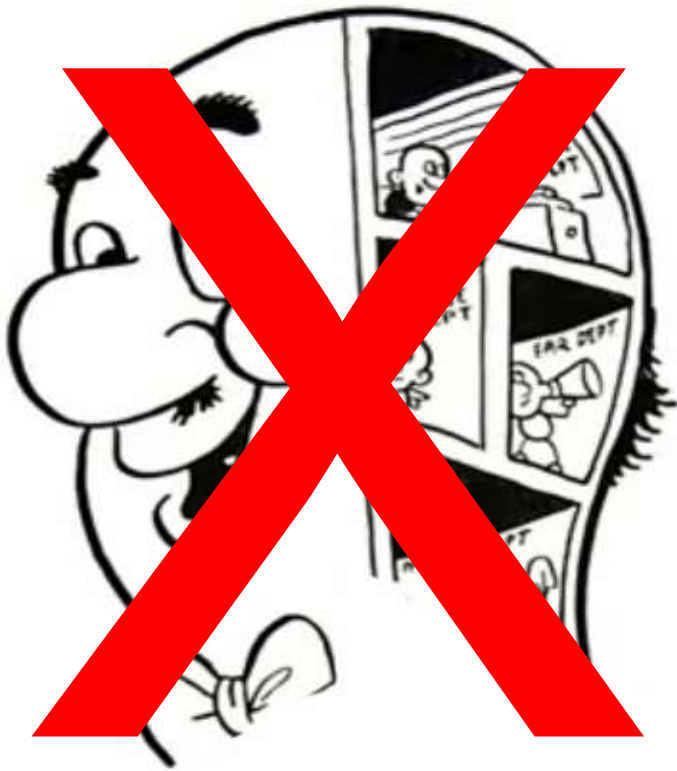


à l'échelle
« macro »

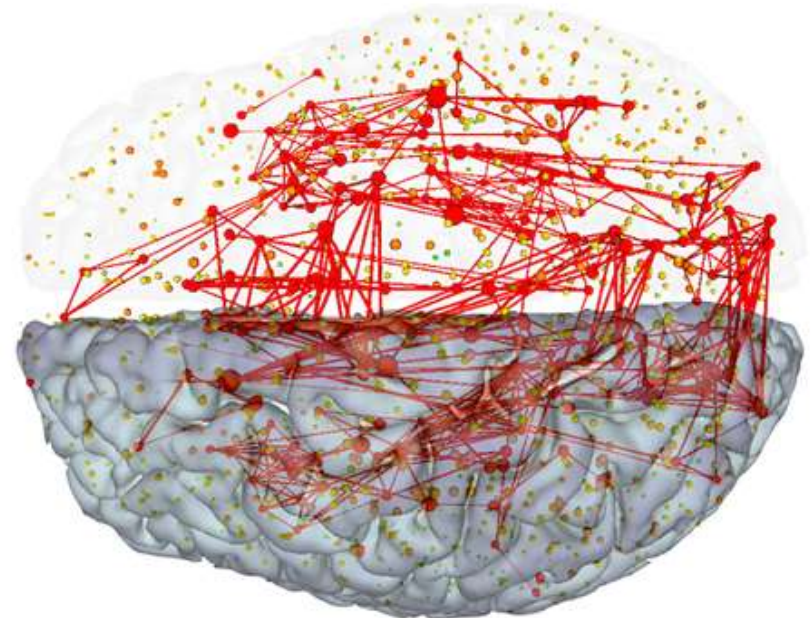


« There is no boss in the brain. »

- M. Gazzaniga



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

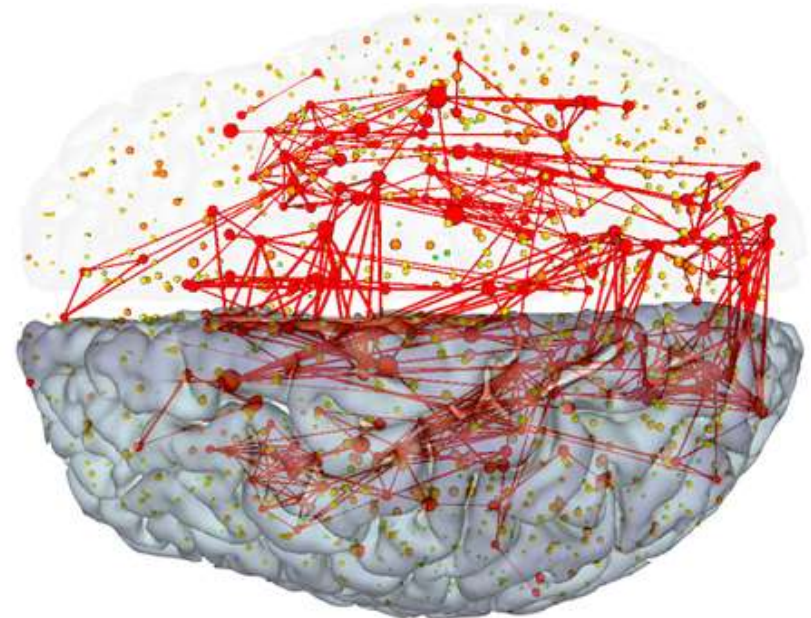


Et en quelques secondes pour son **activité dynamique** dans ce réseau distribué qui permet des coalitions transitoires où certaines régions vont « travailler ensemble »



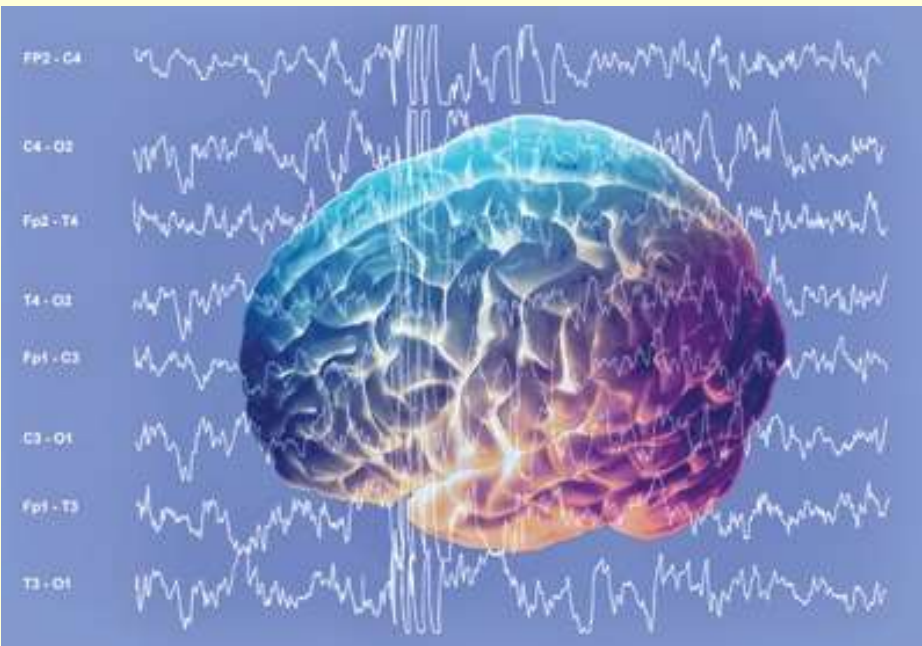
C'est donc une machine qui fonctionne massivement en **parallèle et de manière distribuée...**

...tout en se modifiant elle-même sans arrêt : en quelques minutes, heures ou jours pour sa structure



Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

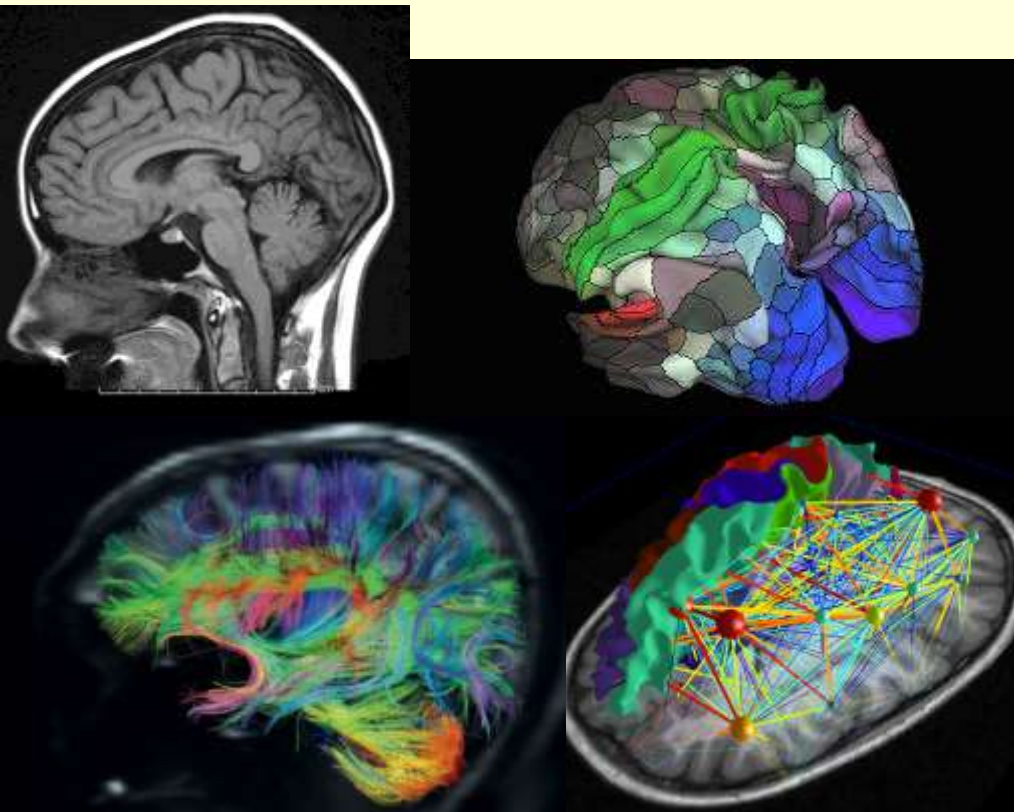


B- Éveil, sommeil et rêve



Au dernier cours, on a vu...

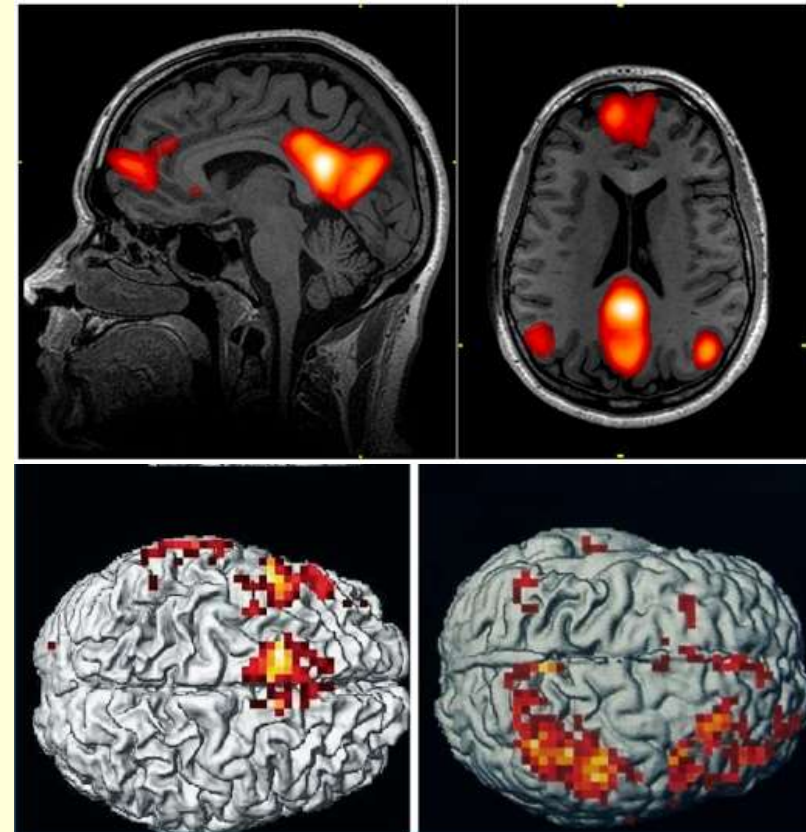
La cartographie **anatomique**
du cortex d'hier à aujourd'hui...



...et l'imagerie cérébrale **fonctionnelle**.

...mais pas en temps réel !

(mauvaise résolution temporelle de l'IRMf)

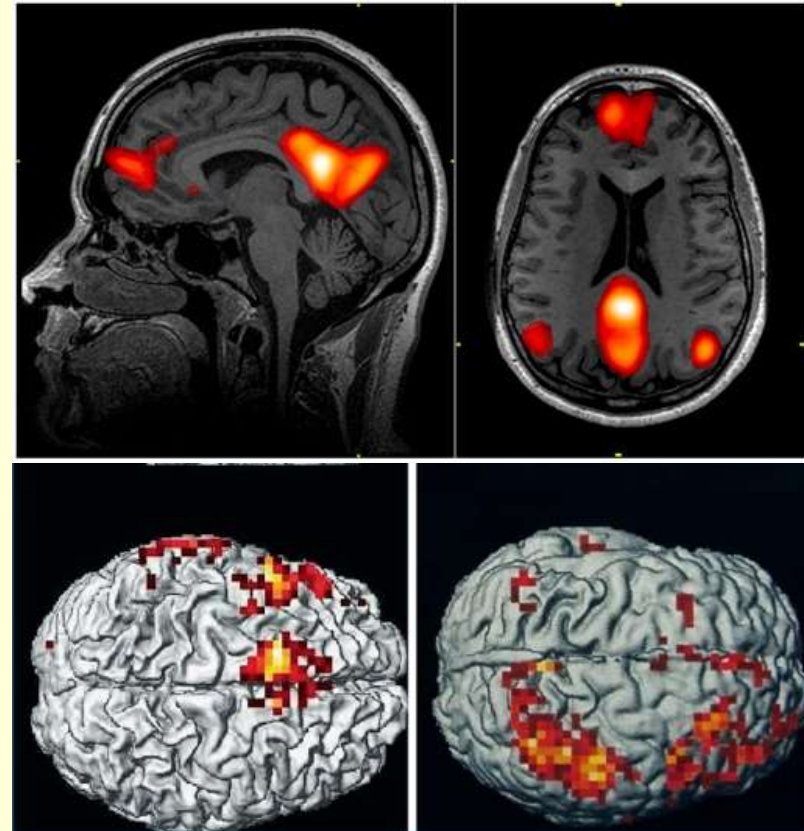


...et l'imagerie cérébrale **fonctionnelle**.

Or pour les comprendre véritablement nos fonctions cognitives, on doit connaître **l'activité en temps réel** de ces neurones **distribués dans nos multiples structures cérébrales**.

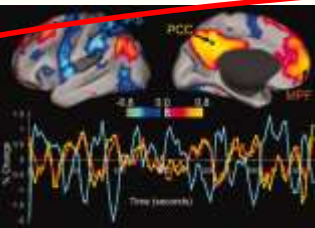
On va donc aborder maintenant le caractère **endogène, dynamique et rythmique** de l'activité cérébrale.

...mais pas en temps réel !
(mauvaise résolution temporelle de l'IRMf)

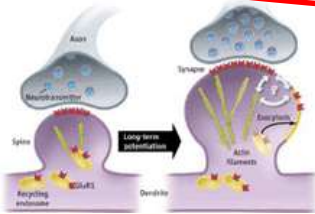
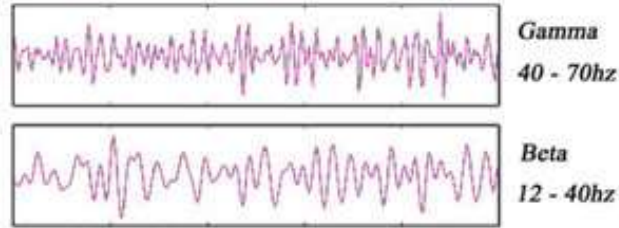


Processus dynamiques

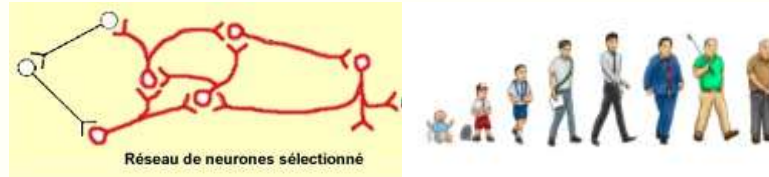
à différentes échelles **temporelles** :



$10^{-3} s$



$10^{11} s$



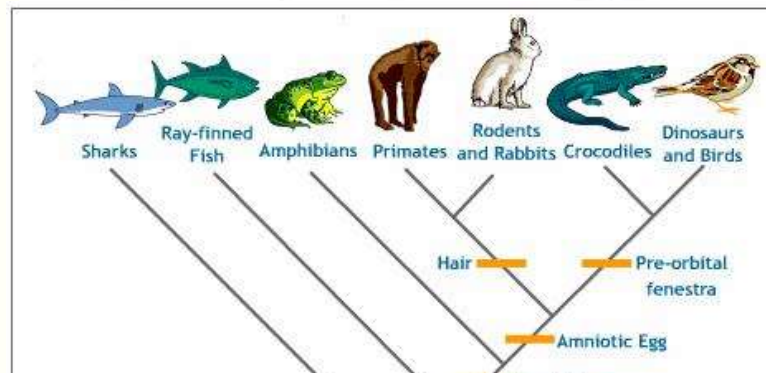
$10^3 s$



$10^6 s$



$10^{15} s$



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 (incluant des mécanismes épigénétiques)

Évolution biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux

Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Grâce à l'activité cérébrale endogène;

Grâce aux connexions réciproques dans les réseaux;

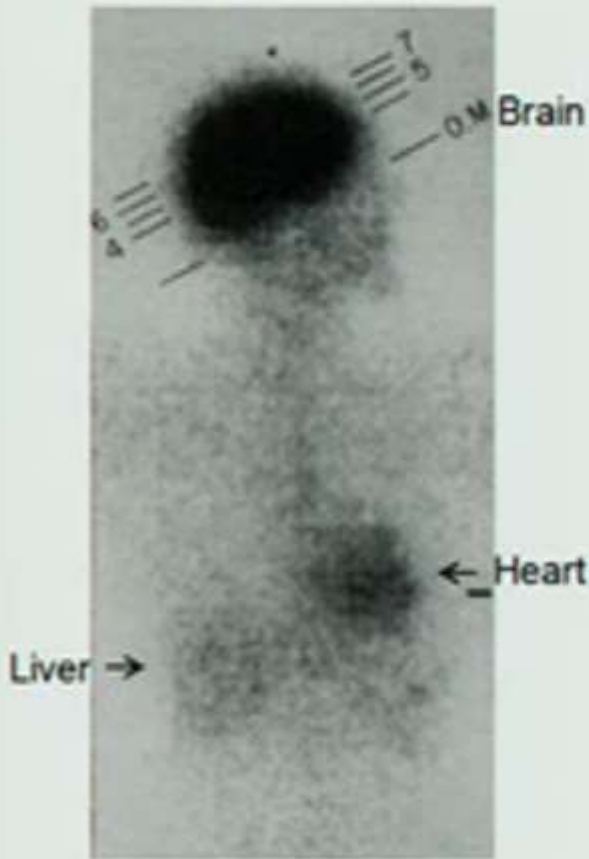
Oscillations et rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

Électroencéphalogramme;

B- Éveil, sommeil et rêve



Resting Metabolism



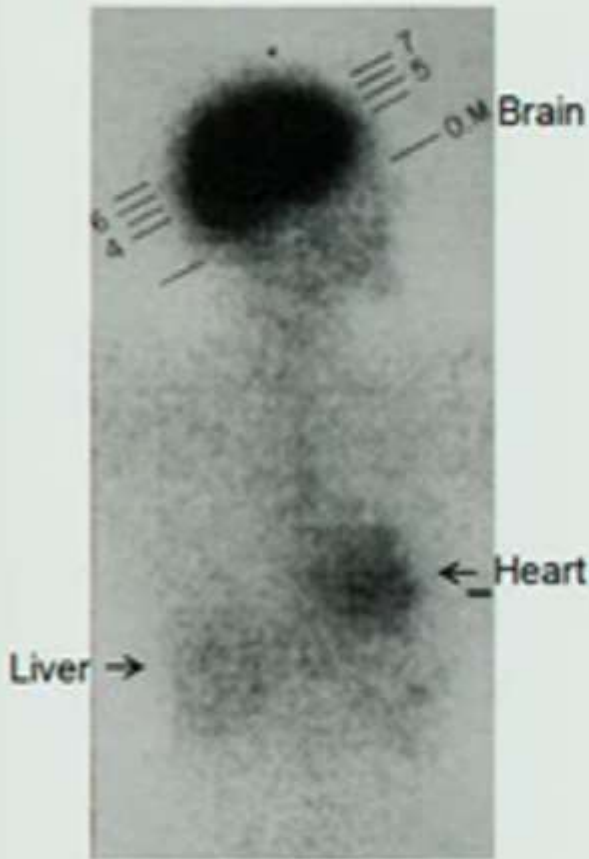
Alavi & Reivich (2002)

Le cerveau ne représente environ que 2 % du poids du corps humain.

Pourtant, il mobilise en permanence environ 20 % du sang et de l'oxygène de notre organisme

Pourquoi ?

Resting Metabolism

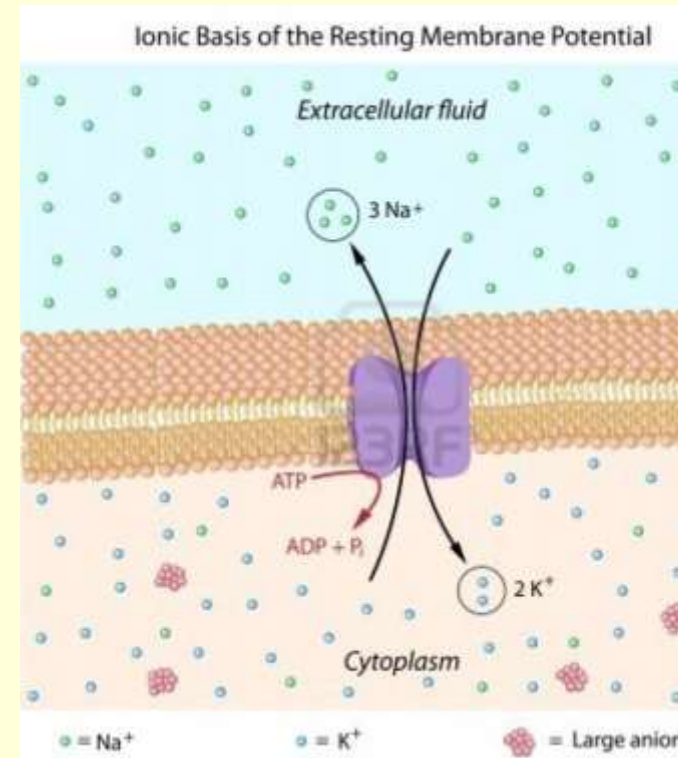


Alavi & Reivich (2002)

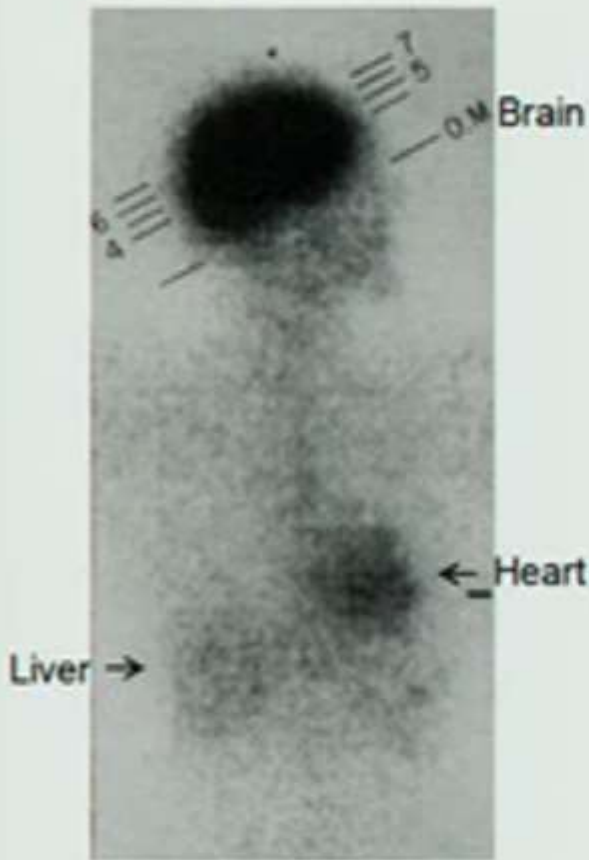
Dans le cerveau, le pourcentage du “budget” énergétique cellulaire attribué à la pompe sodium / potassium avoisine les **50%** !

L'activité spontanée nécessite de **recréer constamment les gradients ioniques** avec la « pompe » sodium / potassium qui a **besoin d'énergie** pour fonctionner.

<http://en.citizendium.org/wiki/Na,K-ATPase>



Resting Metabolism



Alavi & Reivich (2002)

Comme le cerveau mobilise en permanence environ 20 % du sang et de l'oxygène de notre organisme,

si seulement 10% de notre cerveau n'était utilisé,

en montant à 50% d'utilisation,

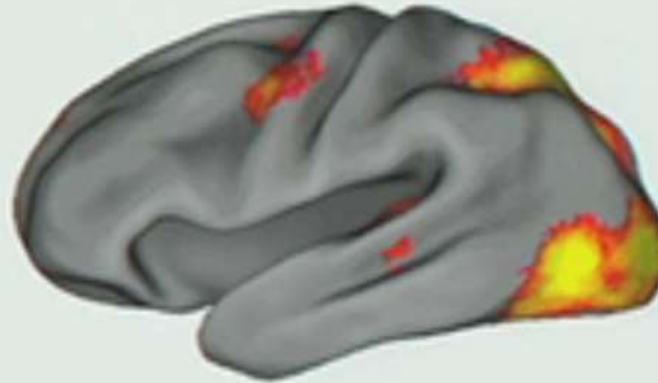
il prendrait déjà 100% de l'énergie consommée...

Oups !

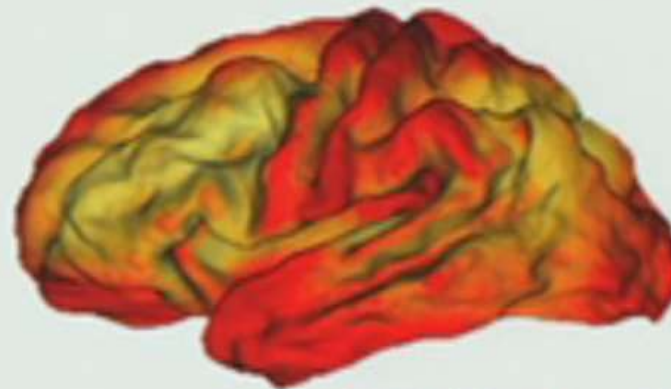


An Historical View

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)



Boutade
mnémotechnique:

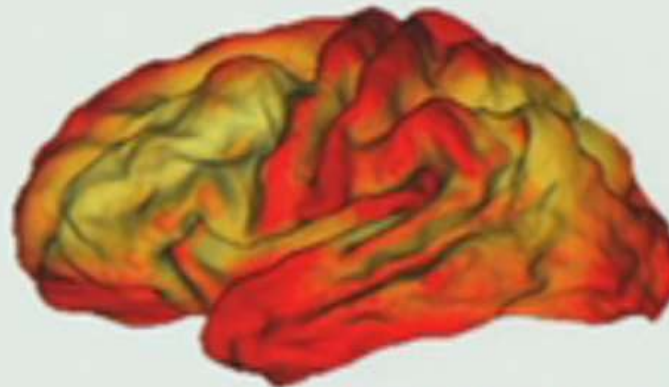
**« Il pleut tout
le temps
dans notre
cerveau ! »**

An Historical View

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)



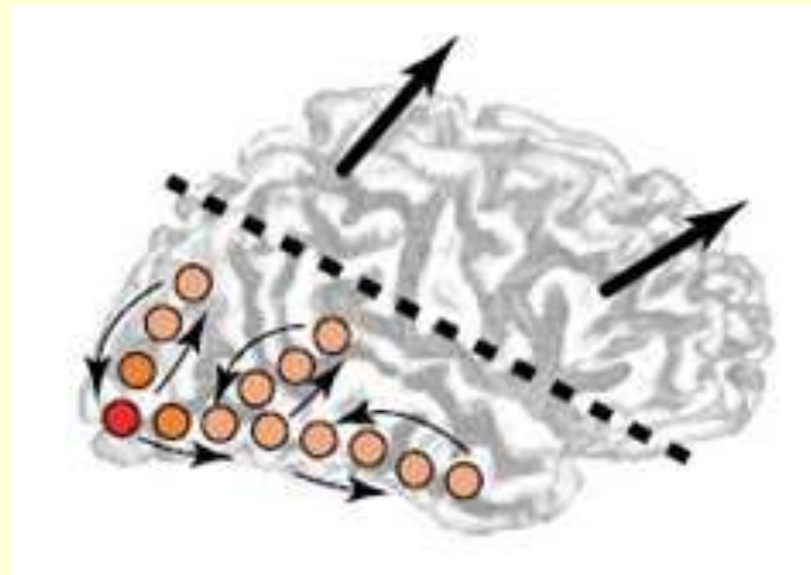
Cette activité endogène a tendance à être cyclique.

Boutade mnémotechnique:

« Il pleut tout le temps dans notre cerveau ! »

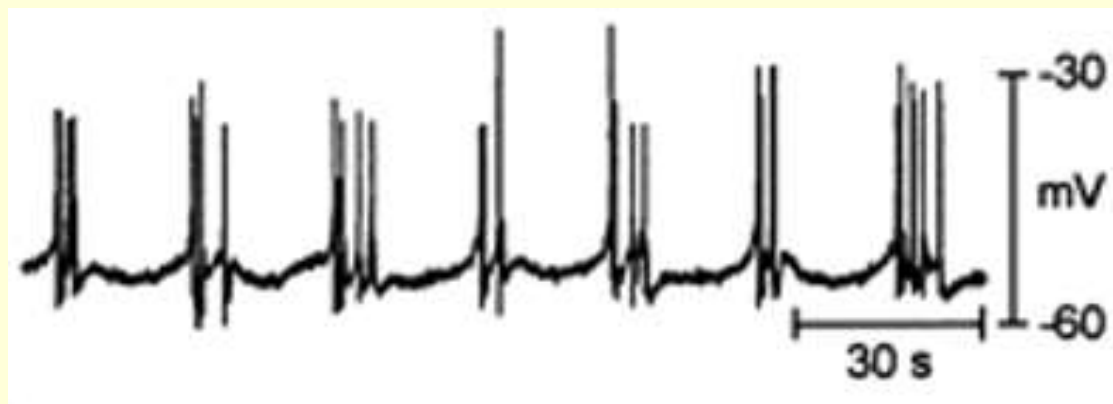
Autrement dit :

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



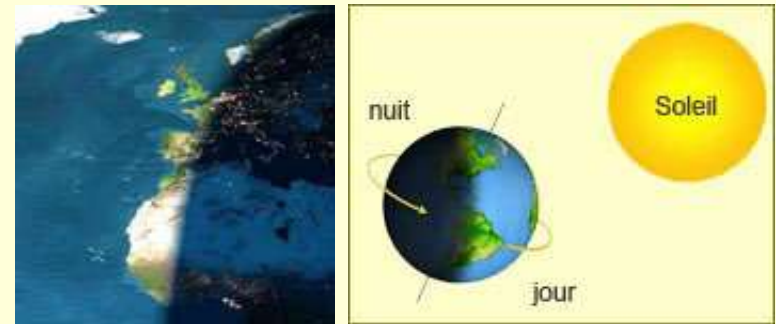
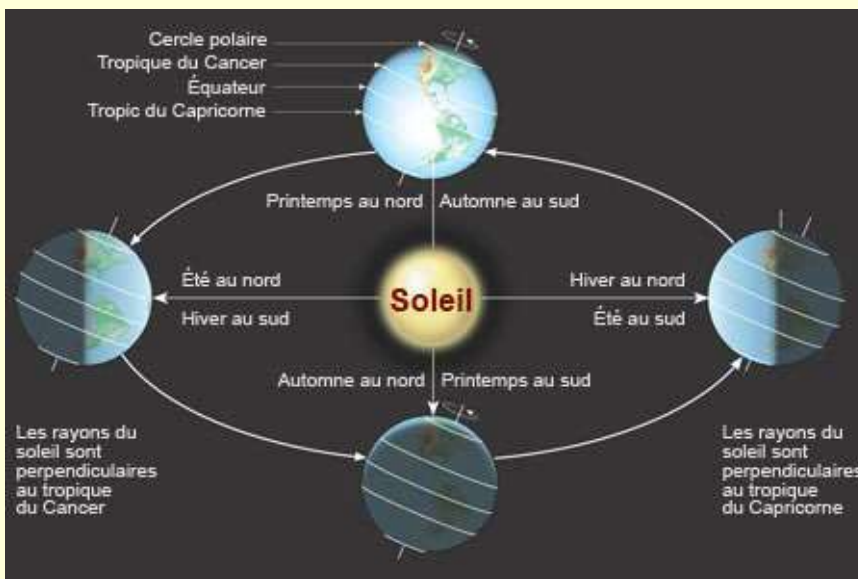
Activité « **Bottom up** »

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



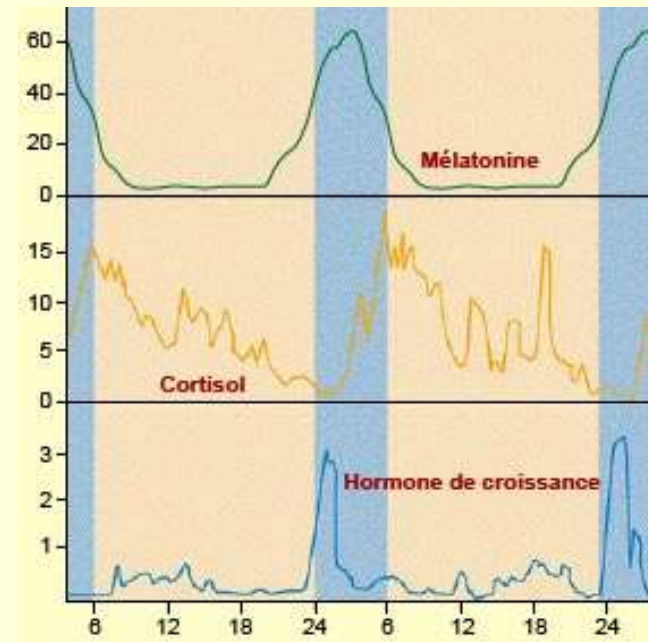
The biggest **mistake** that people make is in thinking of it as an **input-output device**.”

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



On connaît beaucoup de phénomènes cycliques dans la nature...

...et dans le corps humain.



The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2017.
Discoveries of Molecular Mechanisms Controlling the Circadian Rhythm

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2017/advanced-medicineprize2017.pdf

« Qui veut voyager loin ménage sa monture »

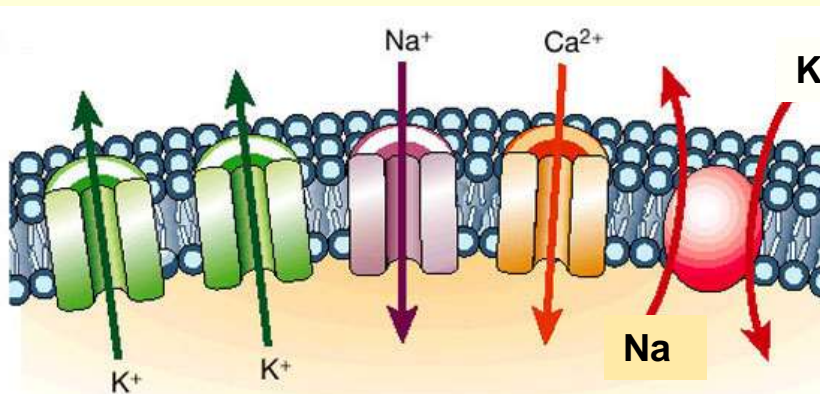
7 octobre 2017 Par Jean Claude Ameisen

<https://www.franceinter.fr/emissions/sur-les-epaules-de-darwin/sur-les-epaules-de-darwin-07-octobre-2017>

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

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

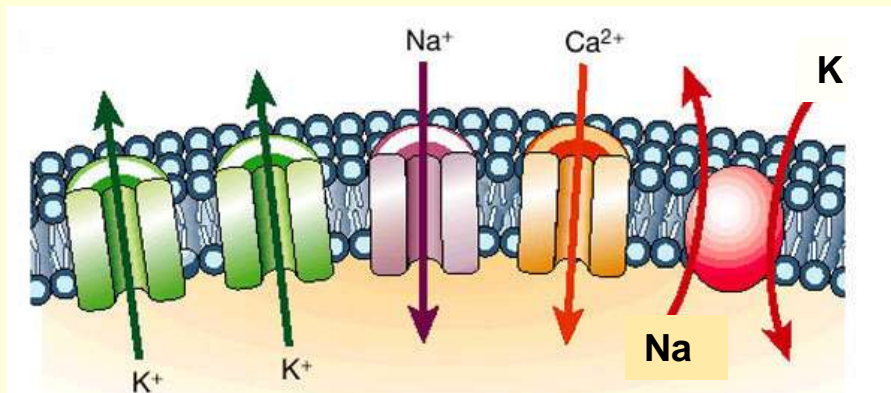
Et notre cerveau regorge de forces qui s'opposent, à commencer par les **canaux ioniques** qui **dépolarisent** ou **hyperpolarisent** les neurones.



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

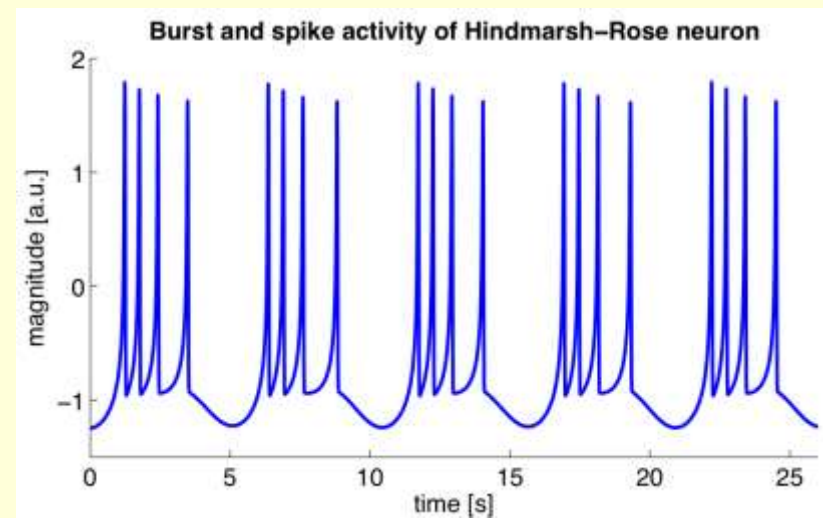
Il suffit que **deux forces s'opposent** pour que le calme plat soit rapidement **remplacé par un rythme**.

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

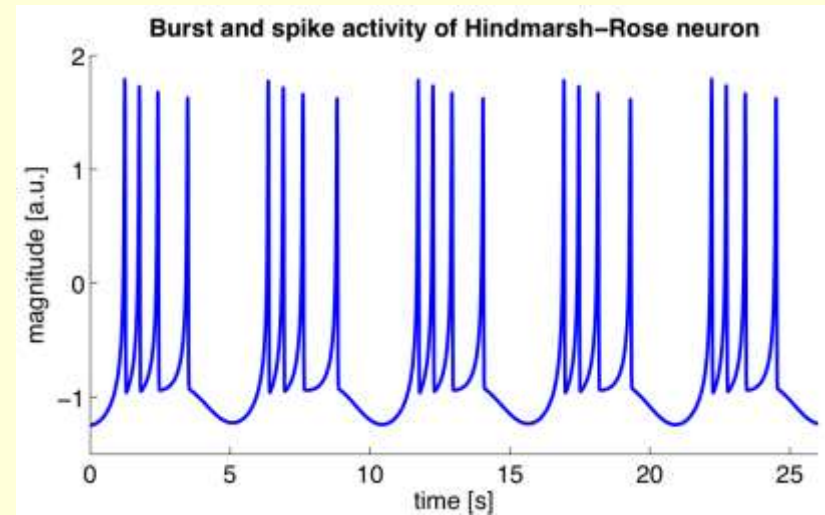
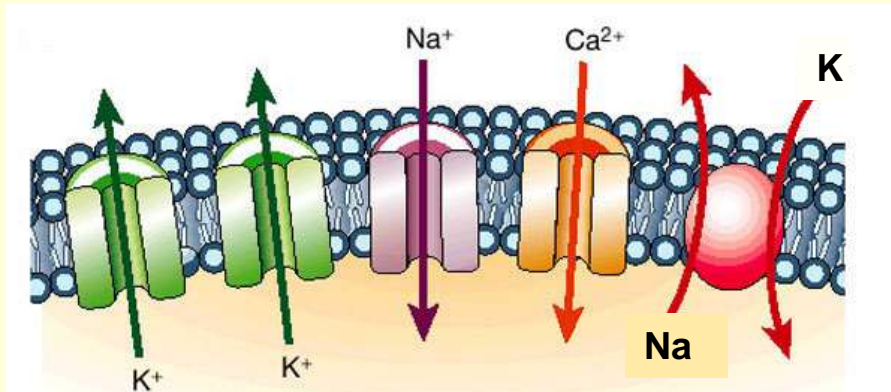
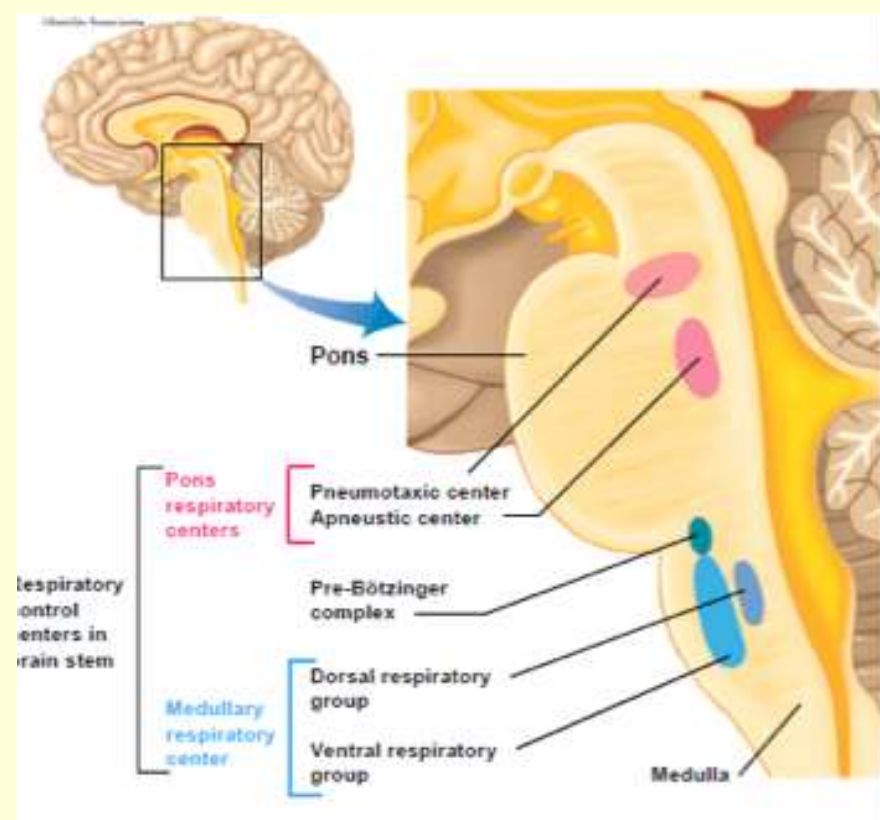


Et c'est ce qui va permettre à de nombreux neurones d'avoir une **activité spontanée**

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



Exemple :
les centres respiratoires
du tronc cérébral

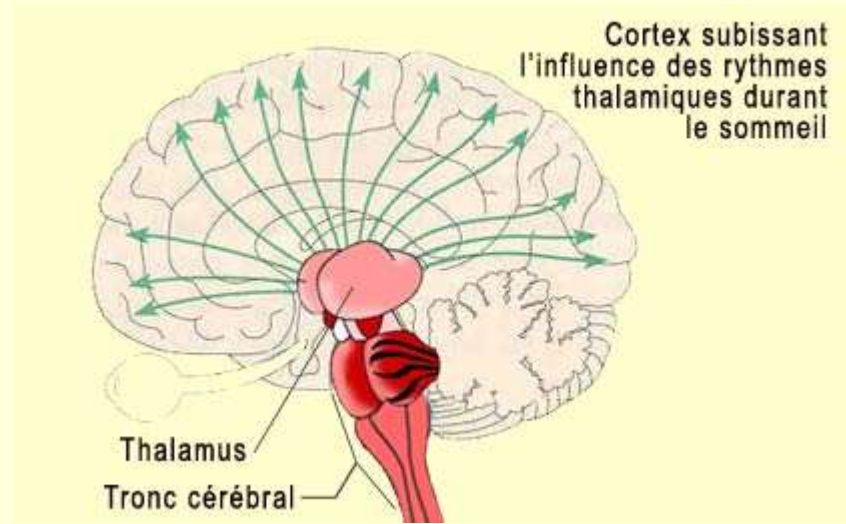


Donc première façon de générer des rythmes :

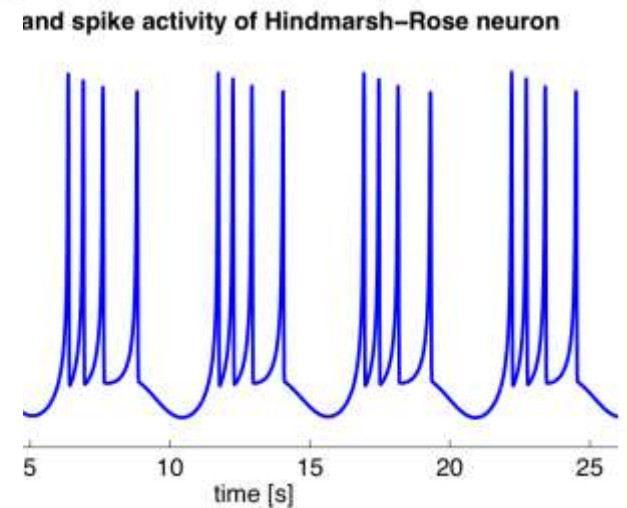
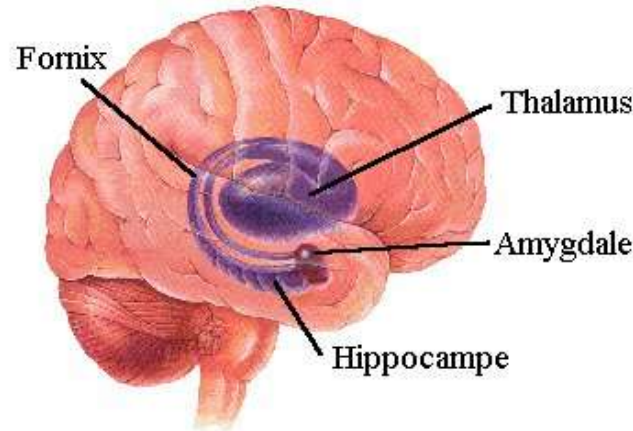
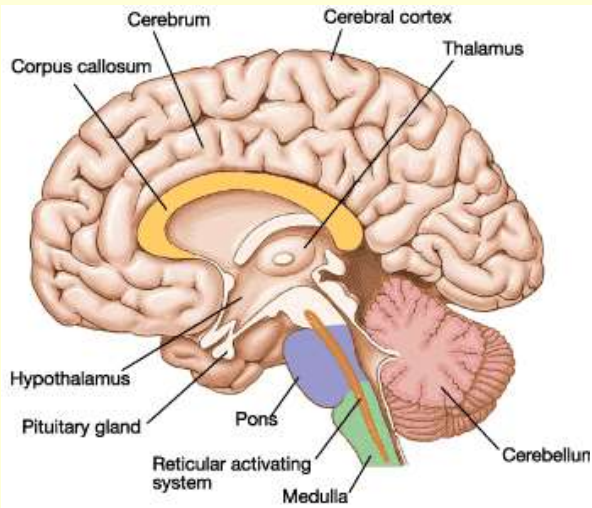
- par les propriétés **intrinsèque** de la membrane du neurone (« endogenous bursting cells »)

Thalamus : presque tous les neurones

Cortex : certains neurones



On peut alors distinguer des « **pacemaker cells** » (ex.: thalamus) et des « **follower cells** » (ex.: cortex)



Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Grâce à l'activité cérébrale endogène;

Grâce aux connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

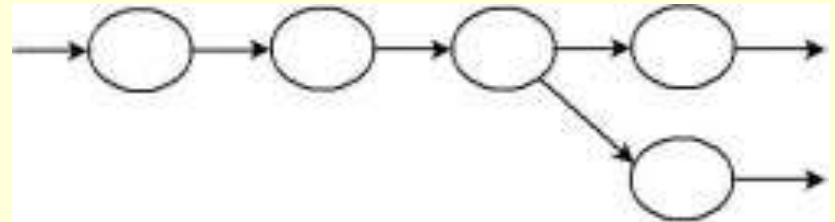
Électroencéphalogramme;

B- Éveil, sommeil et rêve





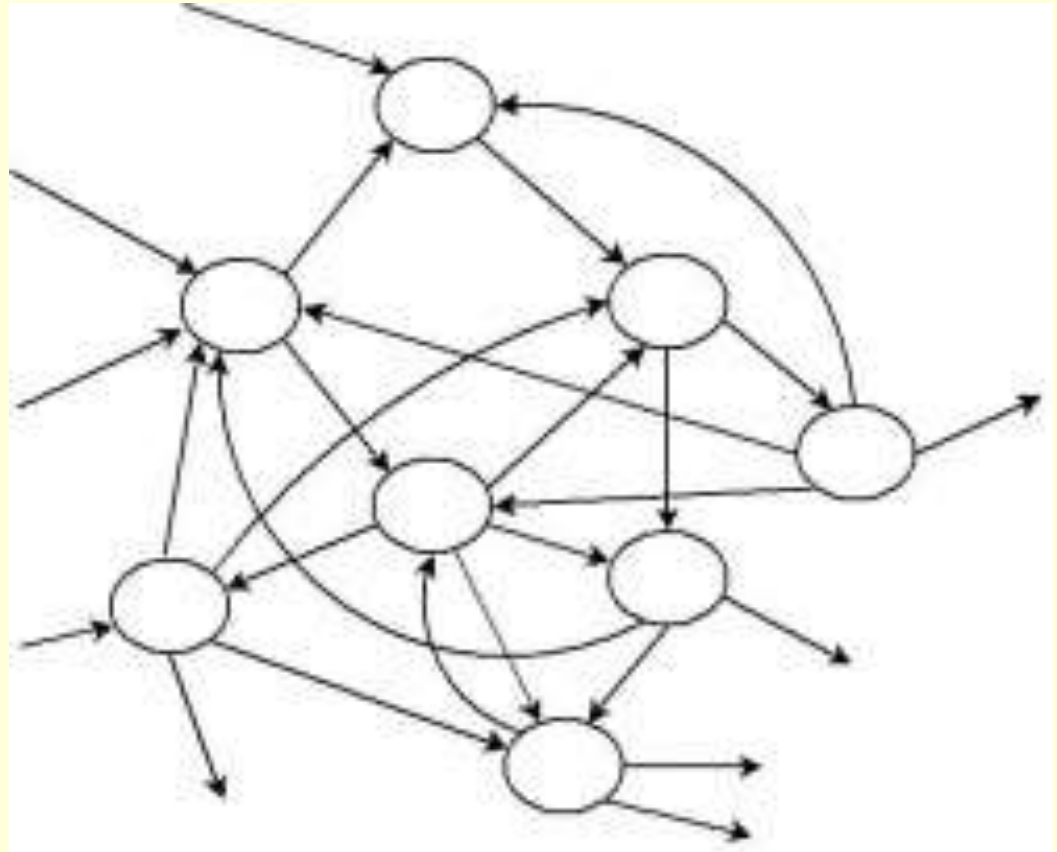
Depuis la physique de Newton et même avant, on peut expliquer beaucoup de phénomènes en terme de causalité **linéaire**.



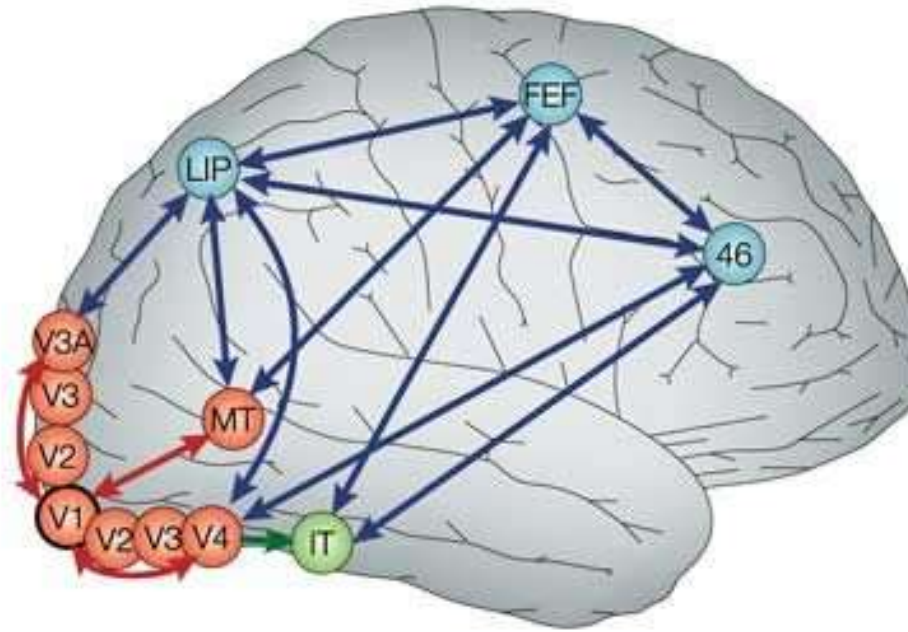
Sauf que dans un système complexe comme le cerveau...

Les interactions et les connexions se font **dans toutes les directions.**

Ces connexions, souvent **récioproques**, donnent lieu à des relations causales **non linéaires**.

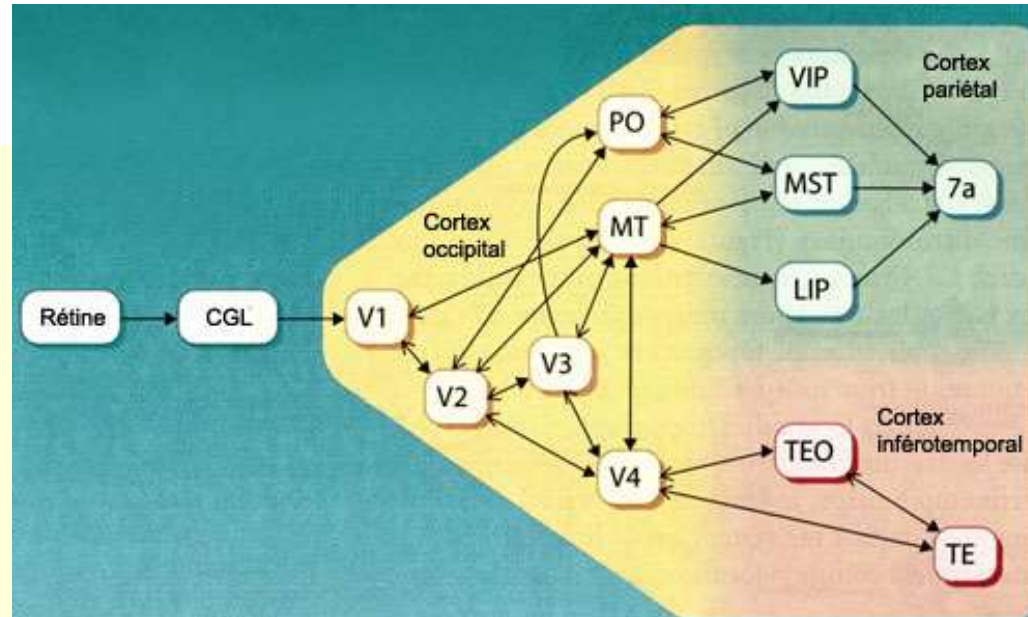


Et si l'on regarde à un niveau supérieur, en incluant tout le cerveau, **on observe également un haut degré de réciprocité dans le traitement visuel.**



le **syndrome Charles Bonnet** affecte les gens qui ont déficit visuel comme une dégénérescence maculaire qui cause une perte de leur vision au centre de leur champ visuel.

Or ces personnes peuvent avoir des hallucinations visuelles qu'on explique comme la projection des « modèles génératifs » *top down* du cortex visuel qui comblent le vide, pour ainsi dire, et s'imposent comme étant la réalité !



Et c'est aussi le cas dans le **système auditif**, par exemple...

Dans cet article au titre intrigant publié le 20 mai **2015** :

Pourquoi entend-on des sons dans le silence ?

<http://bigbrowser.blog.lemonde.fr/2015/05/20/pourquoi-entend-on-des-sons-dans-le-silence/>

On parle des chambre **anéchoïques**, ces pièces à l'insonorisation très poussée, isolée des bruits extérieurs et dont les parois couvertes de blocs de mousse aux angles brisés empêchent les sons produits par d'éventuels occupants de rebondir.

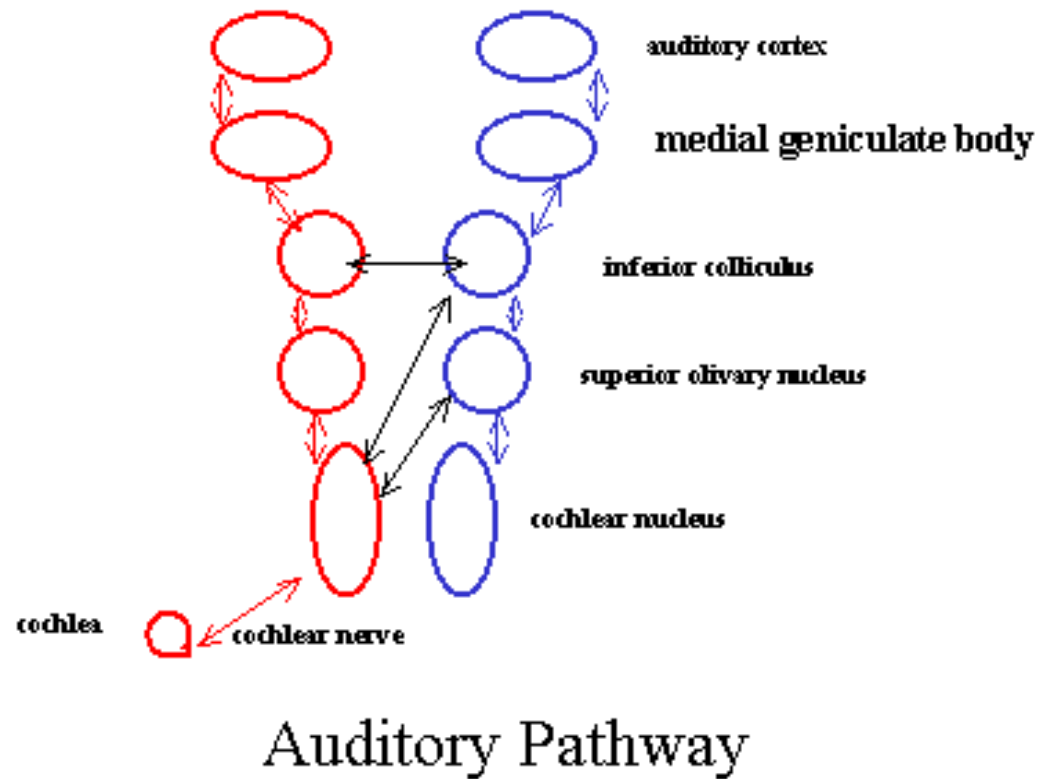


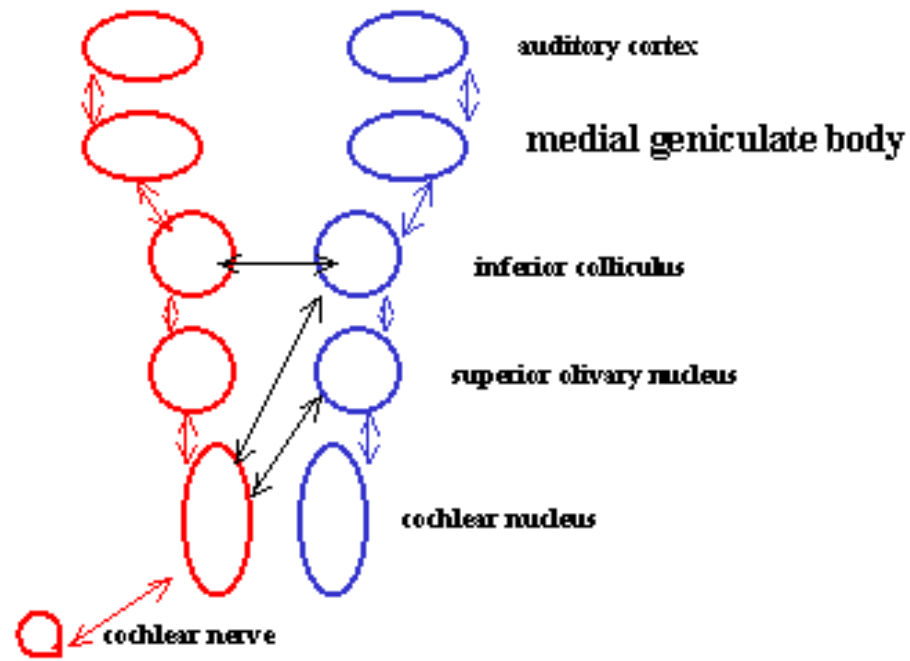
Après un certain temps dans de telles chambres, on peut y entendre son propre corps. On peut percevoir le sang qui bat dans ses vaisseaux et monte à la tête, l'air qui passe dans ses poumons, le battement de son cœur et le gargouillement du système digestif, le bruit de ses articulations en mouvement.

L'explication donnée à ce phénomène par Trevor Cox, professeur d'ingénierie acoustique à l'université de Salford, est pertinente pour nous ici :

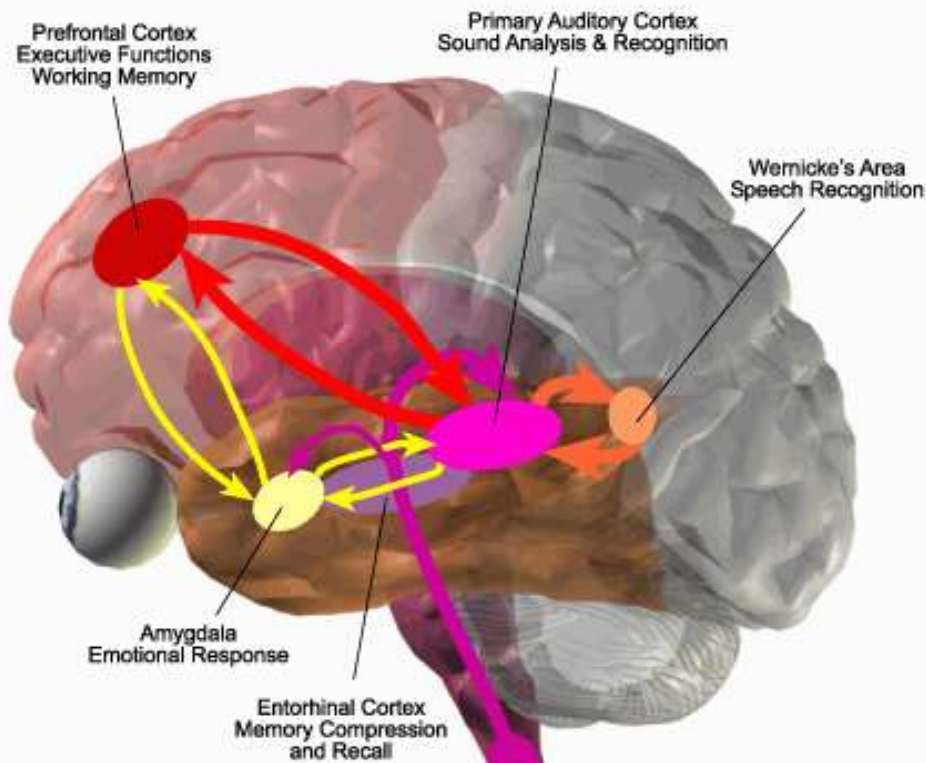
"Pendant longtemps, on a considéré que le son entrant simplement dans l'oreille pour monter vers le cerveau. Et bien il y a en réalité plus de connexions qui se produisent du cerveau vers l'oreille que l'inverse."

De telles impulsions permettent au cerveau de moduler l'audition pour s'adapter à son environnement. Mais c'est également cette relation qui provoque les hallucinations auditives.





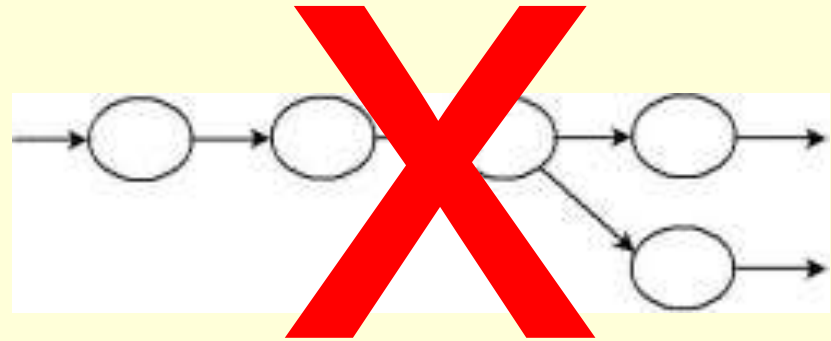
Auditory Pathway



Et l'en retrouve encore une fois ces voies réciproques partout dans le système **auditif**.

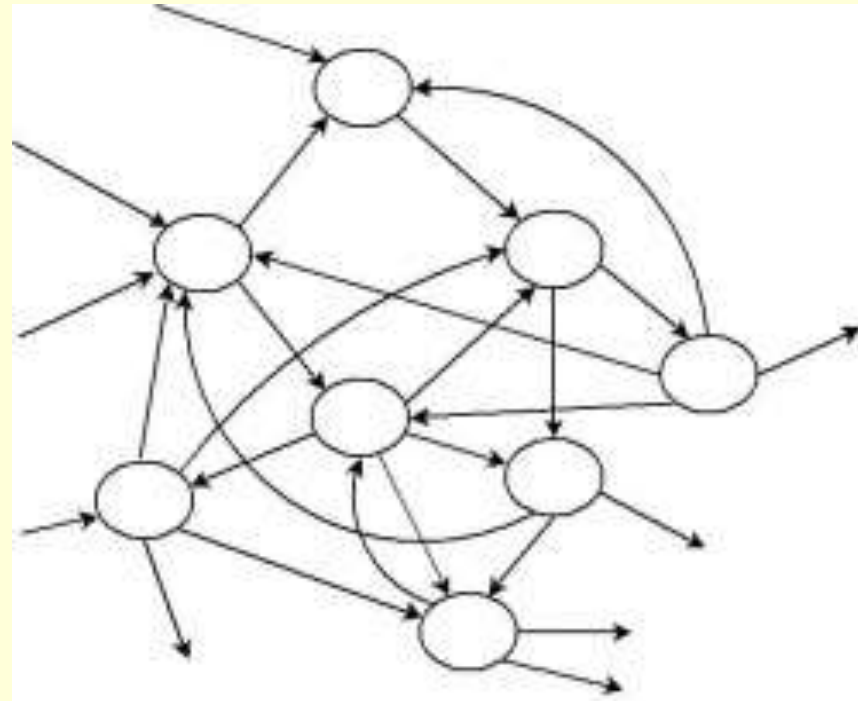
“The brain is decidedly not a primarily feed-forward system.”

- Michael Anderson,
Precis of After Phrenology

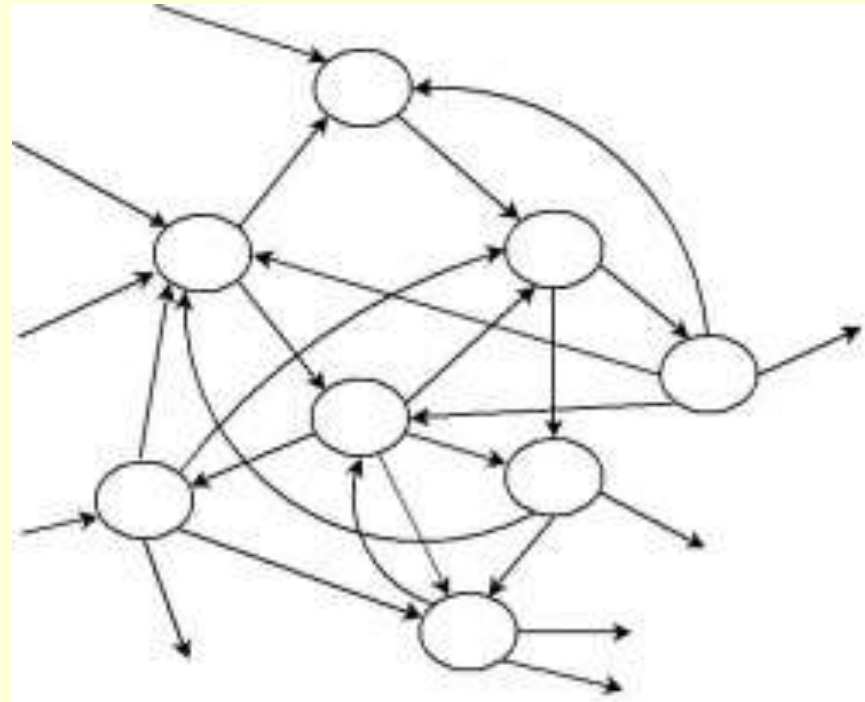


Et les organismes ne sont pas des récepteurs passifs de stimulations environnementales.

En fait, **ces patterns changeants de l'activité endogène vont influencer constamment les activations induites par le monde extérieur,** comme on va le voir dans un instant...



Il n'y a donc jamais de « temps 0 » dans le cerveau,
car il est toujours en train de « faire quelque chose »...



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

[traduction libre]

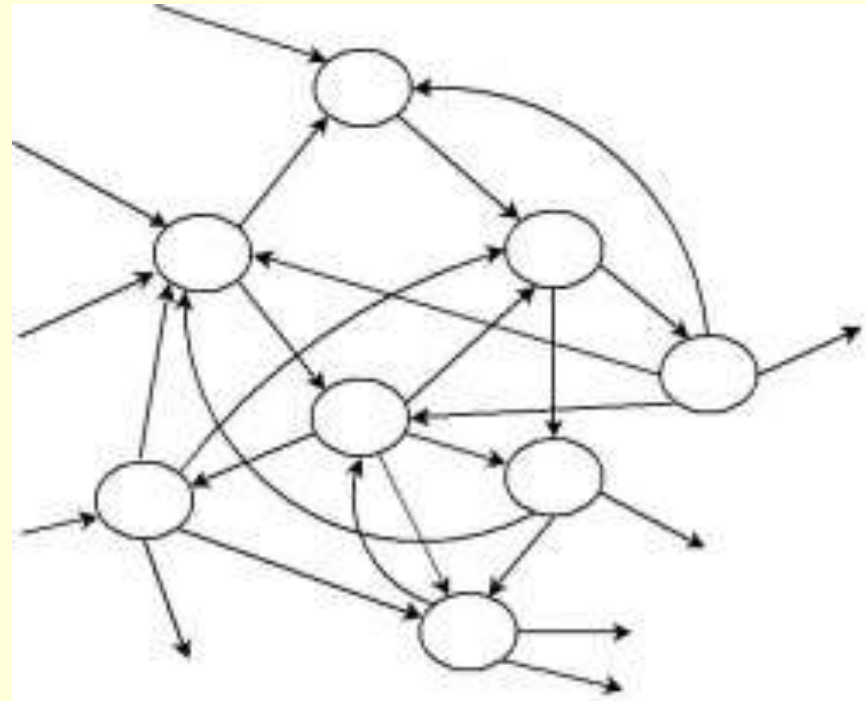


- Michael L. Anderson

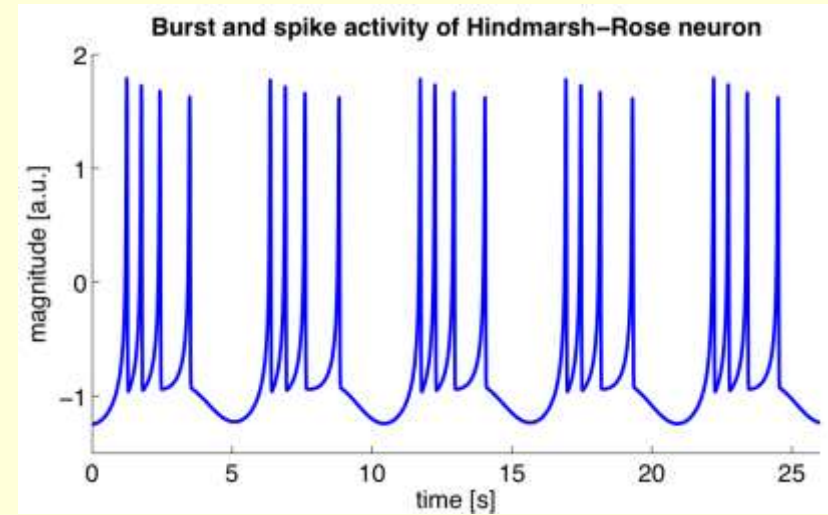
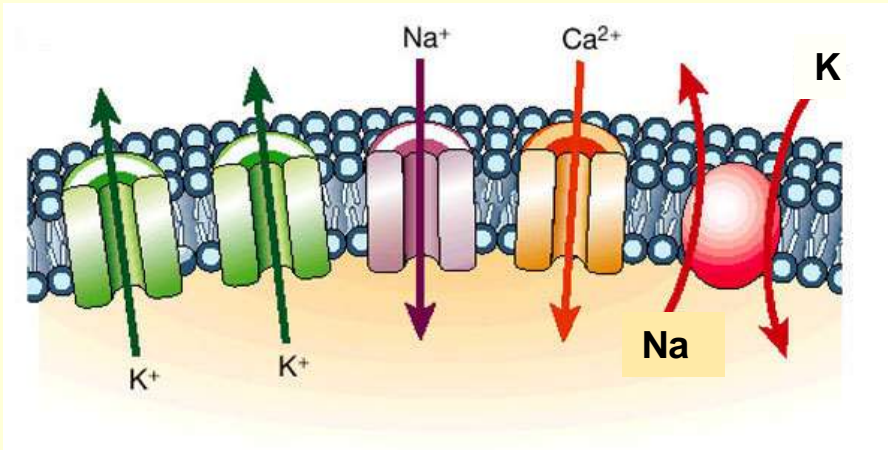
The Dynamic Brain (2011)

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

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



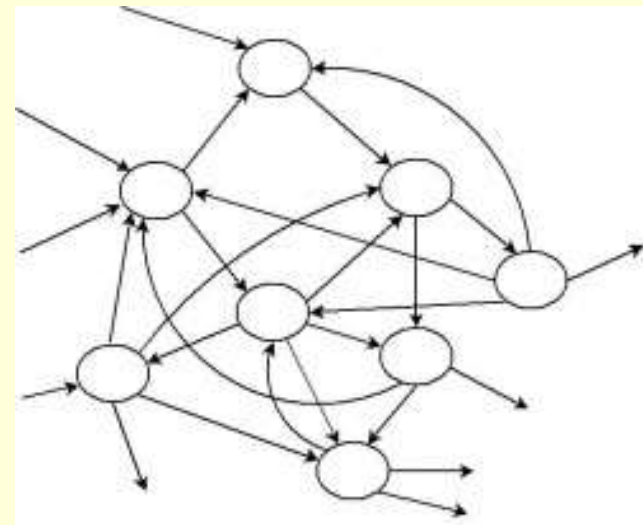
On a vu qu'une première façon de générer des rythmes était par les **propriétés intrinsèque de la membrane** du neurone (« endogenous bursting cells »)



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

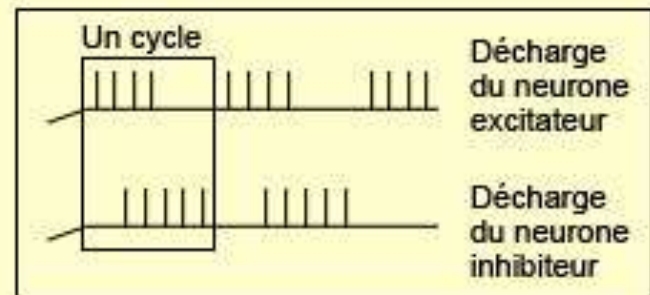
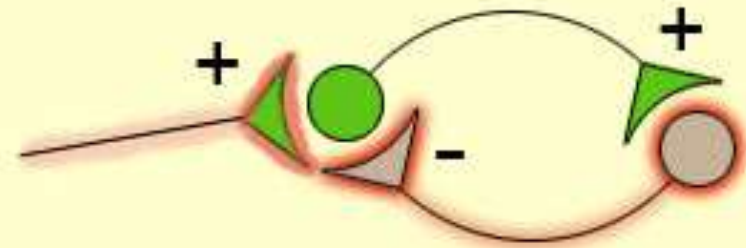
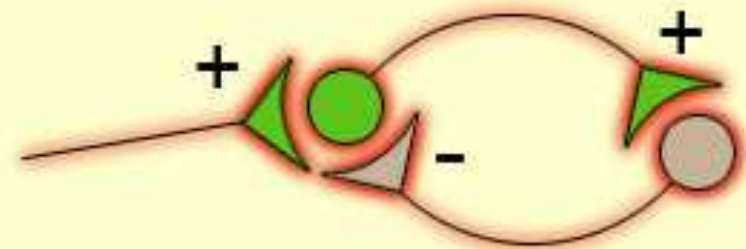
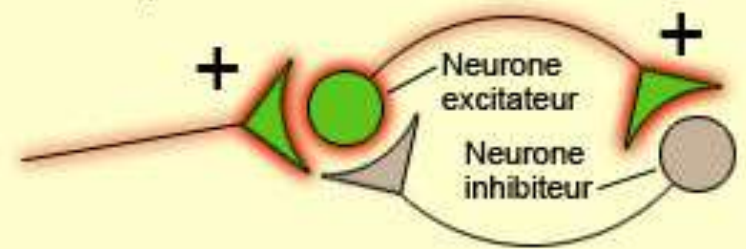
c'est-à-dire par des **boucles**

(excitation-inhibition
ou inhibition-inhibition)

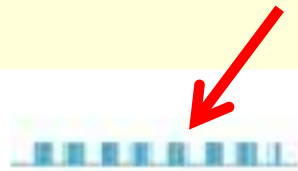


Exemple d'activité rythmique
générée par une boucle
« excitation-inhibition » entre
un **neurone pyramidal**
et un **interneurone**.

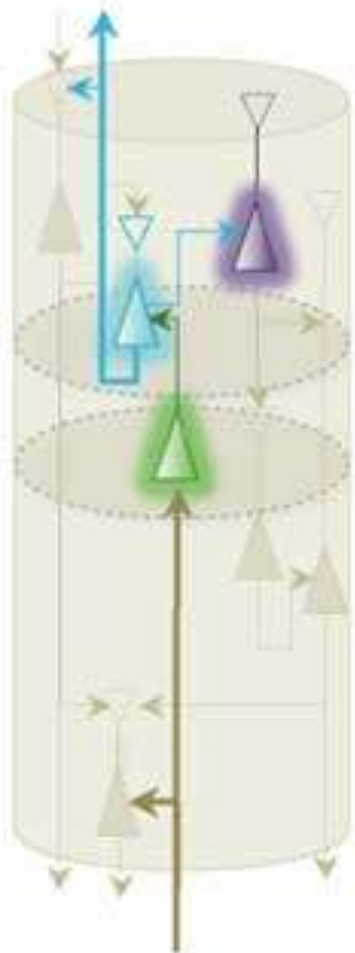
Afférence excitatrice
active en permanence



b



Temporally organized spike trains

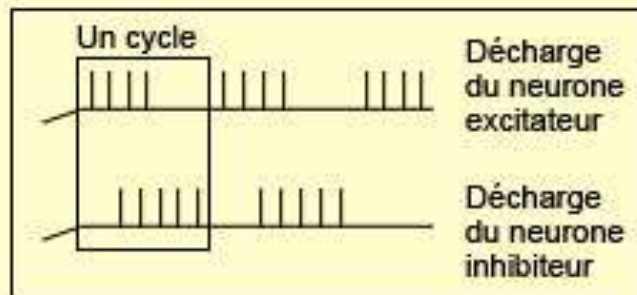
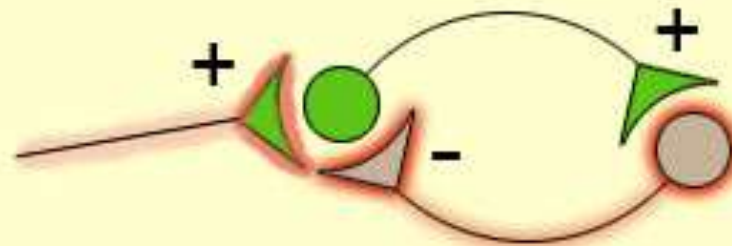
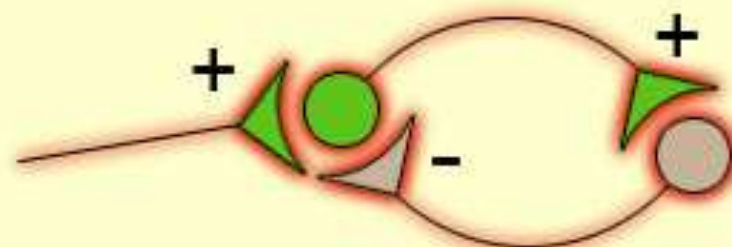
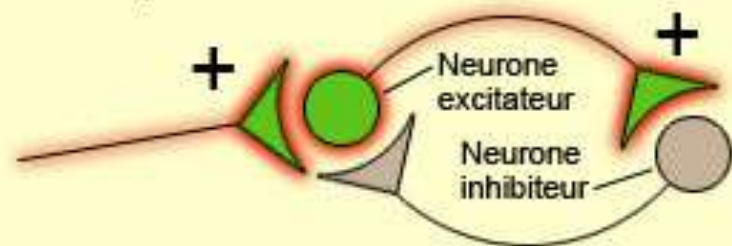


Theta (delta)

Layer IV

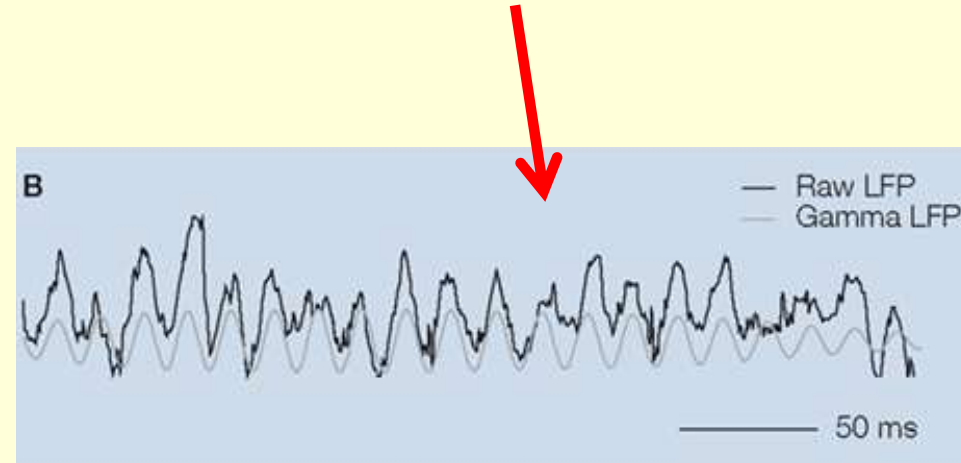
Continuous modulated stimulus-driven spike trains

Afférence excitatrice active en permanence



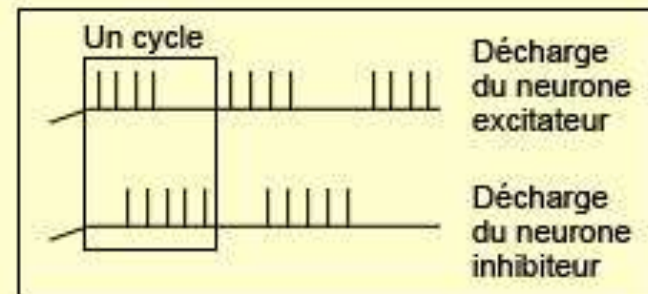
L'équilibre entre l'activité de neurones utilisant des neurotransmetteurs **excitateurs** et **inhibiteurs** est donc primordial pour nos fonctions cognitives car il permet de générer des **patterns d'activité complexes**.

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



Excitation and Inhibition: The Yin and Yang of the Brain

[http://knowingneurons.com/2017/01/25/excitation-inhibition/?ct=t\(RSS_EMAIL_CAMPAIGN\)](http://knowingneurons.com/2017/01/25/excitation-inhibition/?ct=t(RSS_EMAIL_CAMPAIGN))



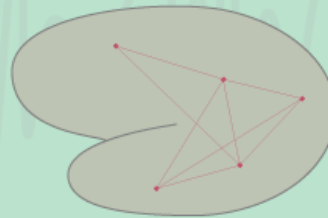
Like a sandpile, the **brain** is balanced at the edge of stability.



Both **excitation** and **inhibition** attract the brain toward distinct patterns of relatively simple activity.

The balance of excitation and inhibition creates a **critical state**.

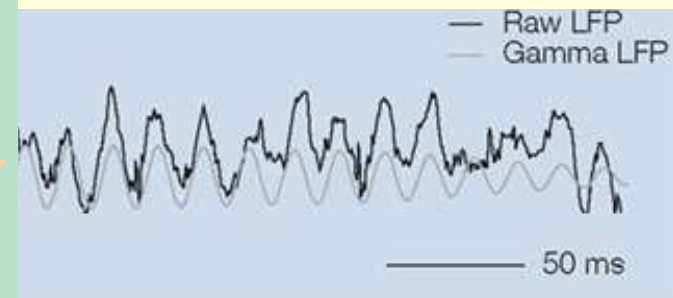
In the critical state, the brain can generate complex **activity** spanning many time scales.



As you build a sandpile, it grows **bigger** until its slope reaches a certain steepness that results in a critical state.



Adding more sand then triggers **avalanches** of many spatial scales, ranging from a few grains to sizable portions of the sandpile itself.



Imagine this:

The pile is built from **glass beads**. The smooth beads do not stick well, and the fragile pile collapses once it reaches a critical mass.

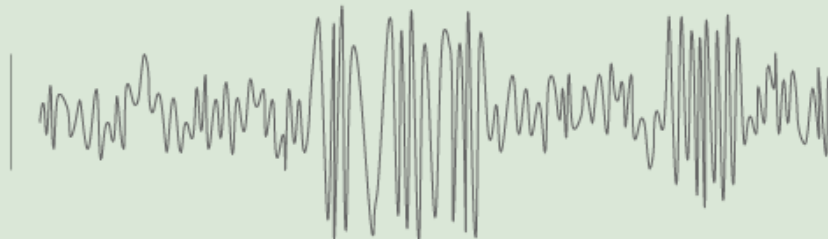


This is analogous to a state of excessive neural **excitation**:

storms of excitatory bursting interrupt complex signaling and form **seizures**.

excessive neural excitation

electrode



Un cerveau qui serait entièrement dominé par le **glutamate** serait seulement capable de **s'exciter** et de produire des **rafales répétées** d'activité comme lors d'une **crise d'épilepsie**.

Imagine this:

Now the pile is built from **wet sand**: the wet sand is sticky, resulting in few avalanches as the cohesiveness of the sand is too high.



This is analogous to a state of excessive neural **inhibition**:

excitatory drive cannot overcome the suffocating grip of synaptic inhibition, hampering neural computations that depend on complex signaling.

excessive neural inhibition

electrode



À l'opposé, un cerveau qui serait entièrement dominé par le **GABA** serait extrêmement silencieux, donc avec **très peu de synchronisation** d'activité possible

(nécessaire pour une communication cérébrale adéquate)

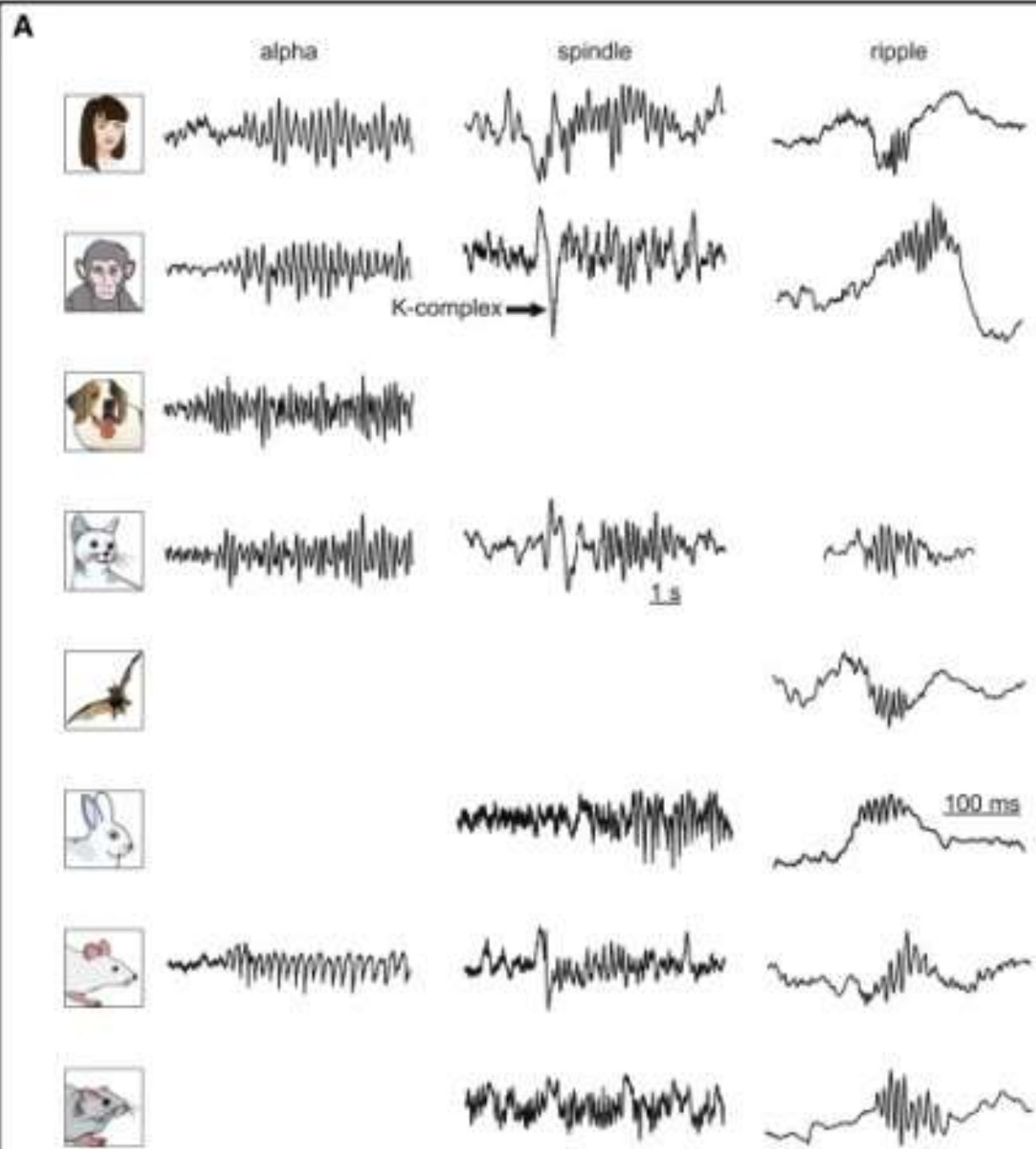
2013

Scaling Brain Size,
Keeping Timing:

Evolutionary Preservation of Brain Rhythms

György **Buzsáki**, Nikos
Logothetis and Wolf
Singer

Neuron, Volume 80, Issue
3, 751-764,



B

123

Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Grâce à l'activité cérébrale endogène;

Grâce aux connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

Électroencéphalogramme;

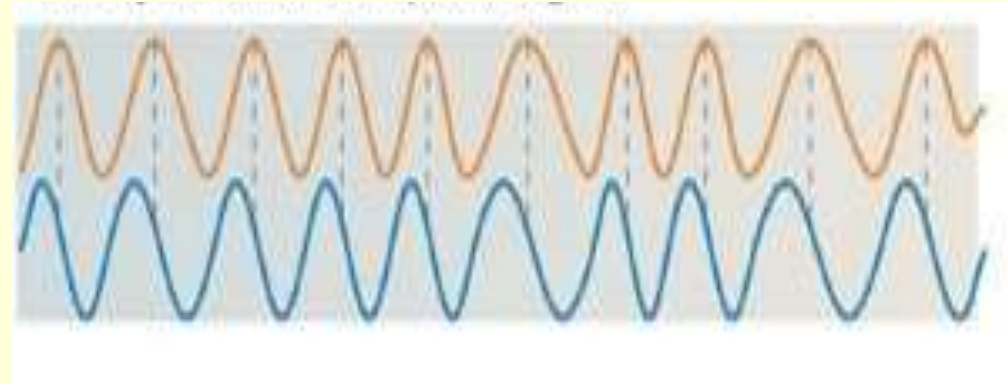
B- Éveil, sommeil et rêve





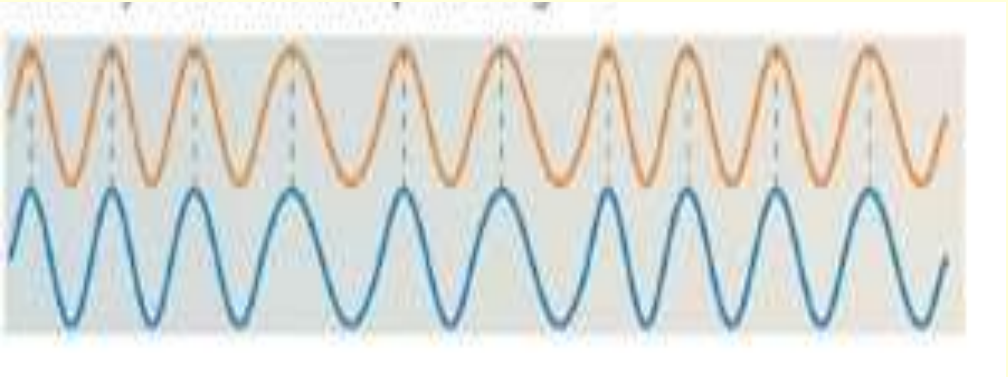
Oscillations

(selon un certain rythme
(en Hertz))



et

Synchronisation
(activité simultanée)



sont des phénomènes
différents mais souvent
liées !

Lien oscillation - synchronisation

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

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

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

Brain Science Podcast #31: Brain Rhythms with György Buzsáki

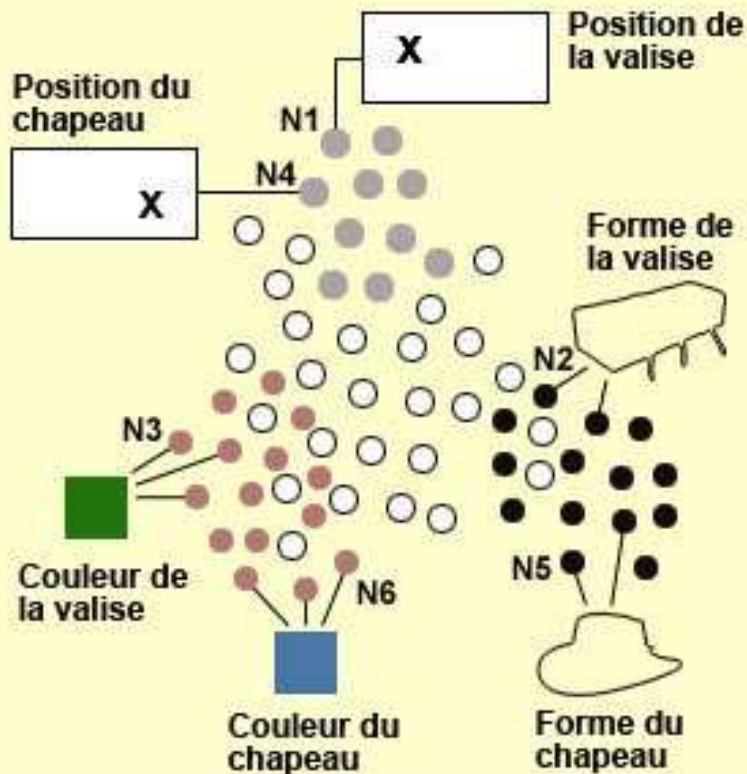
<http://brainsciencepodcast.com/bsp/brain-science-podcast-31-brain-rhythms-with-gyorgy-buzsaki.html>

Rodolfo Llinás, qui a travaillé sur le rôle des rythmes neuronaux que l'on observe entre le thalamus et le cortex, rappelle pour sa part

l'importance des oscillations neuronales **pour synchroniser**
différentes propriétés d'une perception,

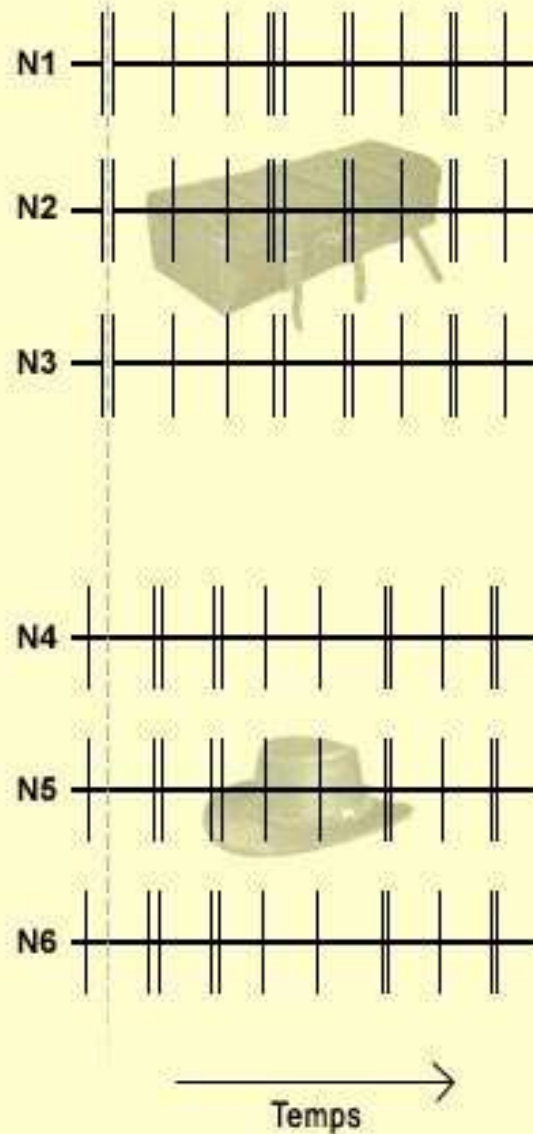
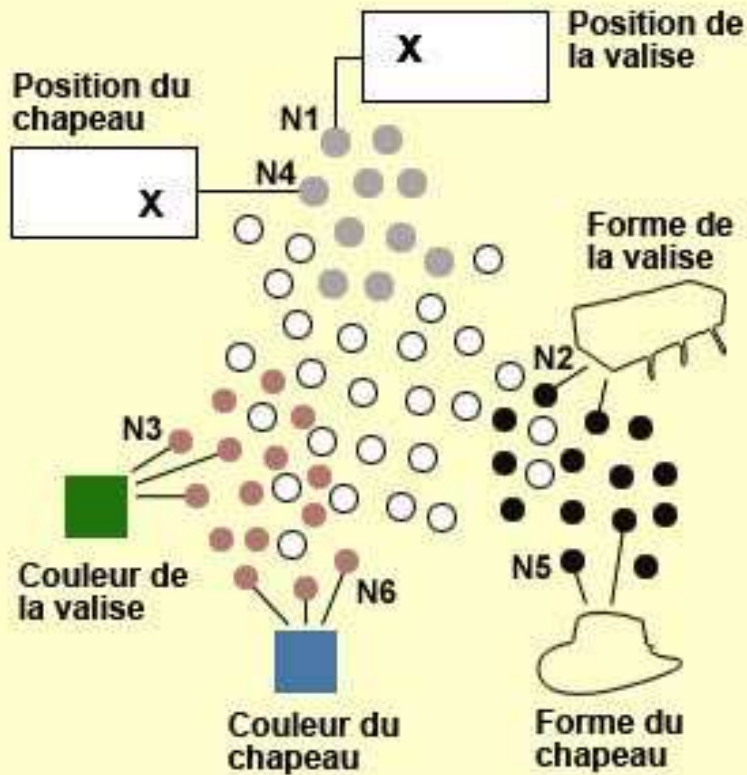
propriétés qui activent souvent des **régions distinctes et distantes**
dans le cerveau.

Car si des **régions distinctes** des aires visuelles réagissent à la forme, à la couleur, à l'emplacement, etc...



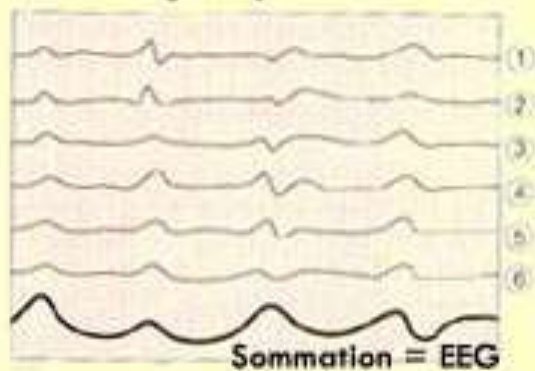
Alors on peut se demander **comment les caractéristiques d'un même objet sont-elles mises ensemble** pour former la perception consciente et distincte que l'on a de chacun des deux objets, sans en mélanger les caractéristiques ?

Voilà qui pose **problème de liaison** ou, selon l'expression anglaise consacrée, un «**binding problem**».

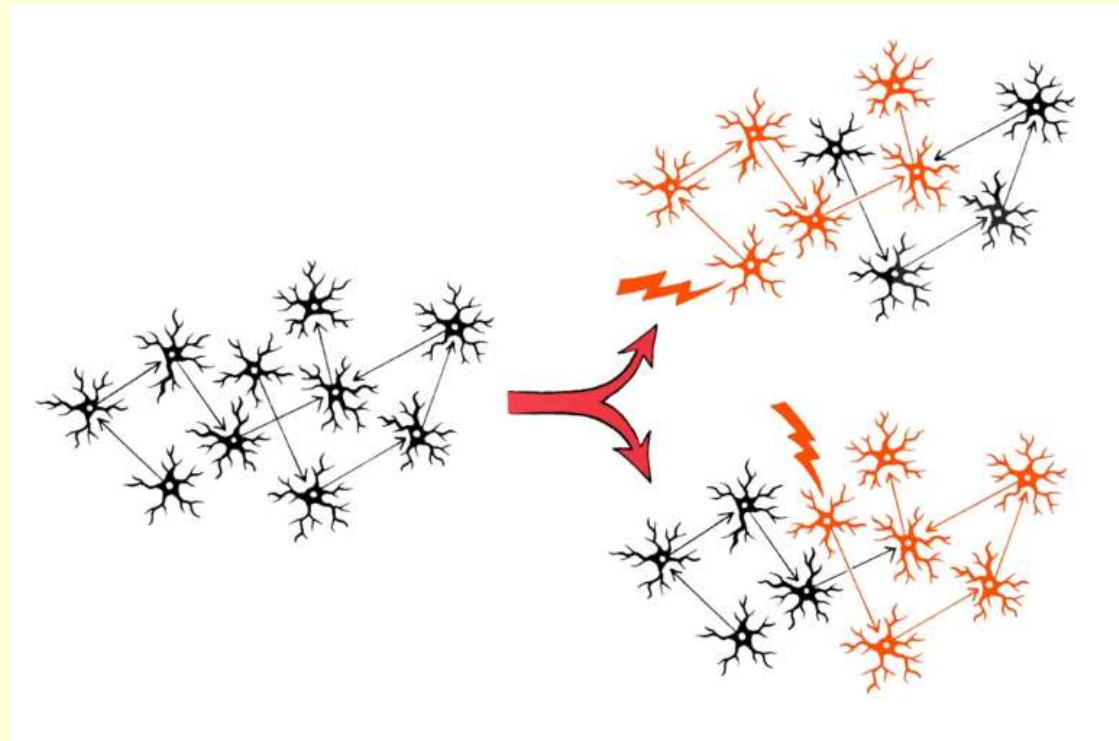
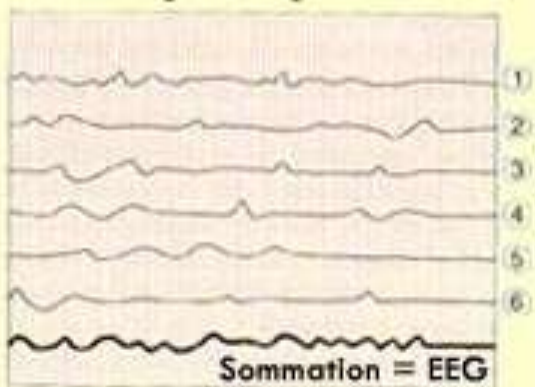


Car la synchronisation des oscillations rend possible la formation d'assemblées de neurones transitoires

Décharges synchronisées

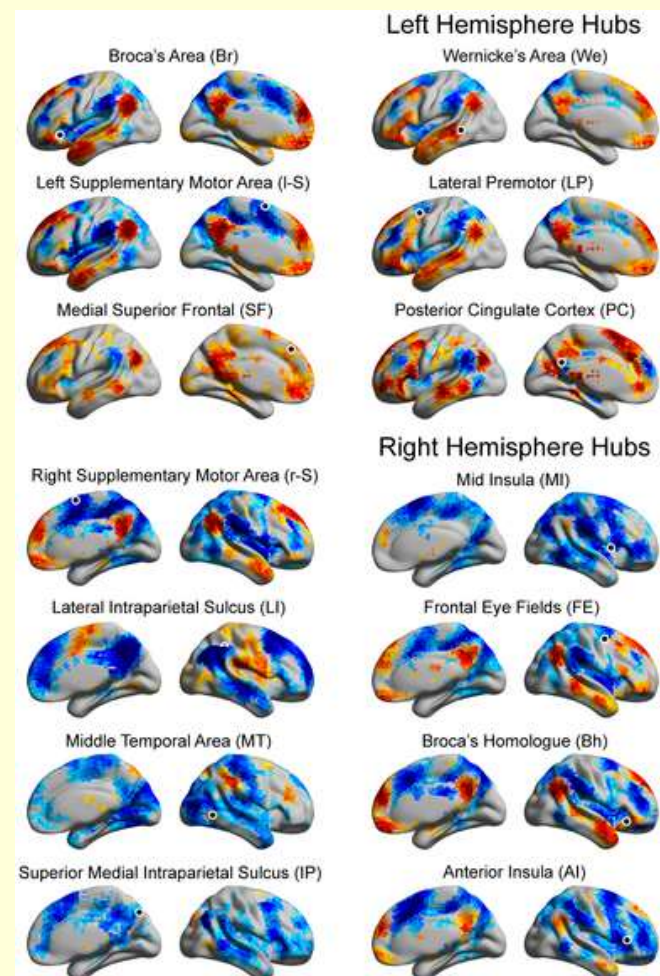
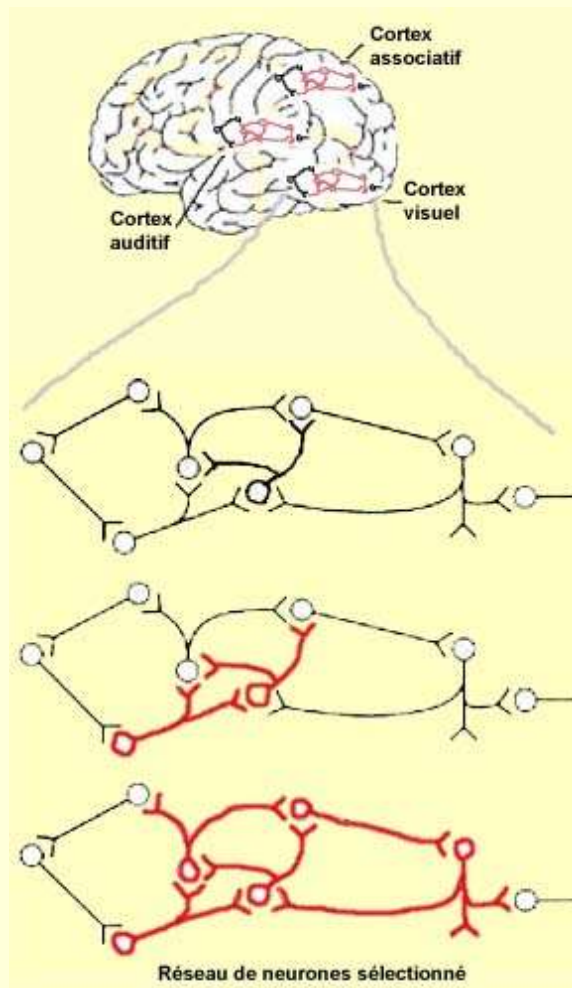
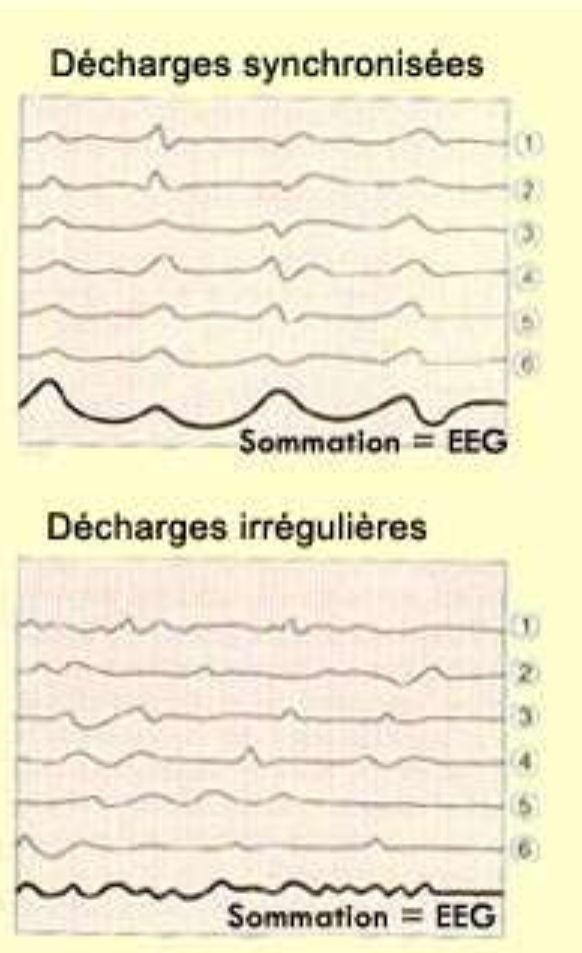


Décharges irrégulières



Car la synchronisation des oscillations rend possible 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.





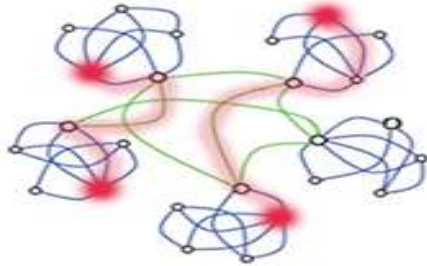
Le cerveau est anatomiquement « **surconnecté** » et doit trouver une façon de **mettre en relation** à tout moment les meilleures « assemblées de neurones » pour faire face à une situation.



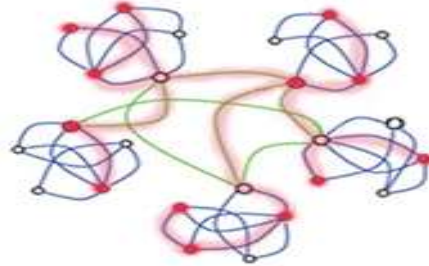
On assiste à une **compétition** entre différentes **coalitions** d'assemblées de neurones



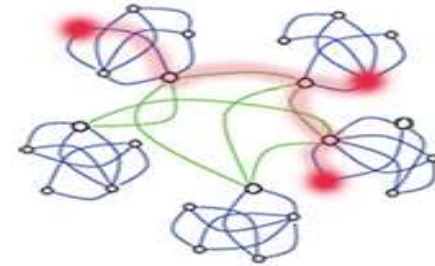
Coalition pour une situation A



Compétition entre différents attracteurs



Coalition pour une situation B



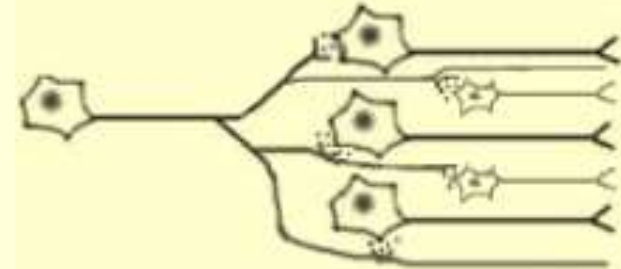
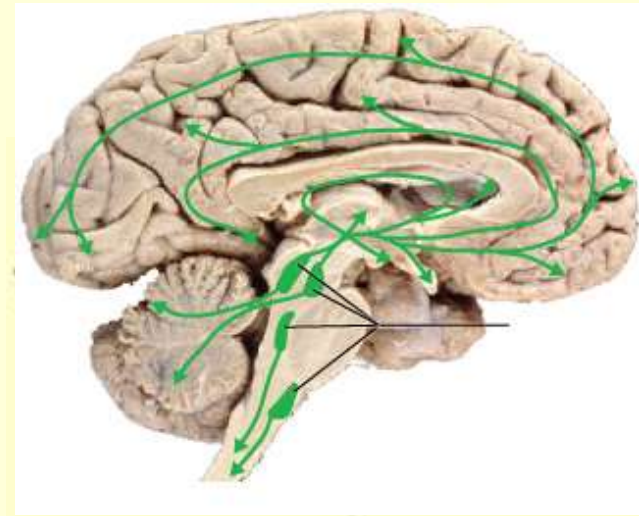
Recherche d'une coalition mieux adaptée

et un sous-réseau cognitif finit par s'imposer et devenir **le** mode comportemental approprié pour une situation donnée.

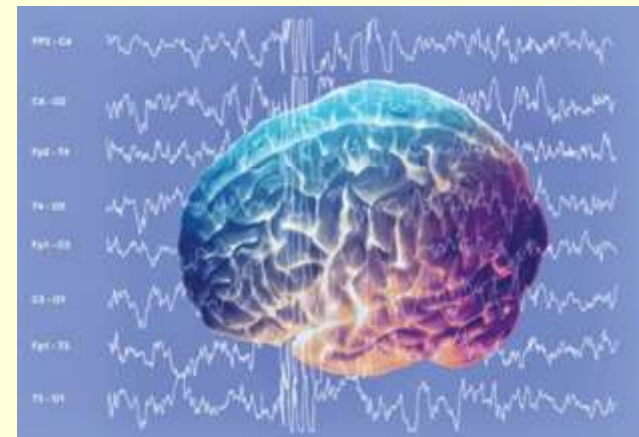
Quels sont les mécanismes capables de faire en sorte que ces différentes régions différenciées **se trouvent** et puissent **collaborer ensemble** pour former des **réseaux** fonctionnels ?

- 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.

- des phénomènes comme la **synchronisation d'activité oscillatoire** des neurones.



Neuromodulation





Dorsal Attention Network



Default Mode Network



Et ce que l'on observe c'est :

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

Two views of brain function

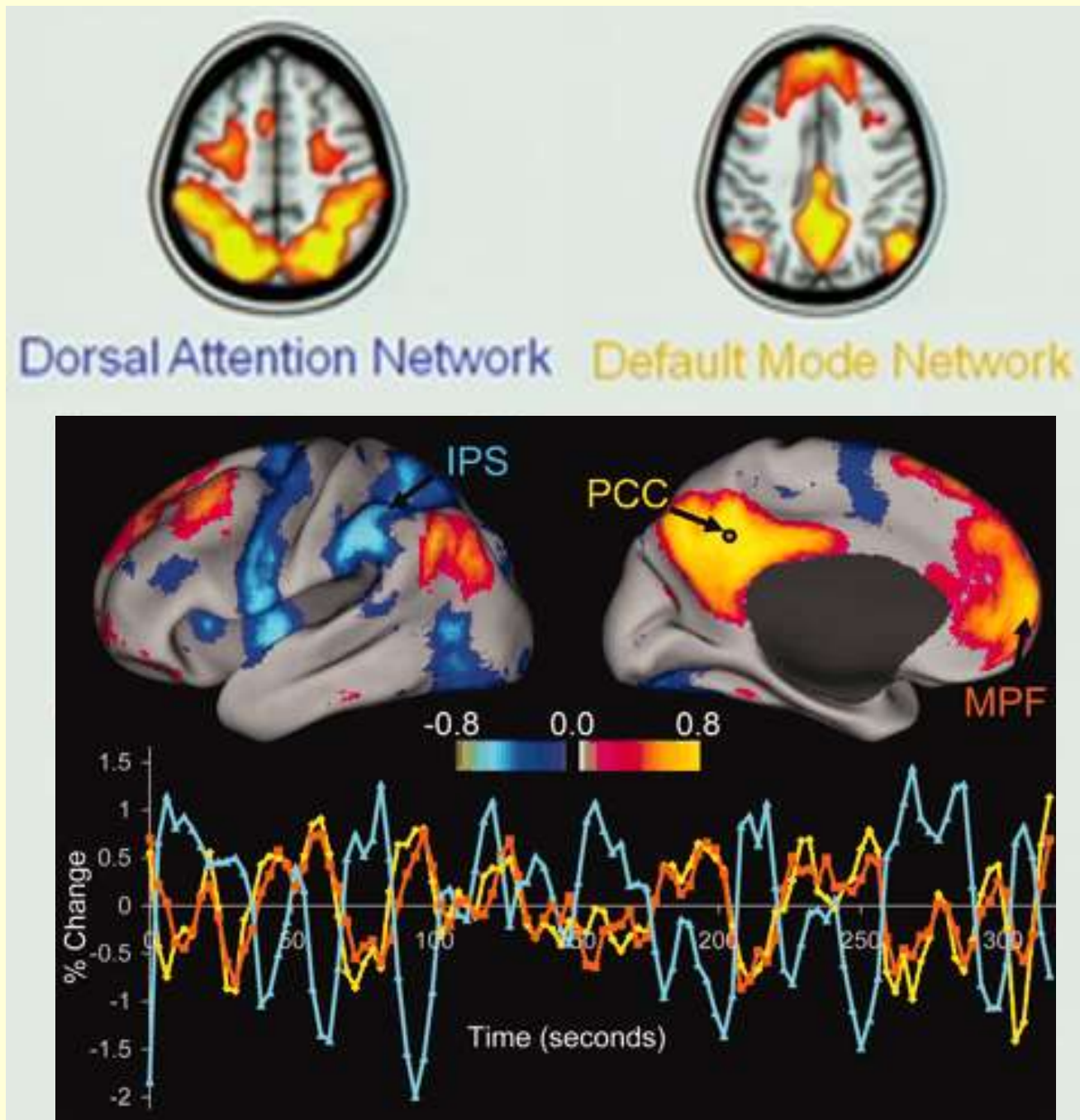
Marcus Raichle (2010)

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

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

Fox et al (2005) PNAS

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



Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Grâce à l'activité cérébrale endogène;

Grâce aux connexions réciproques dans les réseaux;

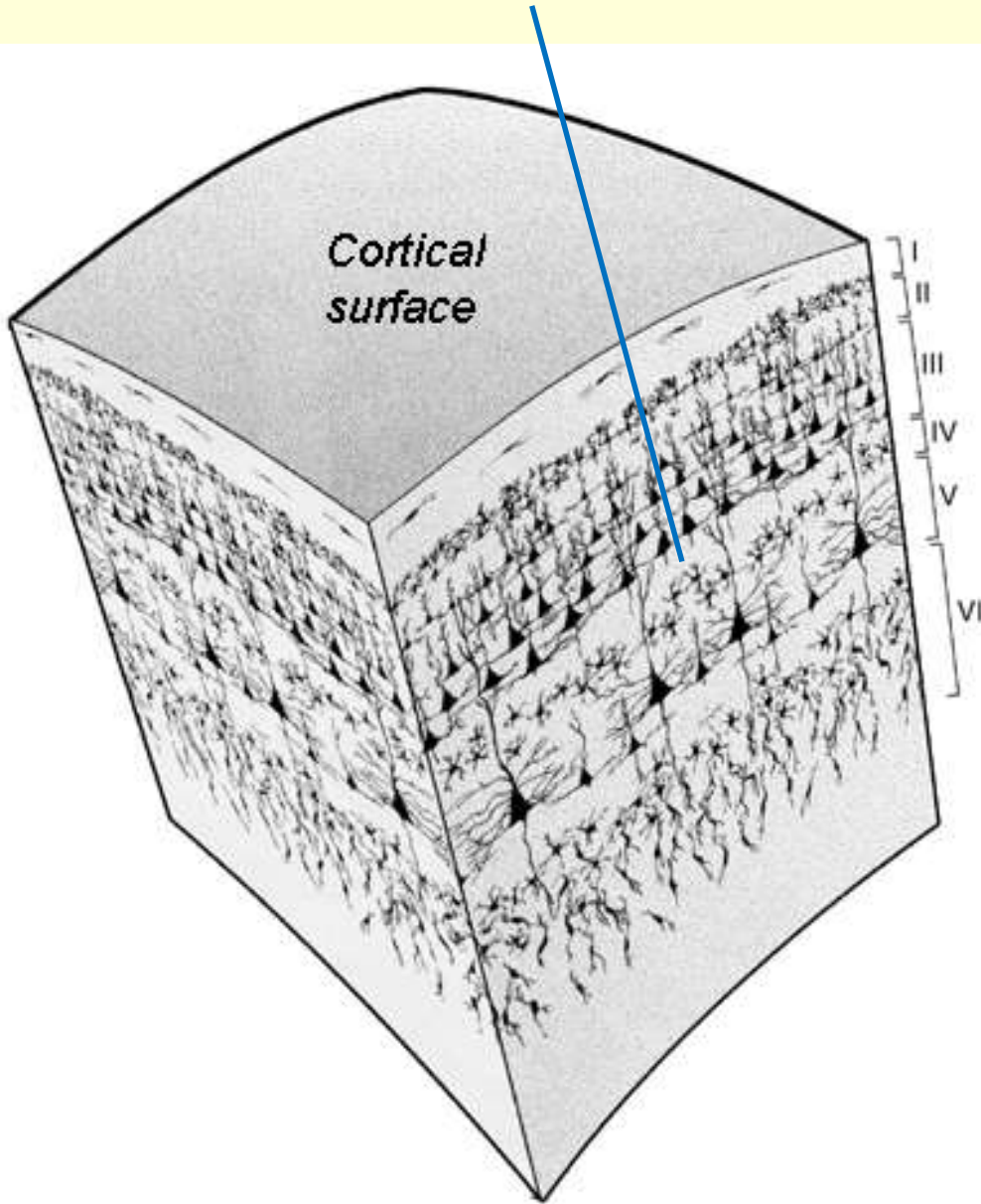
Oscillations et rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

Électroencéphalogramme;

B- Éveil, sommeil et rêve



Enregistrement **extracellulaire**
avec une micro-électrode.



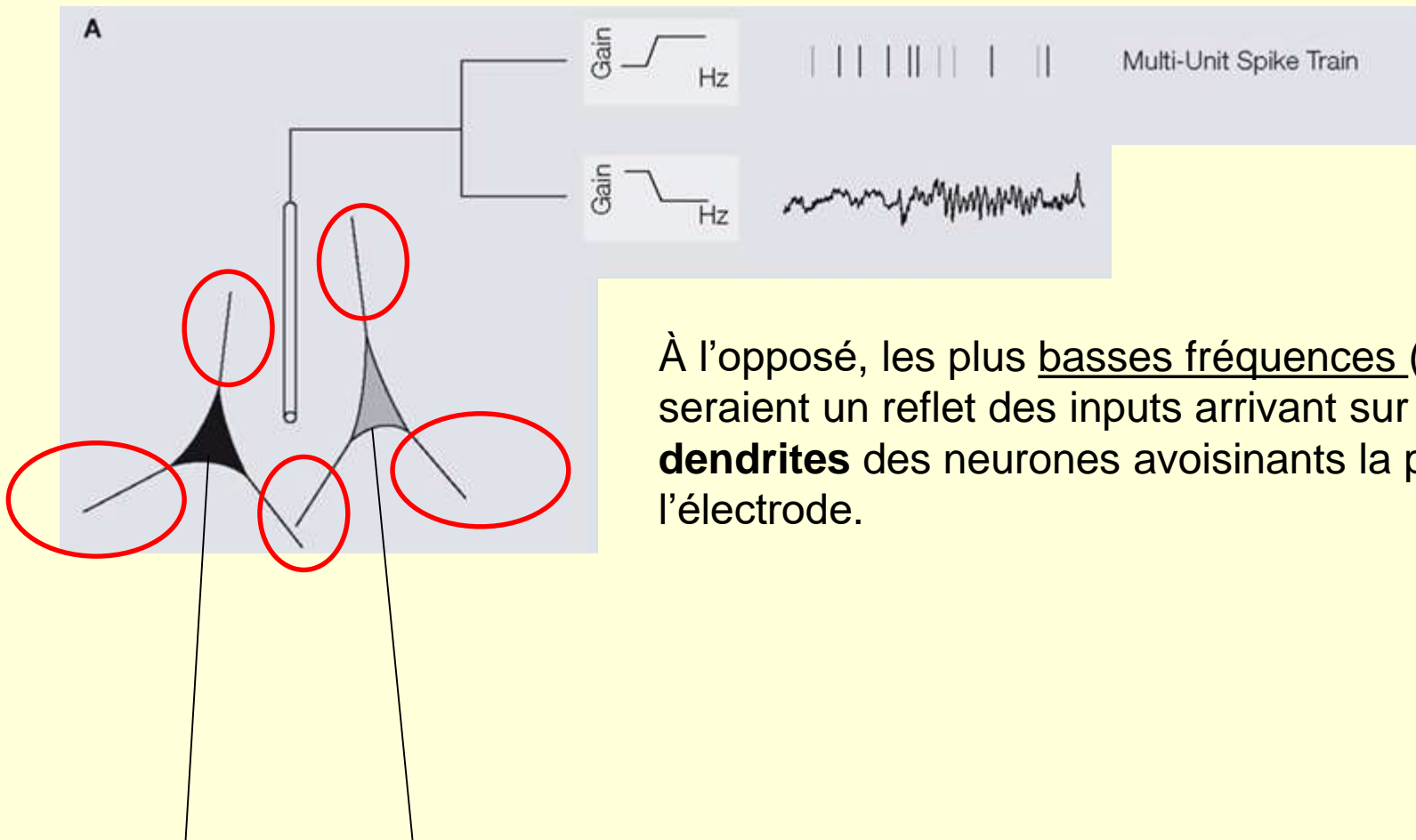
**Enregistrer cette activité
électrique du cerveau
pose de grands défis.**

Et comme les neurones
sont petits, extrêmement
nombreux et qu'il y a
différents types d'activité
électrique sur les
dendrite, le corps
cellulaire et l'axone,

**interpréter ce qu'on
enregistre pose des
défis encore plus
grands !**

Une électrode extracellulaire placée dans le cerveau mesure l'activité électrique générée par différents phénomènes électrochimiques dans un ensemble de neurones autour de la pointe de l'électrode.

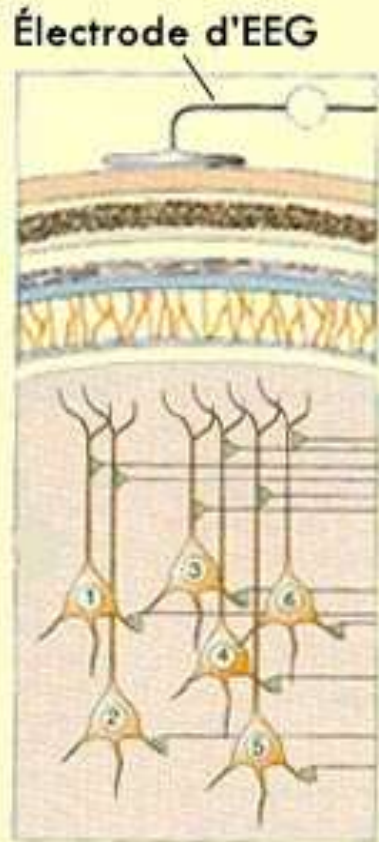
Par exemple, les plus hautes fréquences du signal (600 à 3 000 Hz) correspondraient aux potentiels d'action de **quelques milliers de neurones** situés dans un rayon de 140 à 300 μm . Cette activité "multi-unit (MU)" est donc considérée comme l'output d'une population locale de neurones.



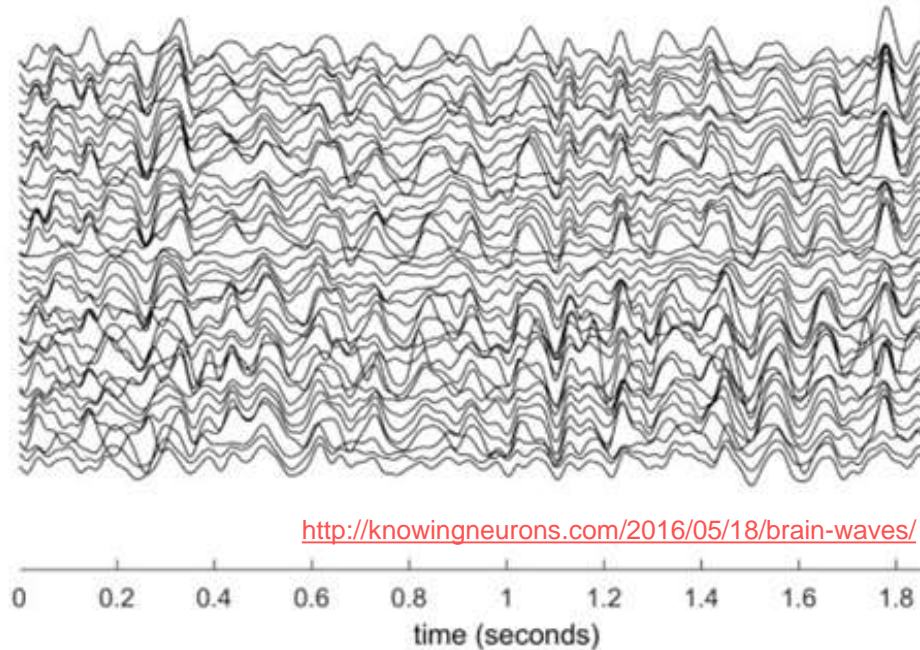
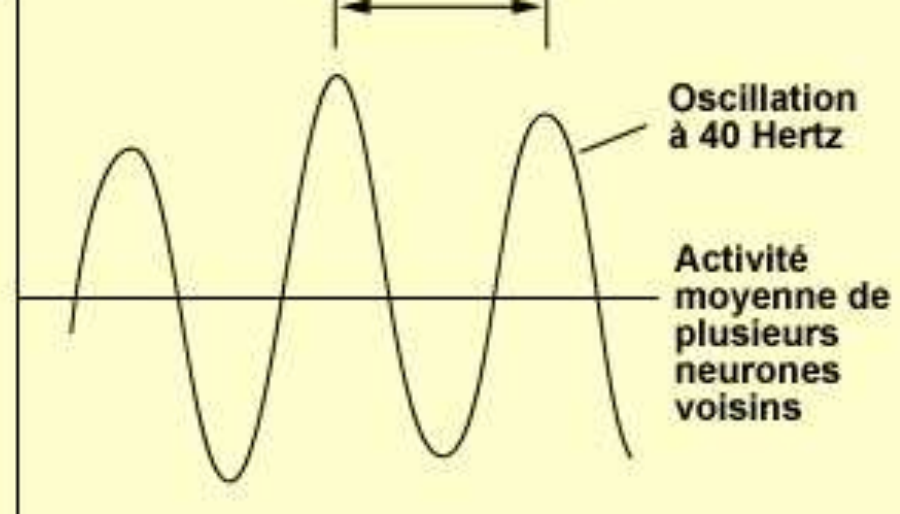
À l'opposé, les plus basses fréquences (<200 Hz) seraient un reflet des inputs arrivant sur les **dendrites** des neurones avoisinants la pointe de l'électrode.

L'EEG capte l'activité synchrone de populations entières de **milliers ou de millions de neurones**.

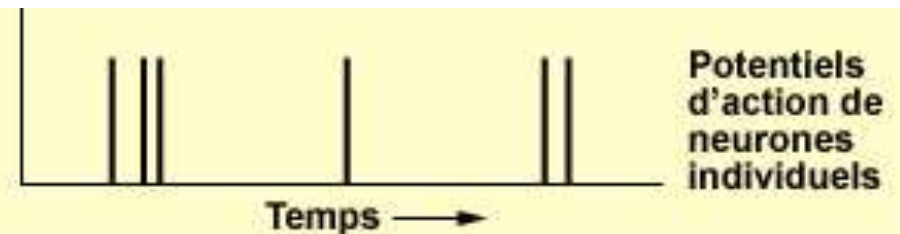
EEG :
niveau « macro »



“Local field potentials” :
niveau « meso »



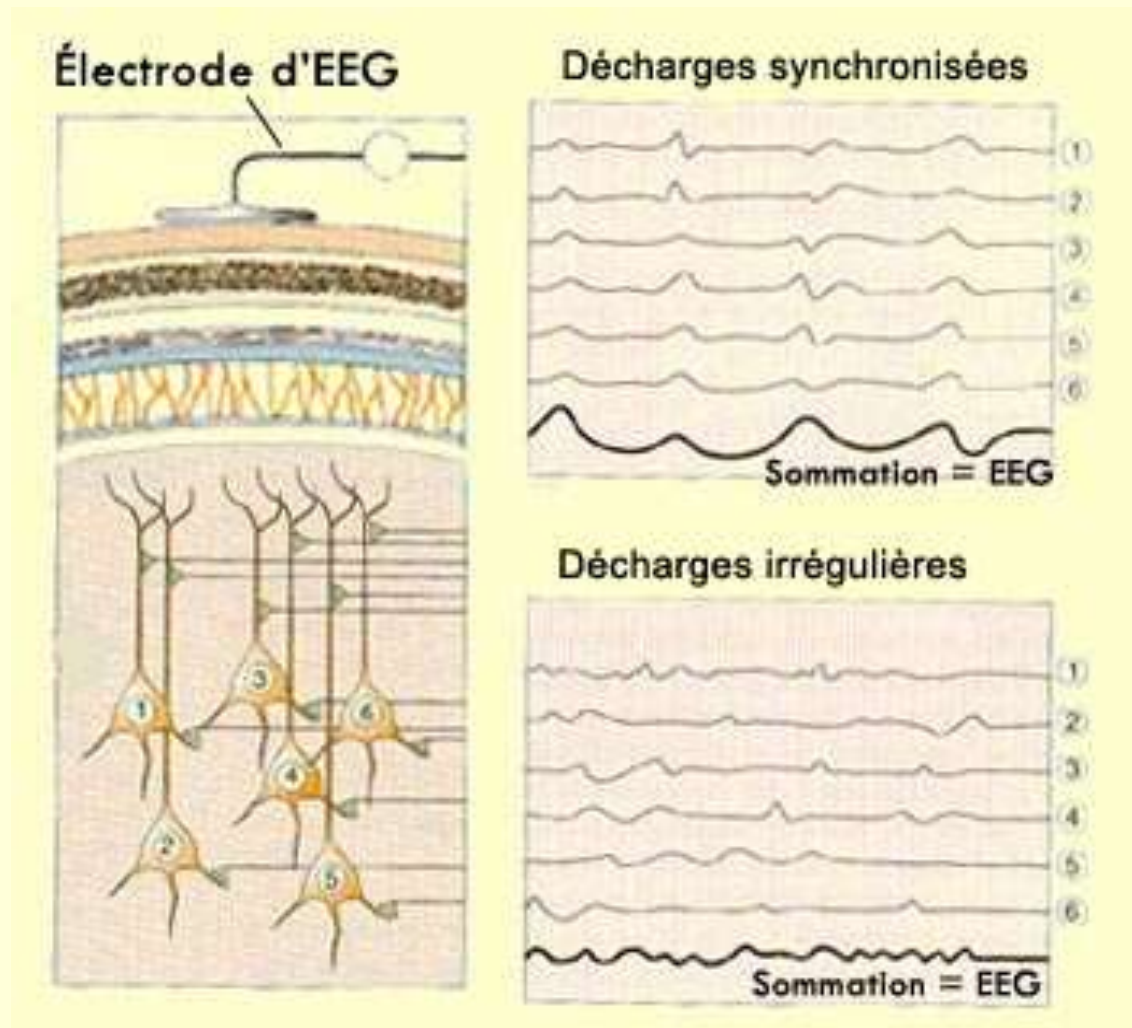
Potentiels d'action :
niveau « micro »





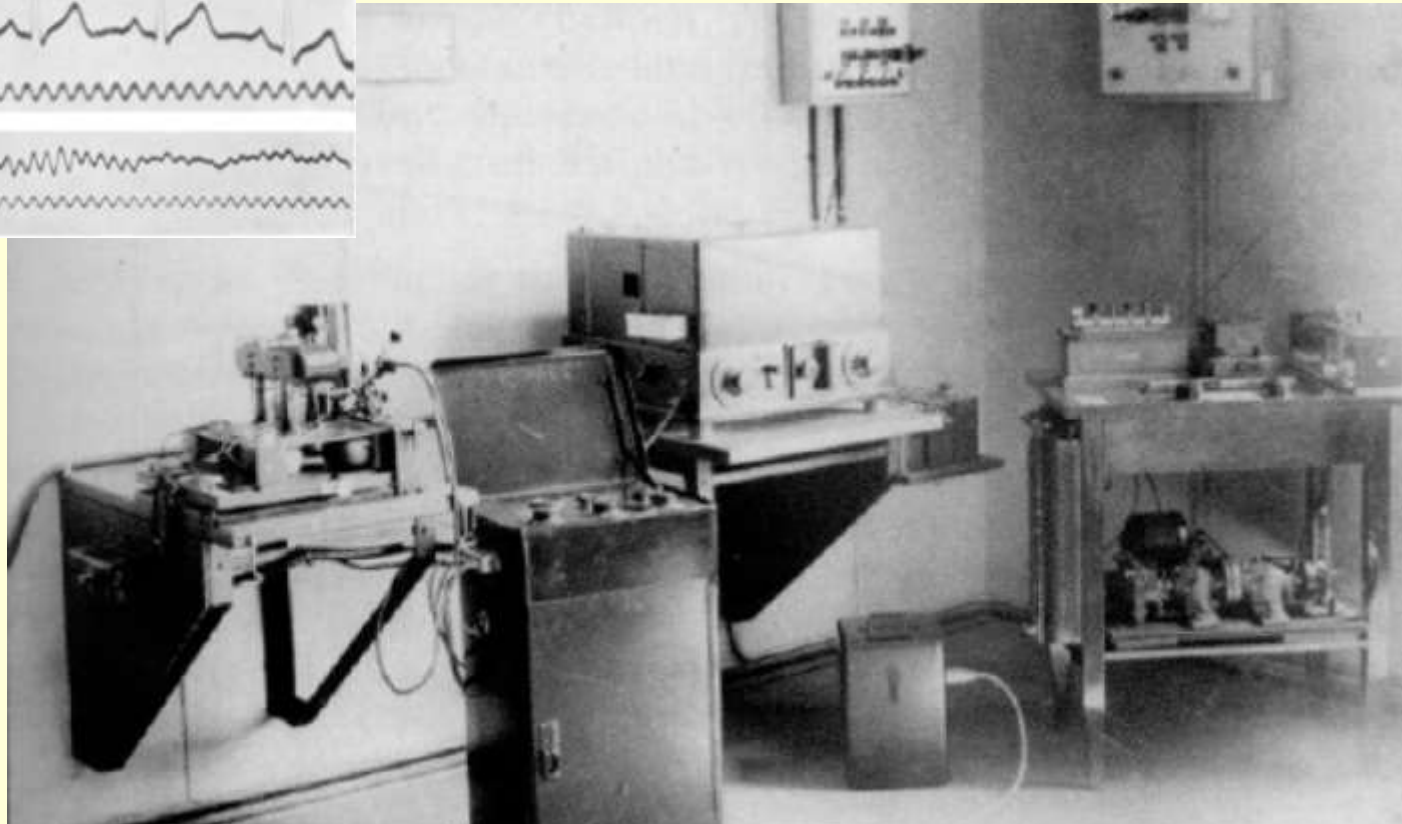
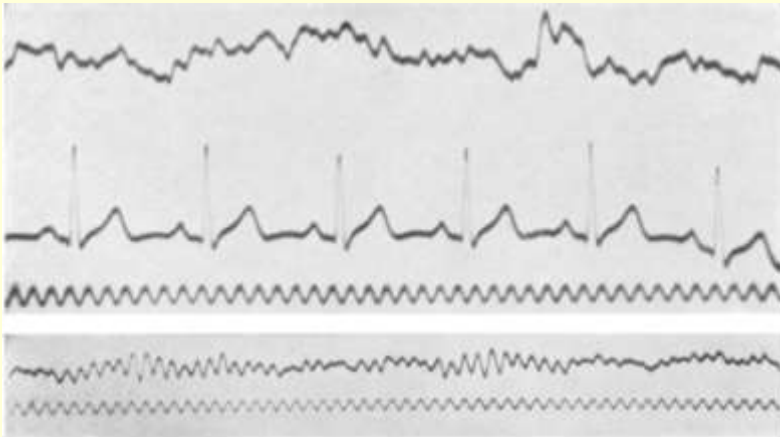
L'EEG fournit une mesure encore plus générale de l'activité des populations de neurones corticaux

(une **sommation de nombreux LFPs**).



Comme le voltage diminue avec le carré de la distance, l'activité dans les **structures sous-corticales** est plus difficile à détecter.

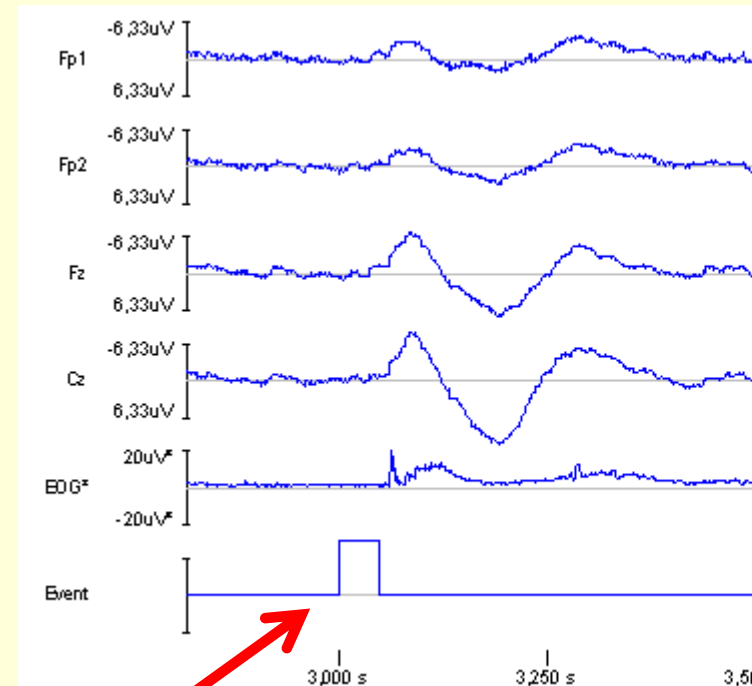
- Premier enregistrement d'un EEG chez l'humain : Hans Berger, en **1924**



Dans les années **1970** : développement permettant de relier l'activité corticale de l'EEG avec la présentation d'un **stimulus** (potentiels évoqués)



Exemple : Kutas et Hillyard trouve en **1980** que lorsque le dernier mot d'une phrase est anormal, l'EEG montre une déflexion négative environ 400 millisecondes après.



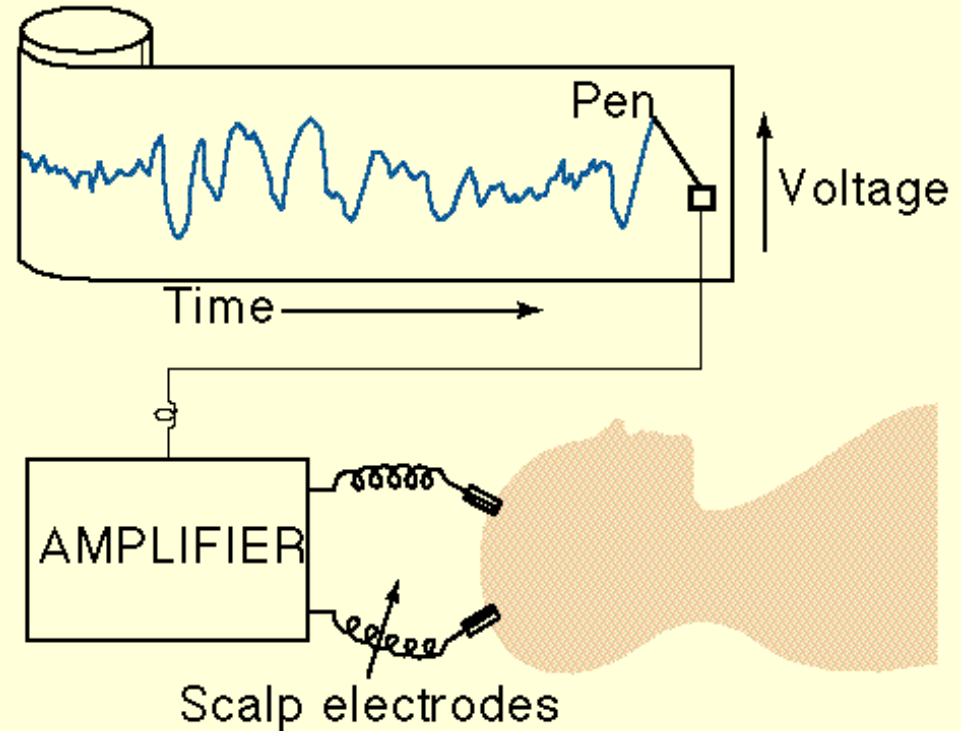
L'électroencéphalographie (EEG) est donc une technique **non invasive** pour enregistrer l'activité du cerveau.

Mesure directe de cette activité électrique, contrairement à l'imagerie cérébrale.

Traditionnellement **peu d'info sur la localisation spatiale** de l'activité

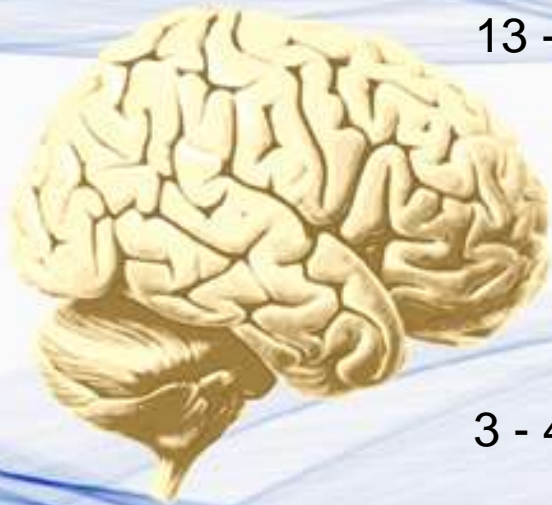
mais **bonne résolution temporelle** (millisecondes)

Electroencephalography Recording System



Les oscillations recueillies, dont la fréquence va de $< 1 \text{ Hz}$ à $> 100 \text{ Hz}$, correspond à l'**activité globale** des neurones du cerveau **en temps réel** (comparé à l'IRMf où il n'y a qu'un scan total du cerveau par seconde !)

EEG brainwaves



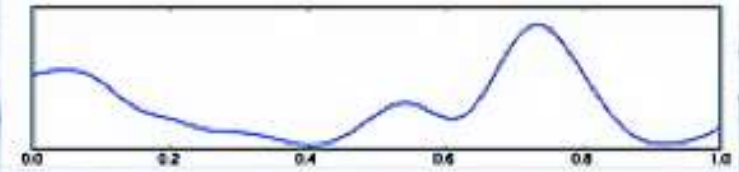
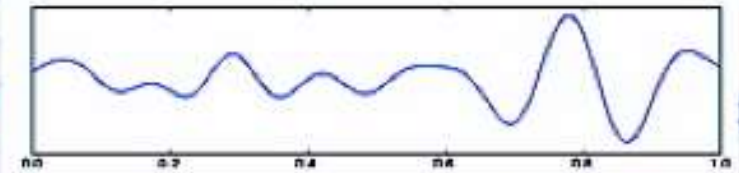
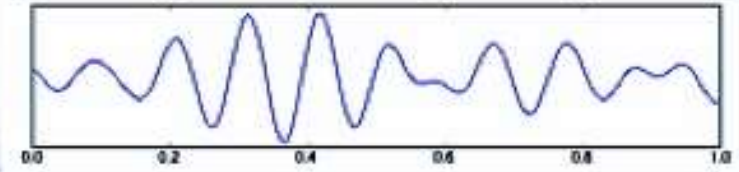
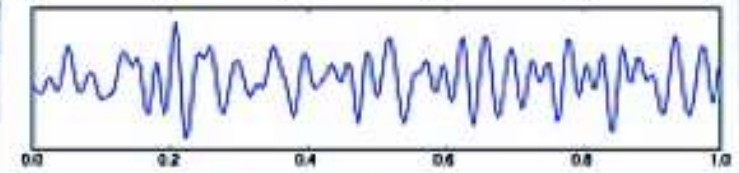
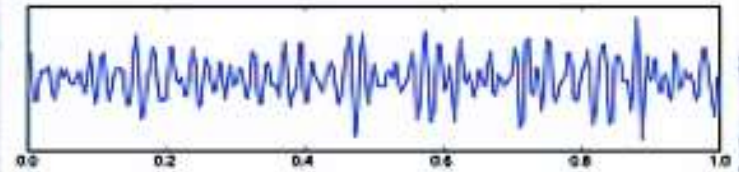
> 30 - 35 Hz **Gamma**
Problem solving,
concentration

13 -15 à 30 Hz **Beta**
Busy, active mind

8 à 12 Hz **Alpha**
Reflective, restful

3 - 4 à 7- 8 Hz **Theta**
Drowsiness

0,5 à 3 -4 Hz **Delta**
Sleep, dreaming





- Utilisation fréquente en neurologie : détection de foyers **épileptiques**
- Aussi : diagnostic de coma, de mort cérébrale
- Outil important pour la recherche sur **le sommeil**



Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

A- Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Grâce à l'activité cérébrale endogène;

Grâce aux connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

Électroencéphalogramme;

B- Éveil, sommeil et rêve



ÉVEIL



On passe environ **le tiers** de notre vie à dormir et à rêver !

SOMMEIL PROFOND



RÊVE



ÉVEIL



SOMMEIL PROFOND



RÊVE



Si on analyse les caractéristiques de ces deux types de sommeil et de l'éveil, on note d'importantes **différences physiologiques** un peu partout dans l'organisme.



SOMMEIL PROFOND



RÊVE



- Durant l'éveil, **les sensations** sont vives et proviennent de l'environnement extérieur.

- Quant au sommeil lent, les sensations sont absentes ou très atténuées.

- Elles sont également vives durant les rêves du sommeil paradoxal, mais générées intérieurement cette fois-ci.



- Quand on est éveillé, l'**activité motrice** est volontaire et pratiquement continue.

SOMMEIL PROFOND



Durant le sommeil lent, elle est occasionnelle et involontaire.

RÊVE



Et lors du sommeil paradoxal, elle est inexistante (sauf pour les mouvements oculaires rapides). En réalité, les mouvements sont commandés par le cerveau mais sont bloqués et non réalisés, d'où une atonie musculaire généralisée.



La pensée est plutôt logique et évolue chez l'individu éveillé.

SOMMEIL PROFOND

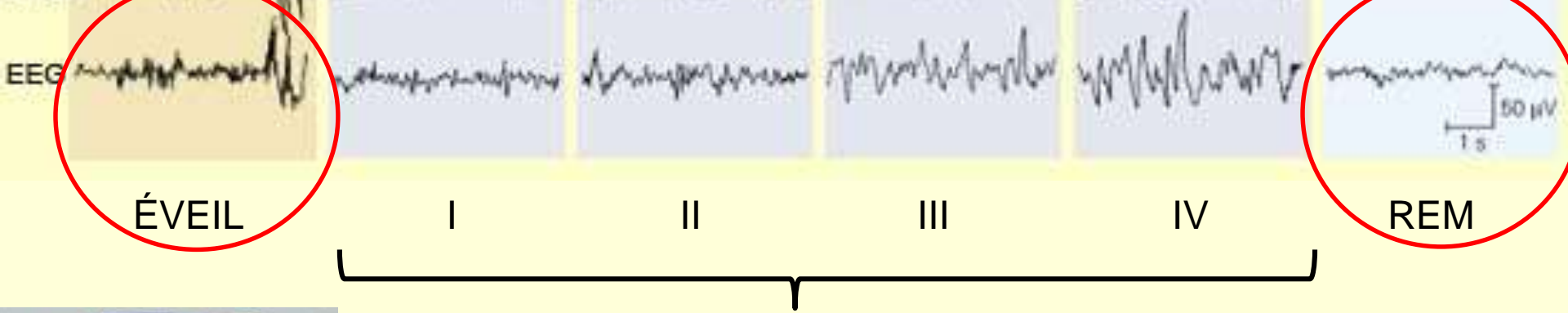


La pensée devient répétitive avec l'apparition du sommeil lent.

RÊVE



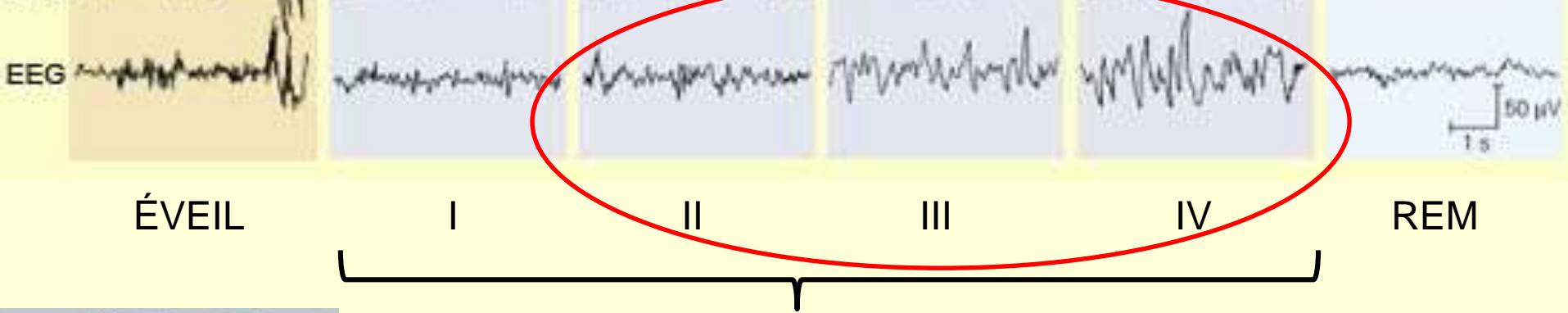
Elle est carrément illogique et étrange durant les rêves.



- Durant l'éveil, les **sensations sont vives** et proviennent de l'environnement **extérieur**.

- Elles sont également **vives** durant les rêves du sommeil paradoxal, mais générées **intérieurement** cette fois-ci.

→ Il est intéressant de noter que le tracé de l'EEG est semblable pour l'éveil et le sommeil paradoxal avec sa faible amplitude et sa fréquence élevée.



SOMMEIL PROFOND

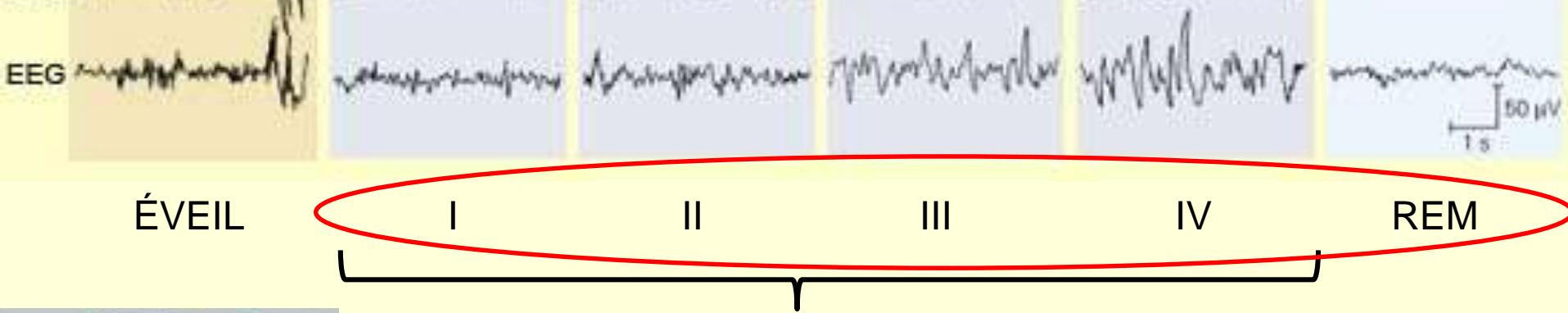


RÊVE



- Quant au sommeil lent, **les sensations sont absentes** ou très atténuées.

→ C'est le **contraire** pour le sommeil lent qui montre plutôt une **grande amplitude et un rythme lent**.



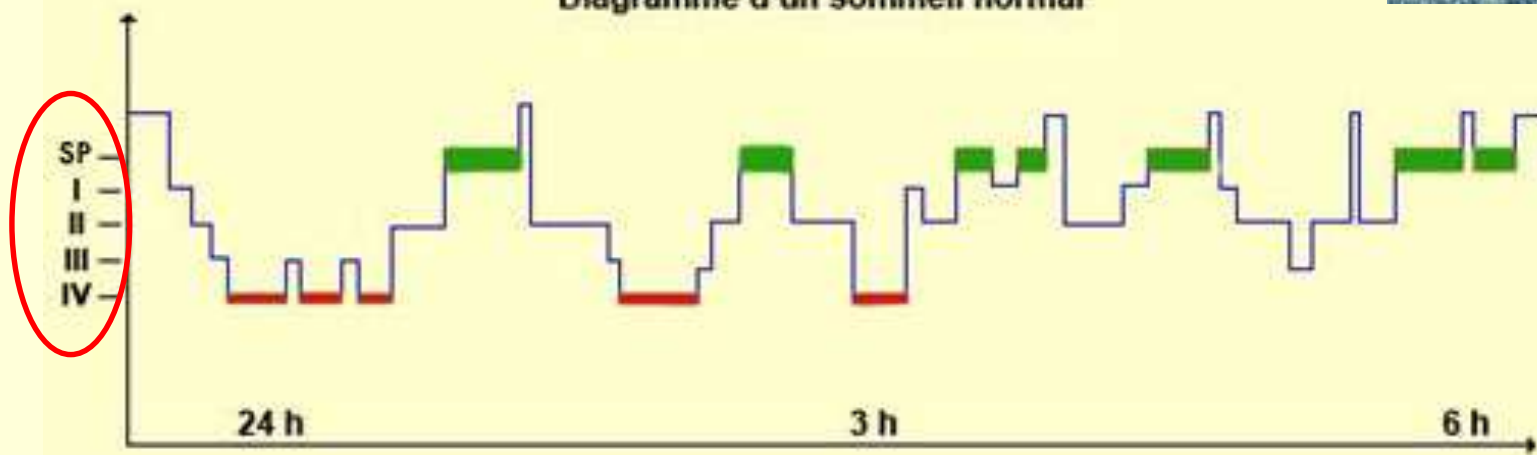
SOMMEIL PROFOND



RÊVE



Diagramme d'un sommeil normal

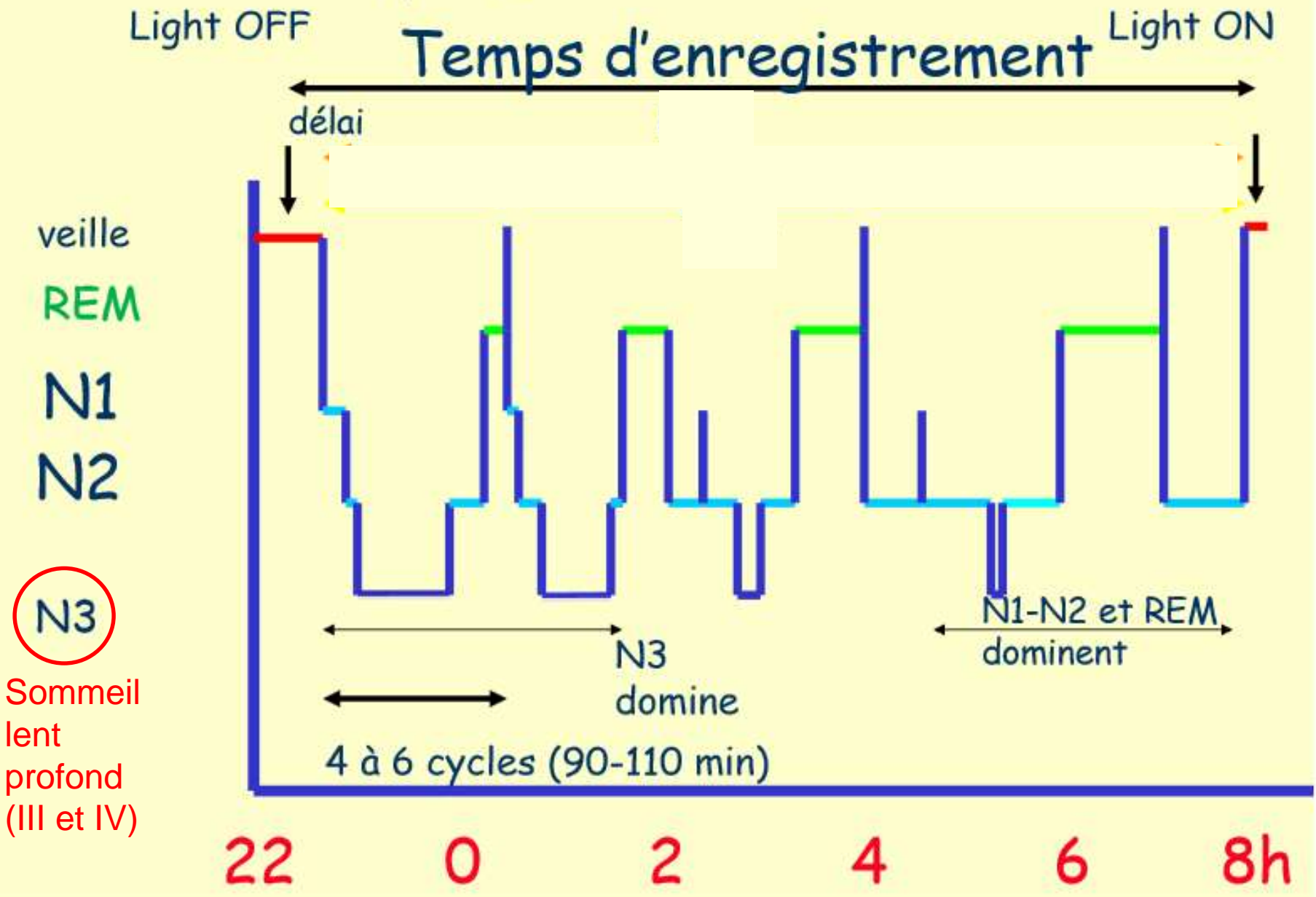


Sommeil lent : I à IV —

Sommeil paradoxal : V ■

Sommeil profond : IV ■

Hypnogramme Normal



Pourcentages et durées des stades

REM: 20-25%

Veille: < 5%

Stade N1: 2-5 %

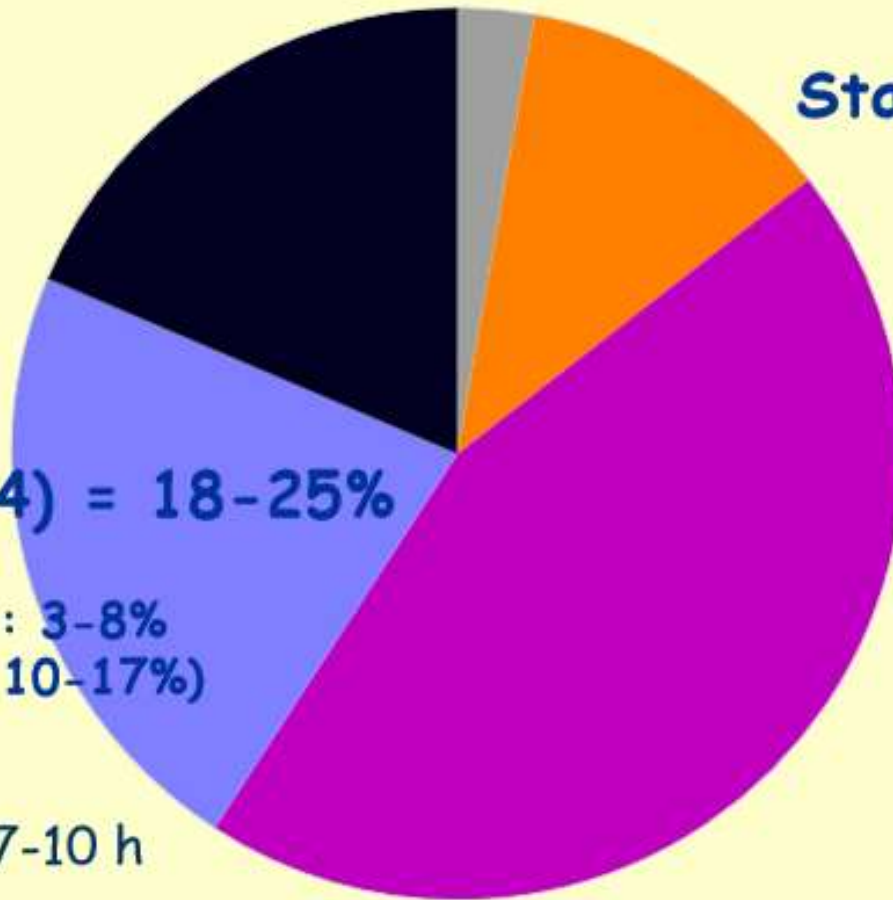
Stade N2: 45%-55%

N3 (3+4) = 18-25%

(Stade 3 : 3-8%
Stade 4: 10-17%)

NREM : 75-80%

PTS = 7-10 h

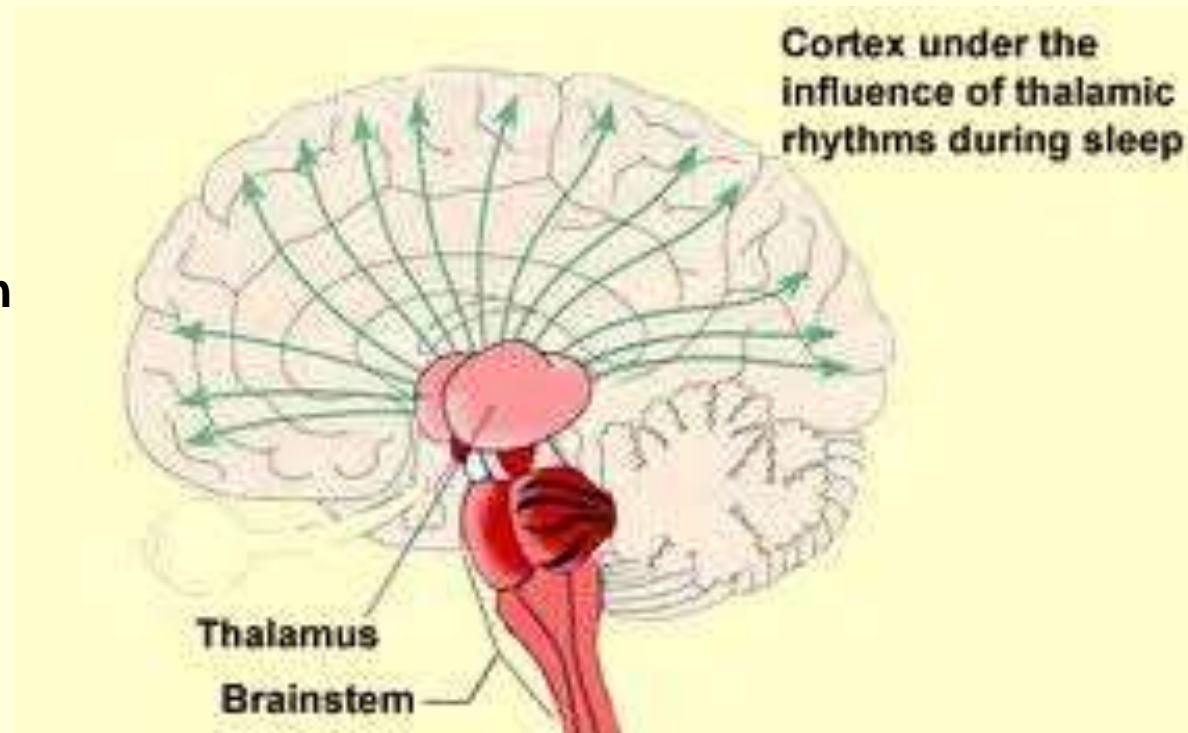


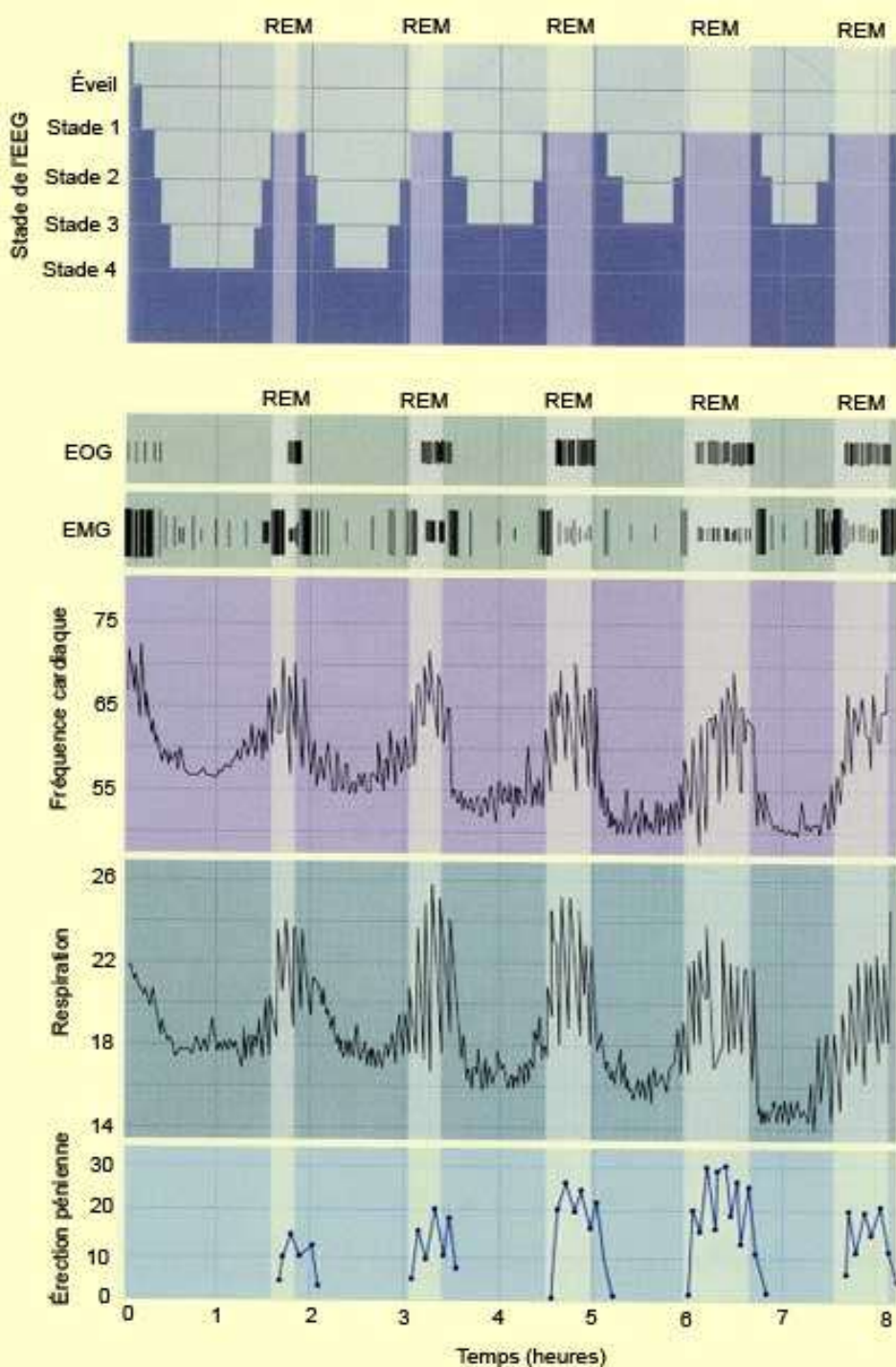
Le sommeil lent semble correspondre à un état fait pour le **repos**.

Le métabolisme général de l'organisme diminue : température, consommation d'énergie, fréquence cardiaque, respiration, fonction rénale, tout cela ralentit conformément à la prépondérance du système parasympathique durant cette phase du sommeil.

Les rythmes lents de l'électroencéphalogramme (ou EEG) durant le sommeil lent indiquent que **le cerveau semble également au repos**.

La grande synchronisation de l'activité neuronale qu'on y observe, **résultat d'une activité autonome du thalamus plutôt que de son rôle de « relais » habituel**, va dans le même sens, à savoir que la plus grande partie de l'information sensorielle n'atteint même pas le cortex durant cette phase.



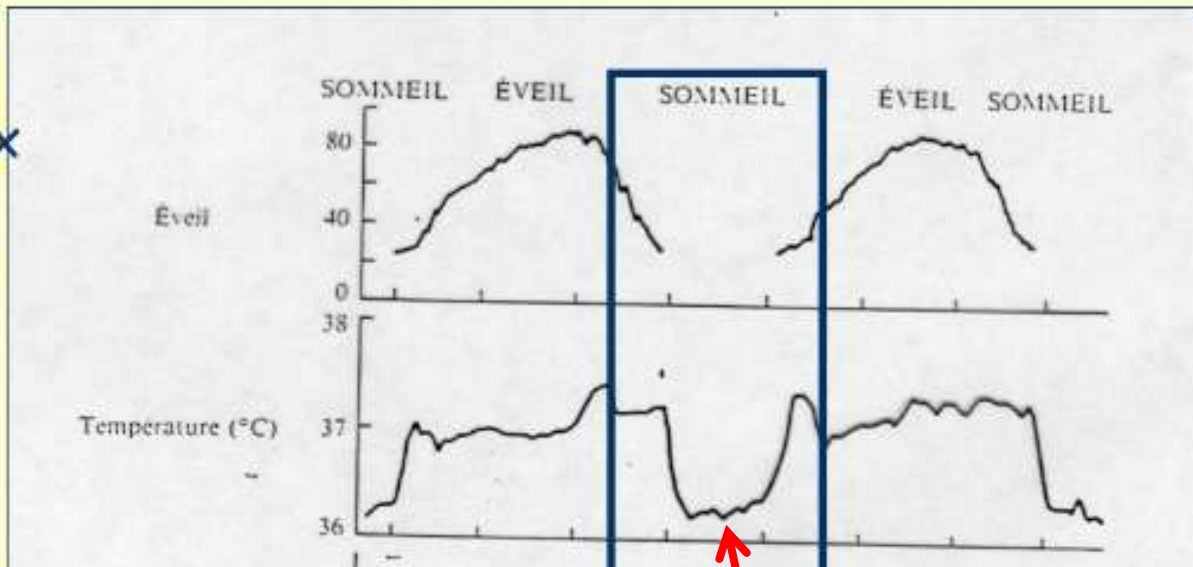


L'alternance du sommeil lent et paradoxal est aussi une alternance entre un état **économe** et un état **énergivore** du cerveau.

Les neurones corticaux, qui sont activés de façon synchrone et fonctionnent en quelque sorte au ralenti durant le sommeil lent, **réduisent en effet d'un tiers** leur consommation de glucose et d'oxygène.

En sommeil paradoxal, au contraire, les neurones sont hyperactifs et **consomment autant sinon plus** de glucose et d'oxygène que lorsque nous sommes éveillés.

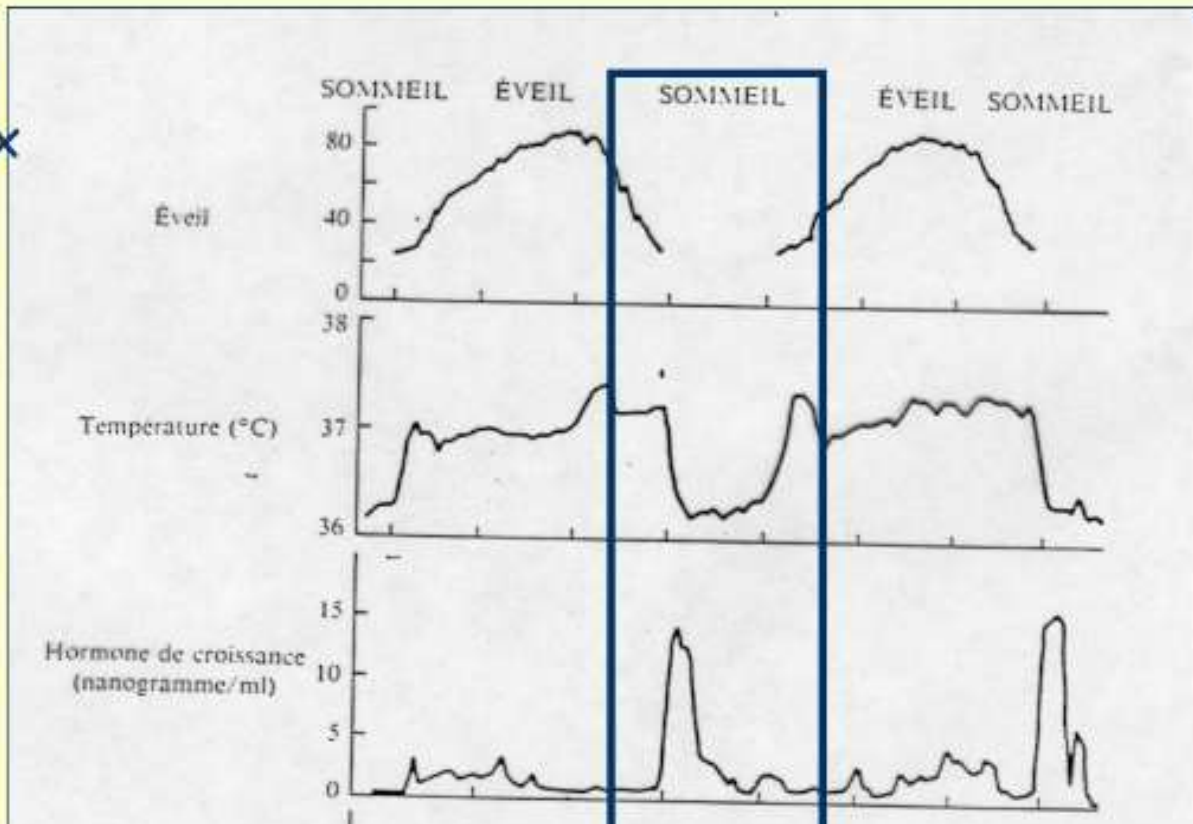
Rythmes hormonaux



Étant donné que le sommeil rend les animaux vulnérables, il faut que les **avantages adaptatifs** qu'ils en retirent soient non négligeables.

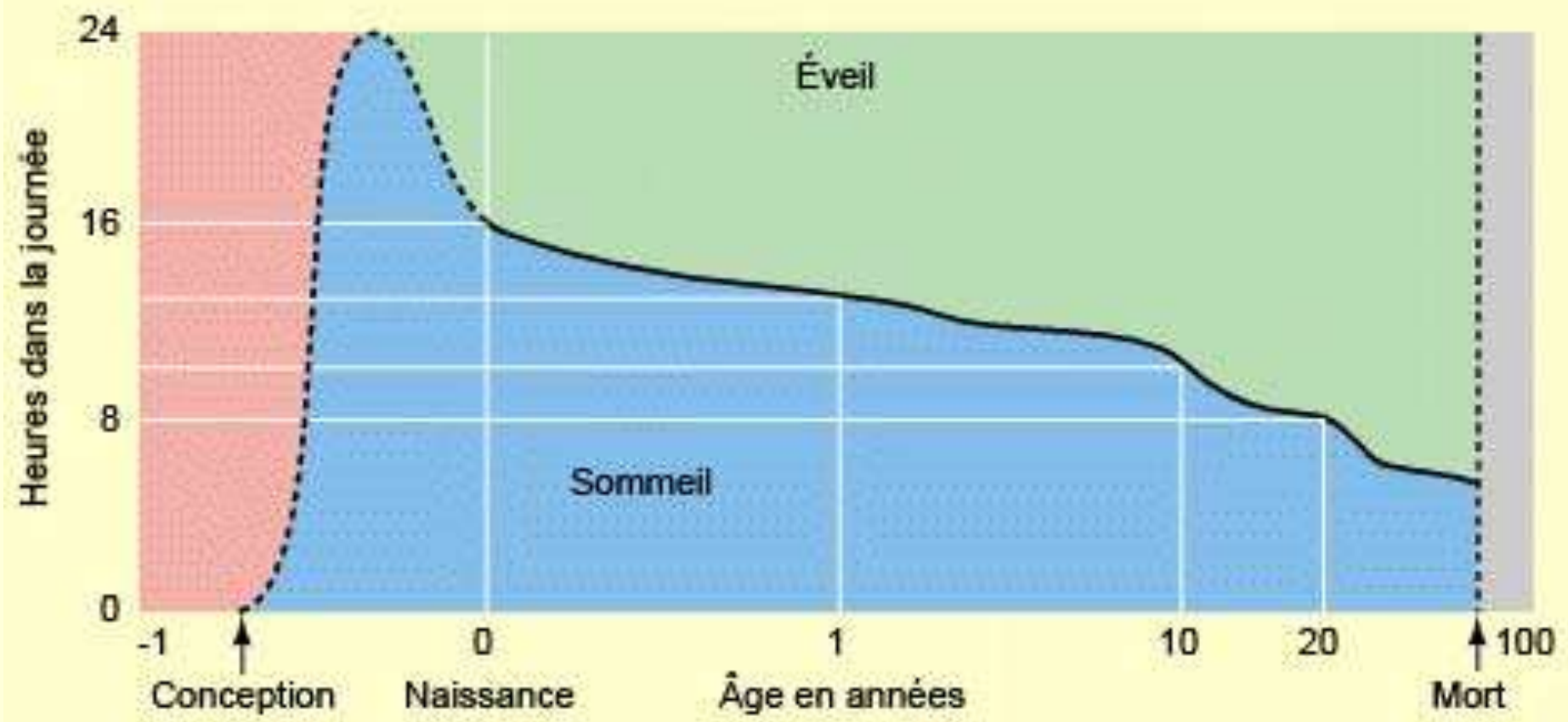
Sur le plan énergétique, comme il fait généralement plus froid la nuit, **le métabolisme moins élevé et la température du corps plus basse** que l'on enregistre durant le sommeil pourrait être l'un des avantages du sommeil nocturne.

Rythmes hormonaux

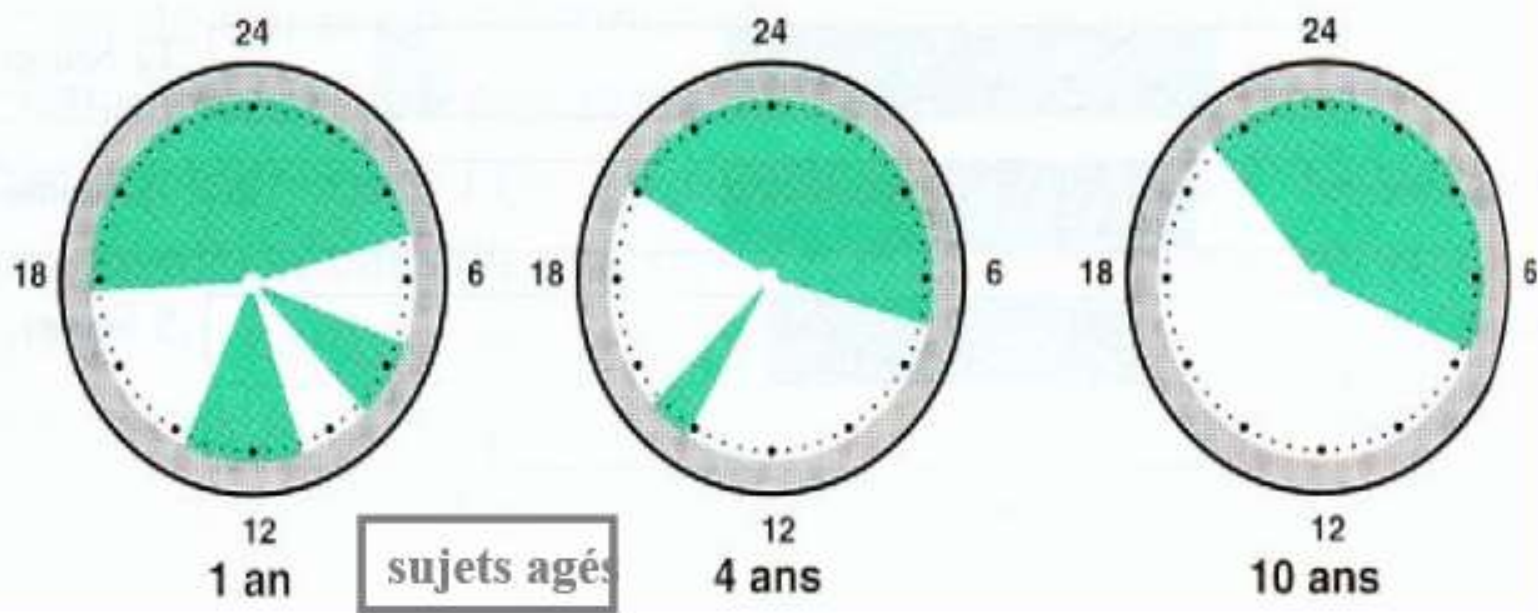
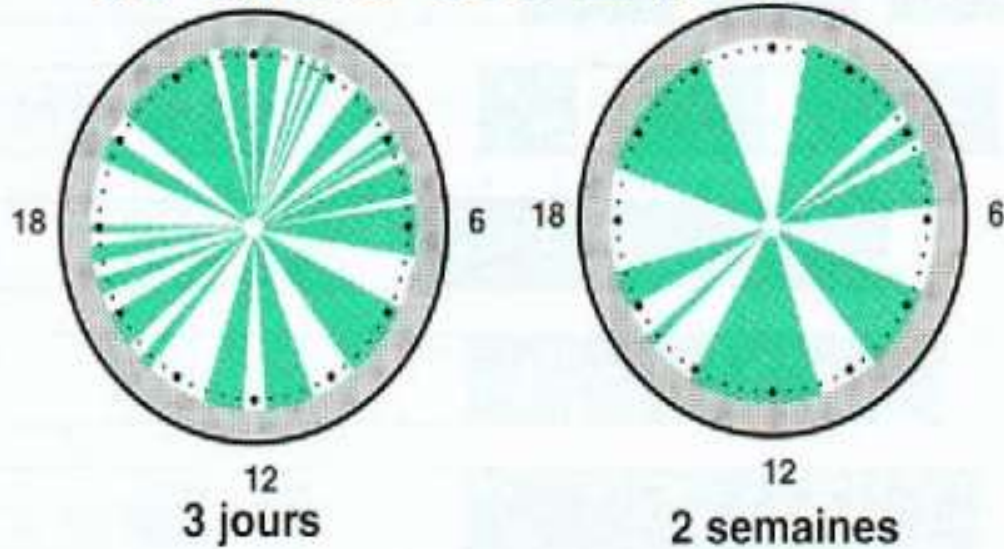


C'est durant le **sommeil profond** qu'ont lieu les divisions cellulaires et la production de l'hormone de croissance, d'où l'importance du sommeil chez l'enfant.

D'autres hormones ont aussi des pics de sécrétion durant la nuit.



Répartition des épisodes de sommeil au cours des 24h



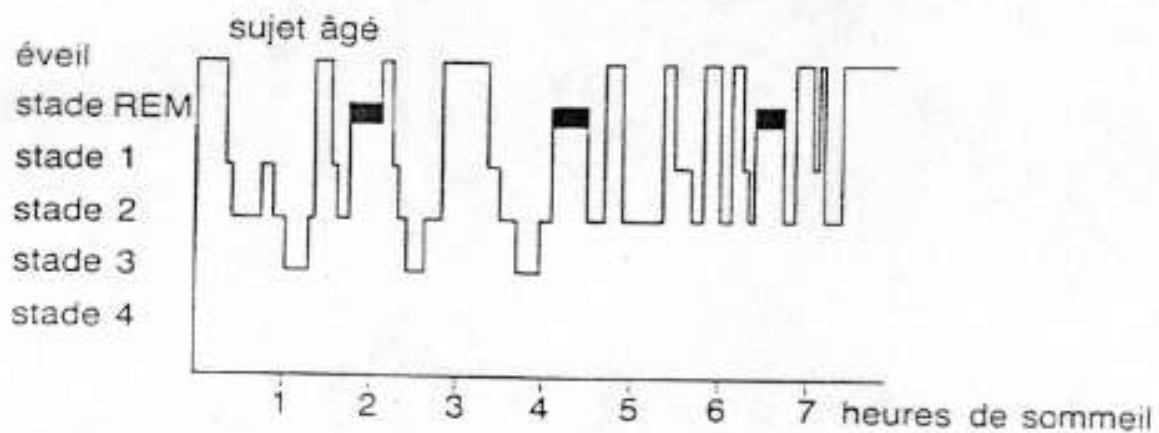
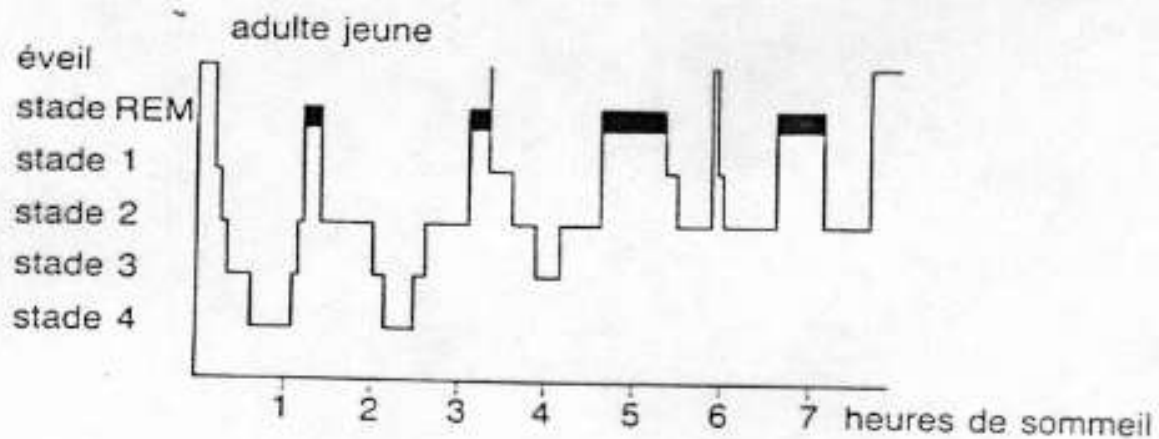
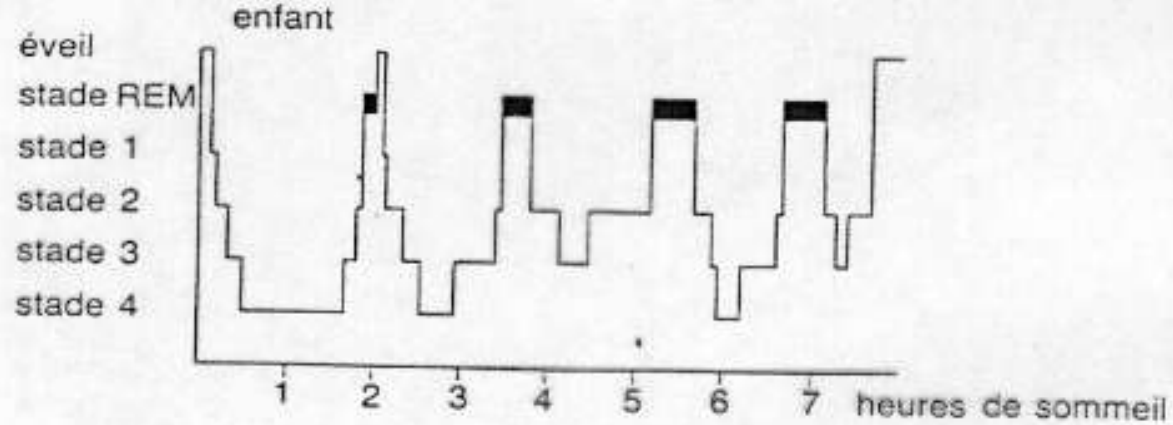


Fig. 6: Exemples d'hypnogrammes obtenus chez un enfant, un adulte jeune et un sujet âgé.

Mécanismes neuronaux produisant le sommeil :

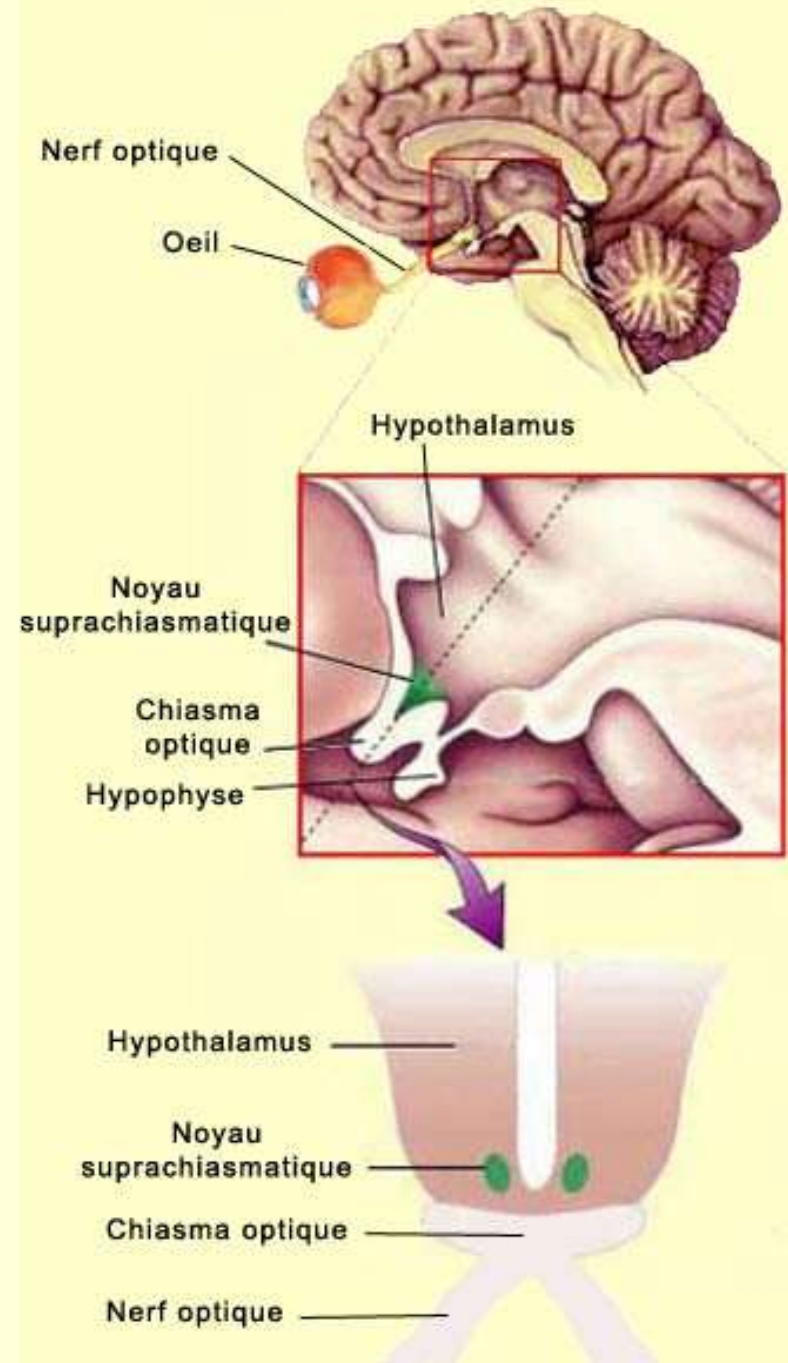
Pourquoi et comment on **s'endort** ?

Il semble que **deux** processus doivent se superposer correctement dans l'organisme pour que l'on puisse s'endormir.

Le **premier** est un rythme dit « circadien », c'est-à-dire réglé sur une période de 24 heures par notre horloge biologique, et qui orchestre la sécrétion cyclique de plusieurs hormones dont la **mélatonine**, impliquée dans le sommeil.

Cette « horloge centrale » est située dans les **noyaux suprachiasmatiques** situés juste au-dessus du chiasma optique, l'endroit où les deux nerfs optiques se croisent.

Cette position stratégique permet aux noyaux suprachiasmatiques de recevoir des prolongements du nerf optique qui lui indique le niveau d'intensité lumineuse ambiante.



Le **deuxième** processus est l'accumulation de substances « hypnogènes » durant les 16 heures de la journée, substances qui induisent une envie de dormir ne disparaissant qu'avec le sommeil.

L'endormissement ne serait donc possible que lorsque, d'une part, votre horloge biologique a amené votre organisme dans une conformation hormonale favorable au sommeil, et d'autre part que cela fait un bon moment que vous n'avez pas dormi.

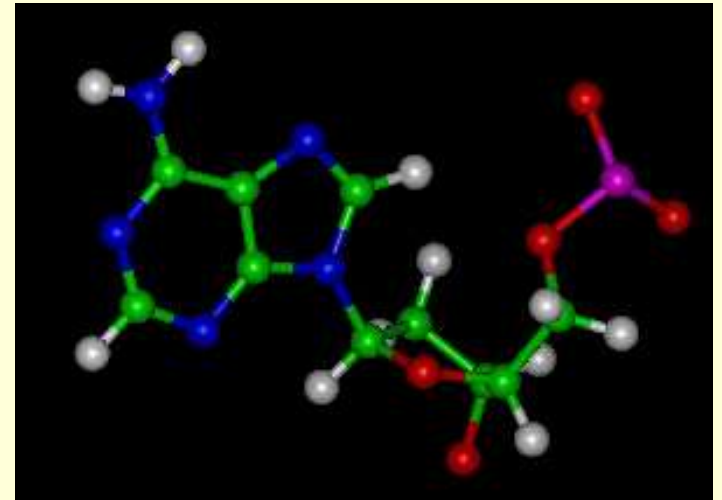
C'est aussi ce qu'on appelle **la dette de sommeil**, qui s'accumule durant toute la journée.

Et en général les deux sont en phase (mais en voyage, le décalage horaire peut les déphaser).

L'un de ces facteurs hypnogènes les plus étudiés est l'**adénosine**, une petite molécule qui agit comme neuromodulateur au niveau de très nombreuses synapses du cerveau.

Depuis très longtemps, des antagonistes naturels des récepteurs de l'adénosine sont ingérés par l'être humain pour se garder éveillé plus longtemps. La caféine du café ou la théophylline du thé, qui sont deux de ces substances, sont bien connues pour leur effet stimulant.

C'est au début des années 1980 que la raison pour laquelle tant de gens boivent du café pour se réveiller devint évidente : la caféine, la substance psychoactive du café, empêche l'adénosine de se fixer sur certains neurones du cerveau.



L'adénosine est un produit de la dégradation de l'ATP (adénosine triphosphate), la molécule qui sert de « monnaie énergétique » à nos différentes fonctions cellulaires. La production d'adénosine reflète donc le niveau d'activité des neurones et des cellules gliales.

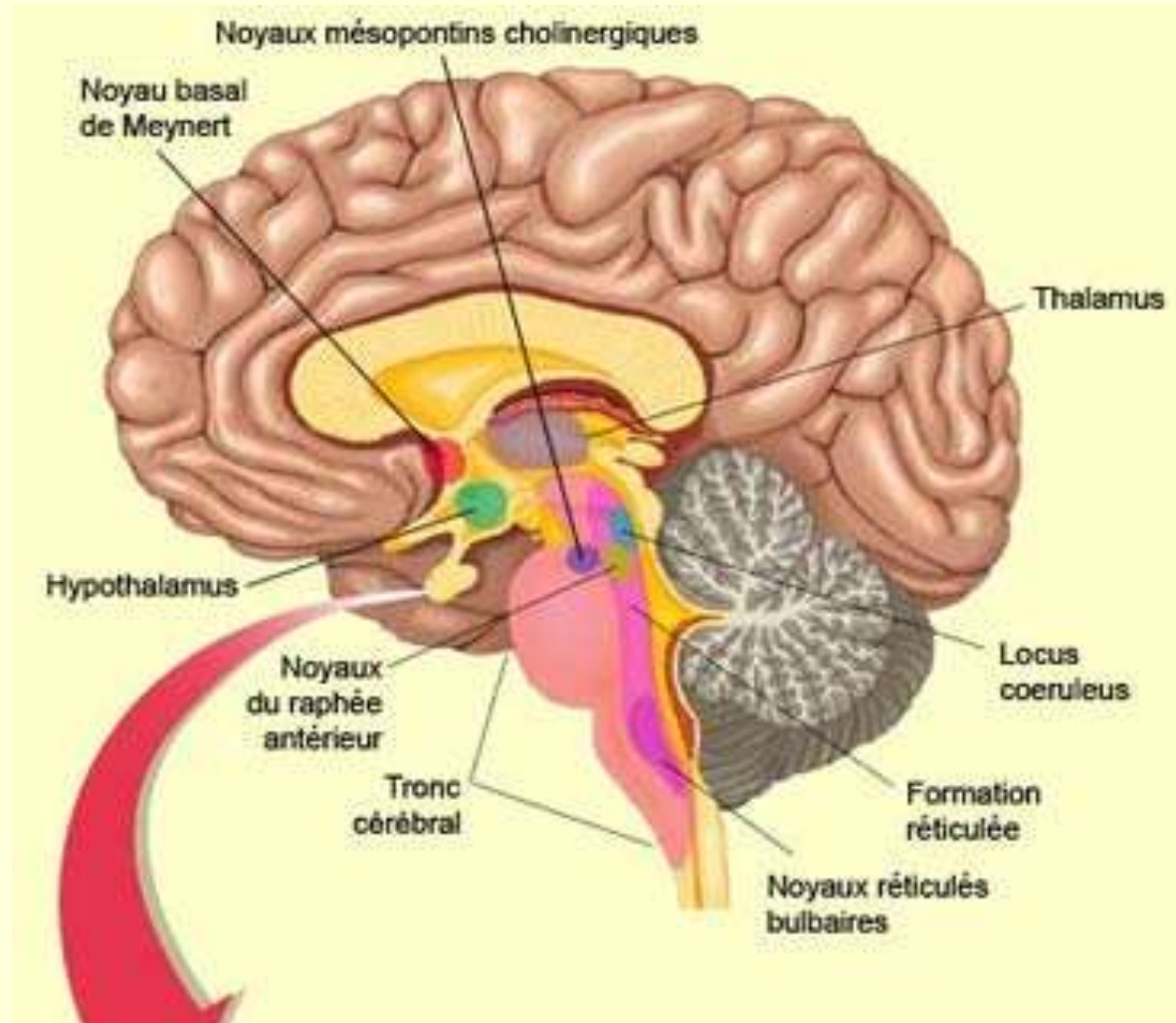
La forte activité cérébrale durant l'éveil entraîne une forte consommation d'ATP et par conséquent **l'accumulation d'adénosine**.

L'augmentation d'adénosine, en déclenchant le sommeil lent durant lequel le cerveau est moins actif, amène donc celui-ci dans une phase de récupération dont il aurait absolument besoin.

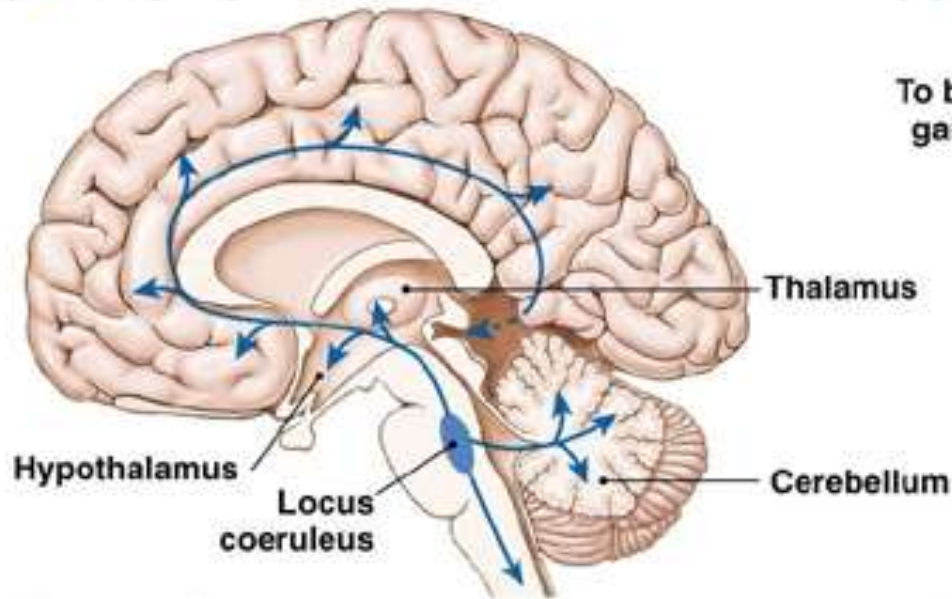
Les régulations complexes entre éveil et sommeil

Neuromodulateurs de l'éveil

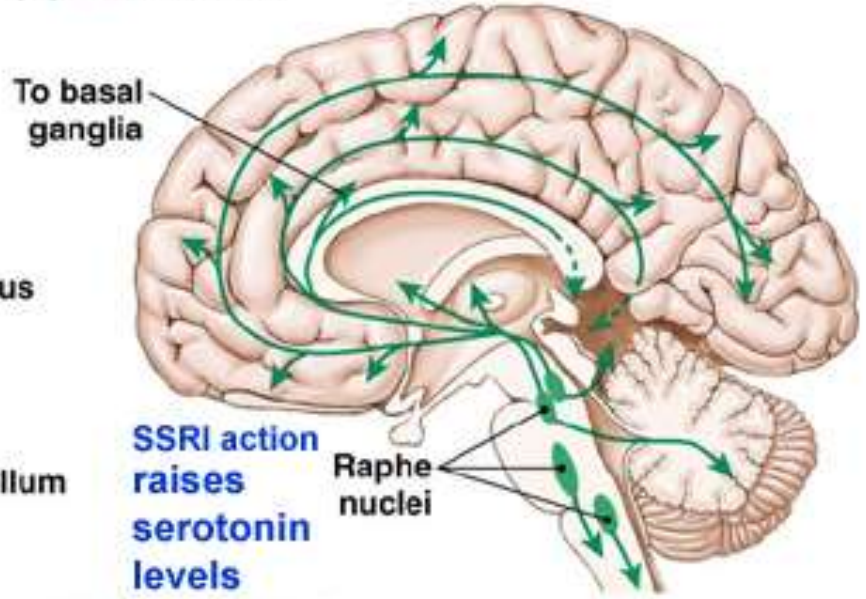
Être éveillé n'est pas le fruit du travail d'un « centre de l'éveil » dans le cerveau mais bien le résultat de l'activation d'un réseau complexe et redondant d'une **dizaine de groupes de neurones** répartis de l'hypothalamus au bulbe rachidien.



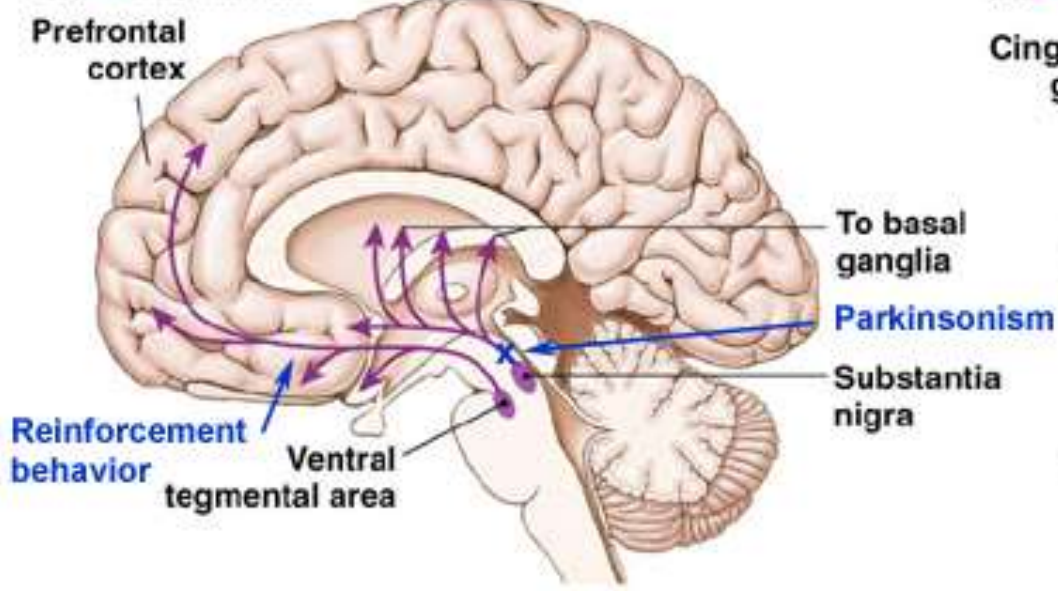
(a) ● Norepinephrine



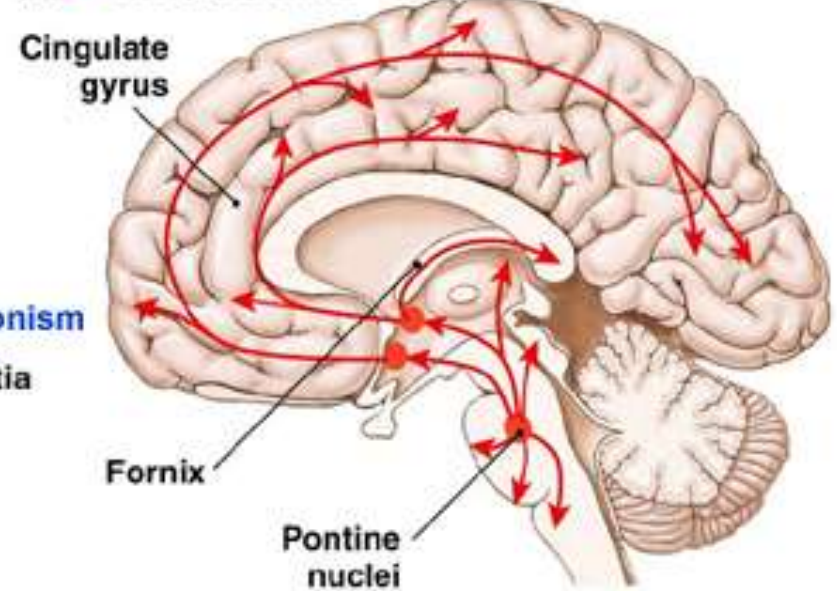
(b) ● Serotonin



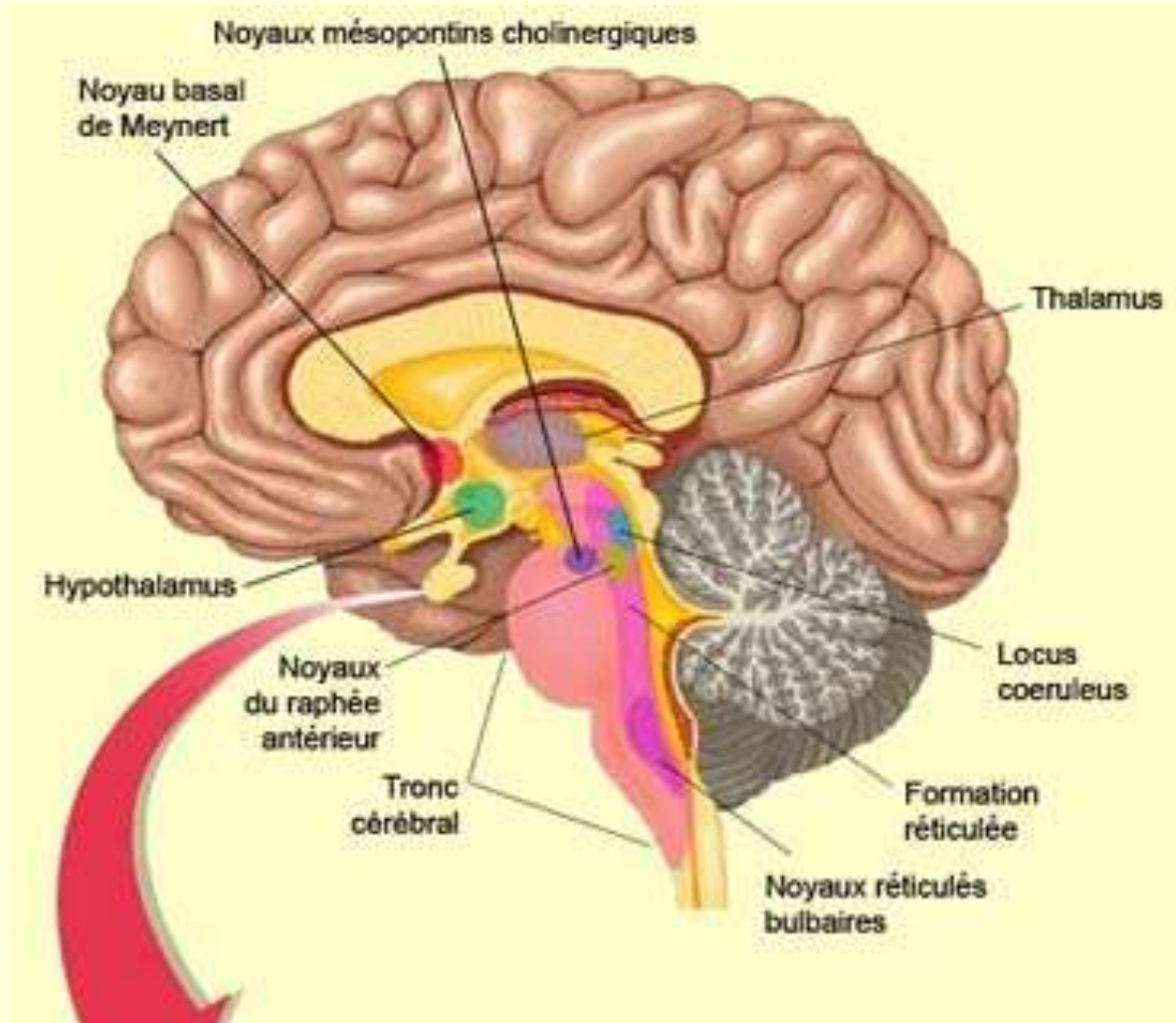
(c) ● Dopamine



(d) ● Acetylcholine



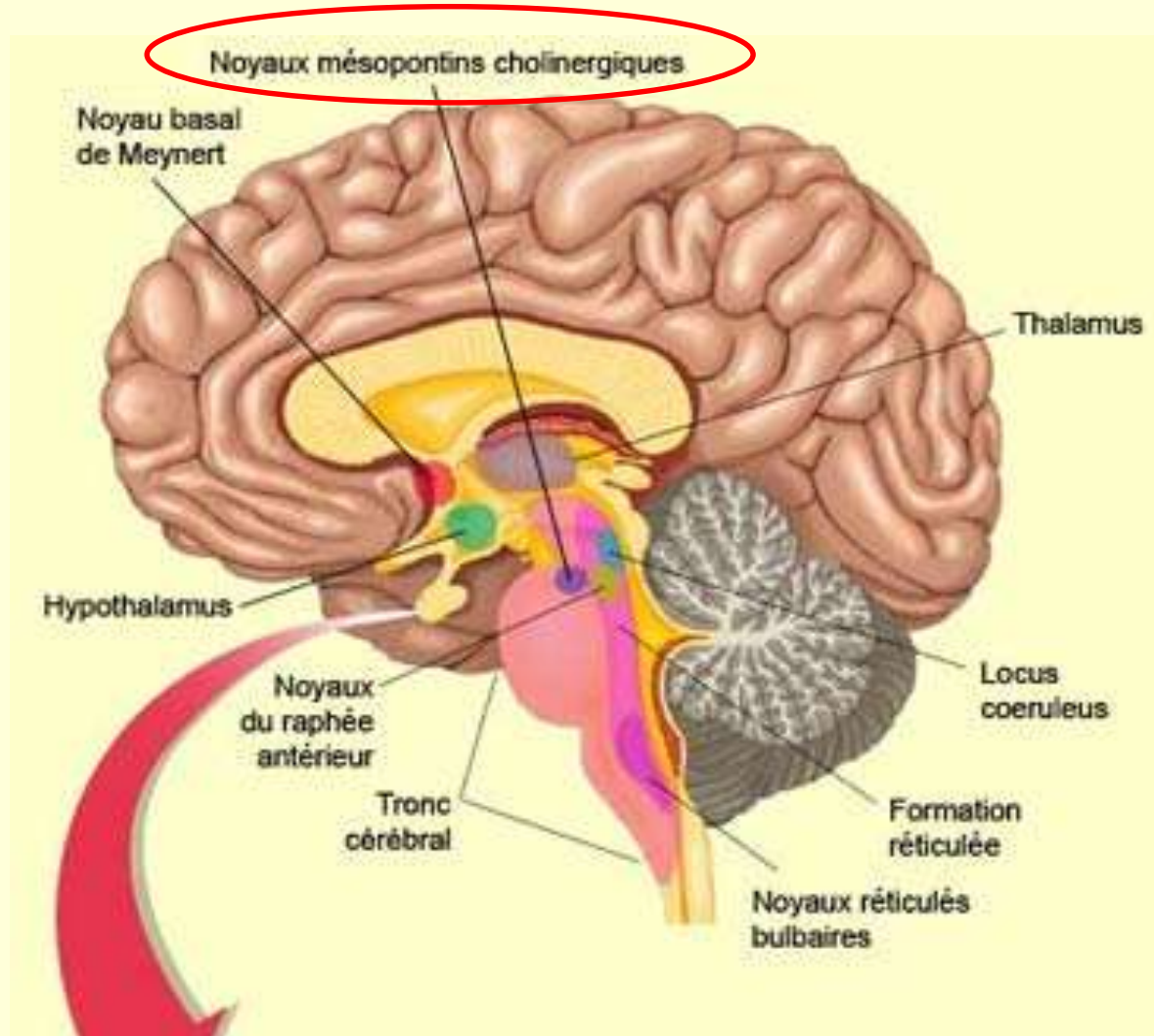
Ces neurones communiquent entre eux grâce à différents neurotransmetteurs mais ont tous en commun de **diminuer ou d'arrêter leur activité pendant le sommeil.**



Les noyaux mésopontins cholinergiques, qui se projettent sur le thalamus.

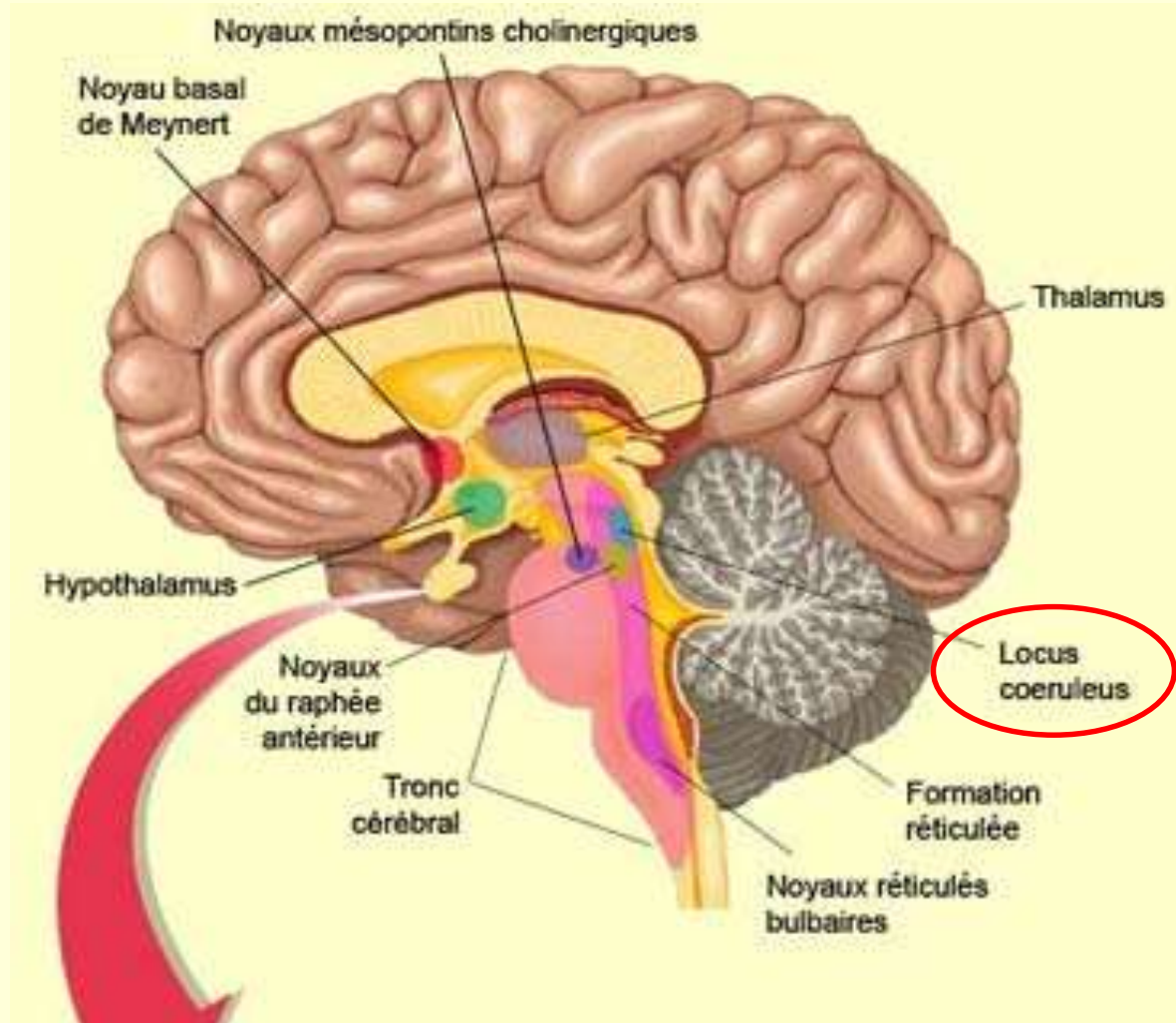
L'acétylcholine produite par ces noyaux exerce une double action : elle diminue l'activité du noyau réticulaire thalamique appartenant au système du sommeil ; et elle active les neurones thalamocorticaux impliqués dans l'éveil.

(sont aussi actifs pendant le sommeil paradoxal)

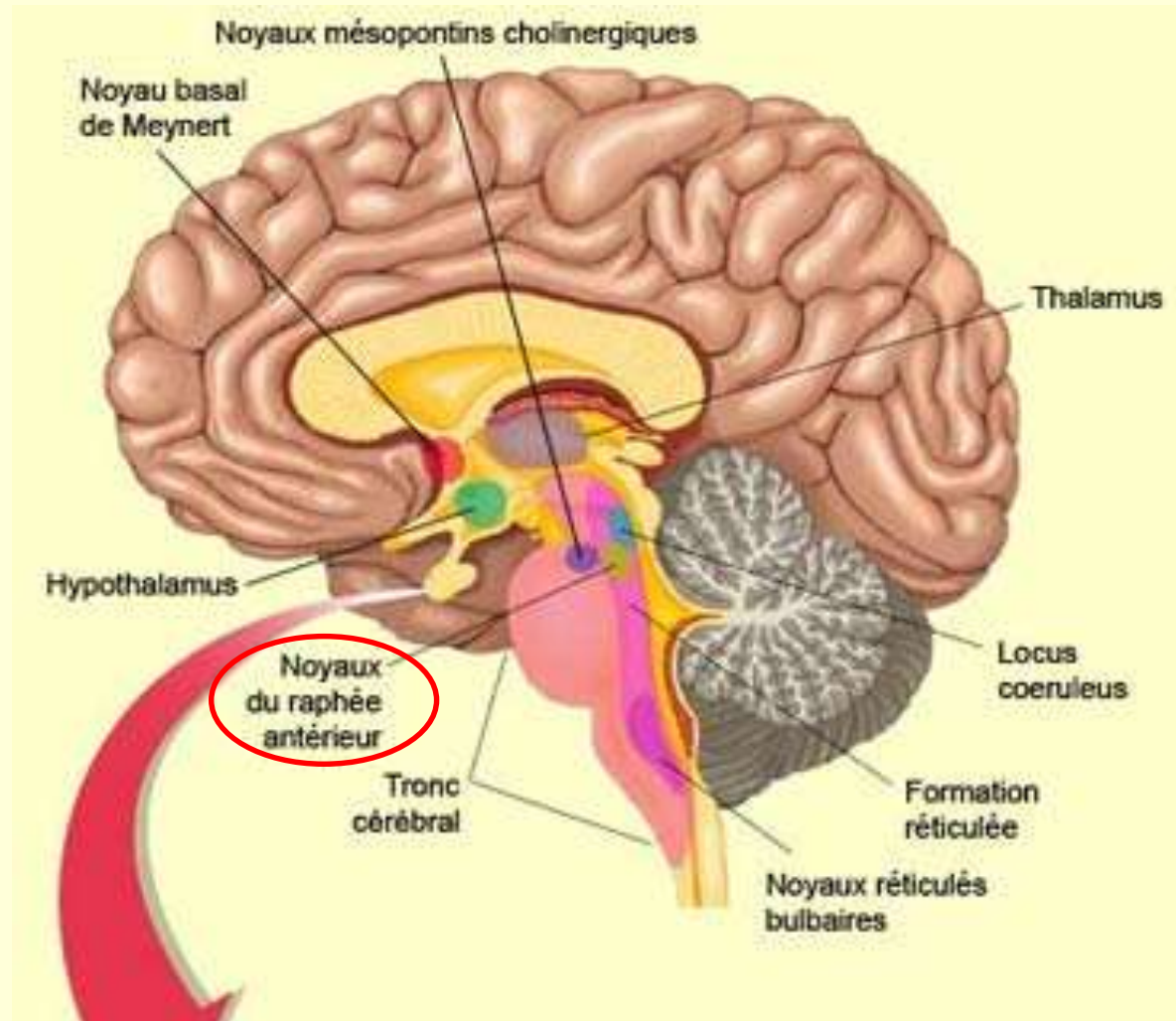


Les noyaux du locus coeruleus, situés dans la partie dorsale du pont, et dont les projections noradrénergiques influencent des structures cérébrales comme le thalamus, l'hippocampe et le cortex.

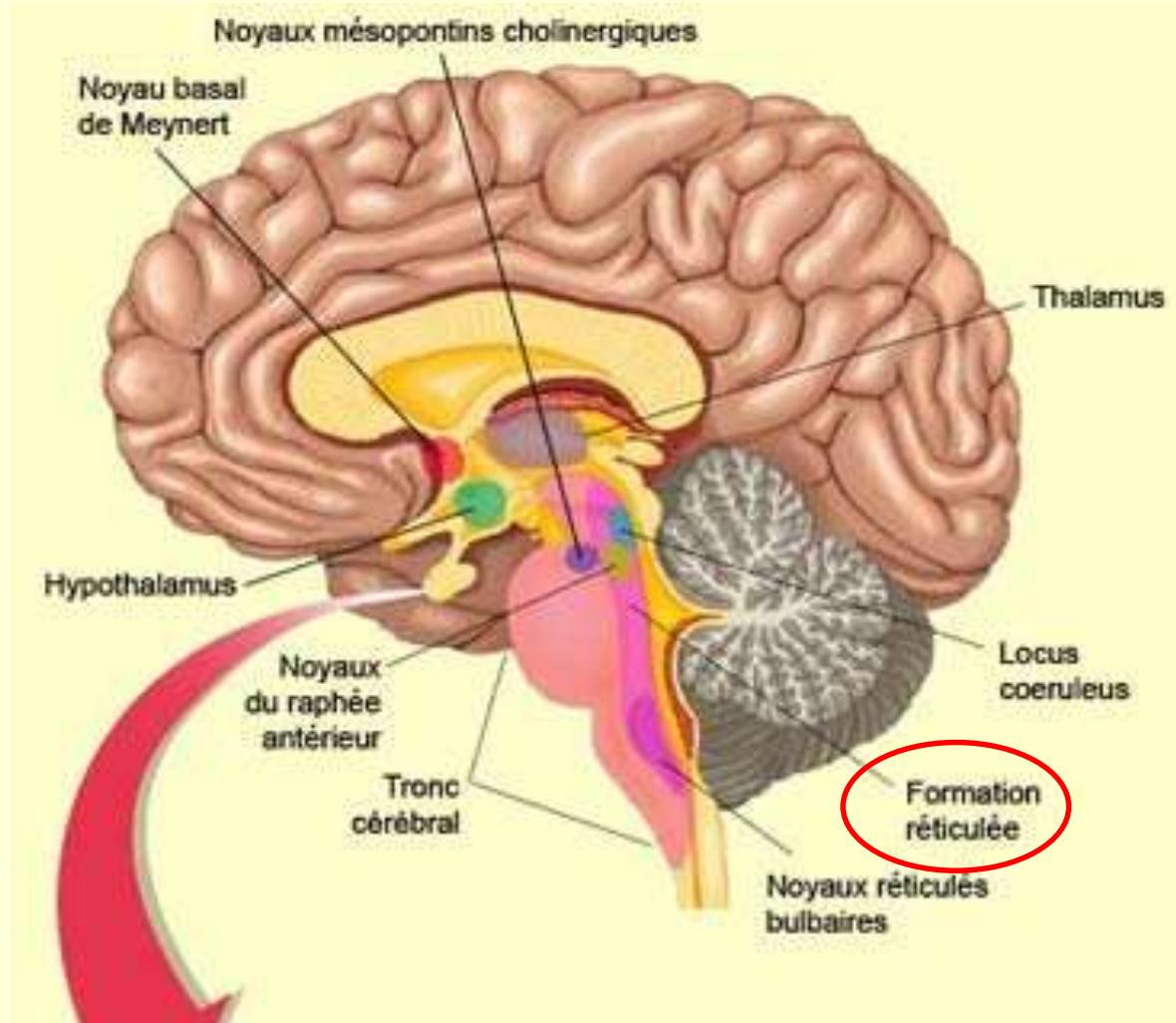
L'activité du locus coeruleus est maximale chez le sujet éveillé et actif, réduite durant un éveil calme, encore plus réduite en sommeil lent, et complètement abolie en sommeil paradoxal.



Les noyaux sérotoninergiques du raphé antérieur (ou supérieur), qui projettent de la sérotonine vers l'hypothalamus et le cortex. Actifs pendant l'éveil, l'effet global des noyaux du raphé antérieur est éveillant.

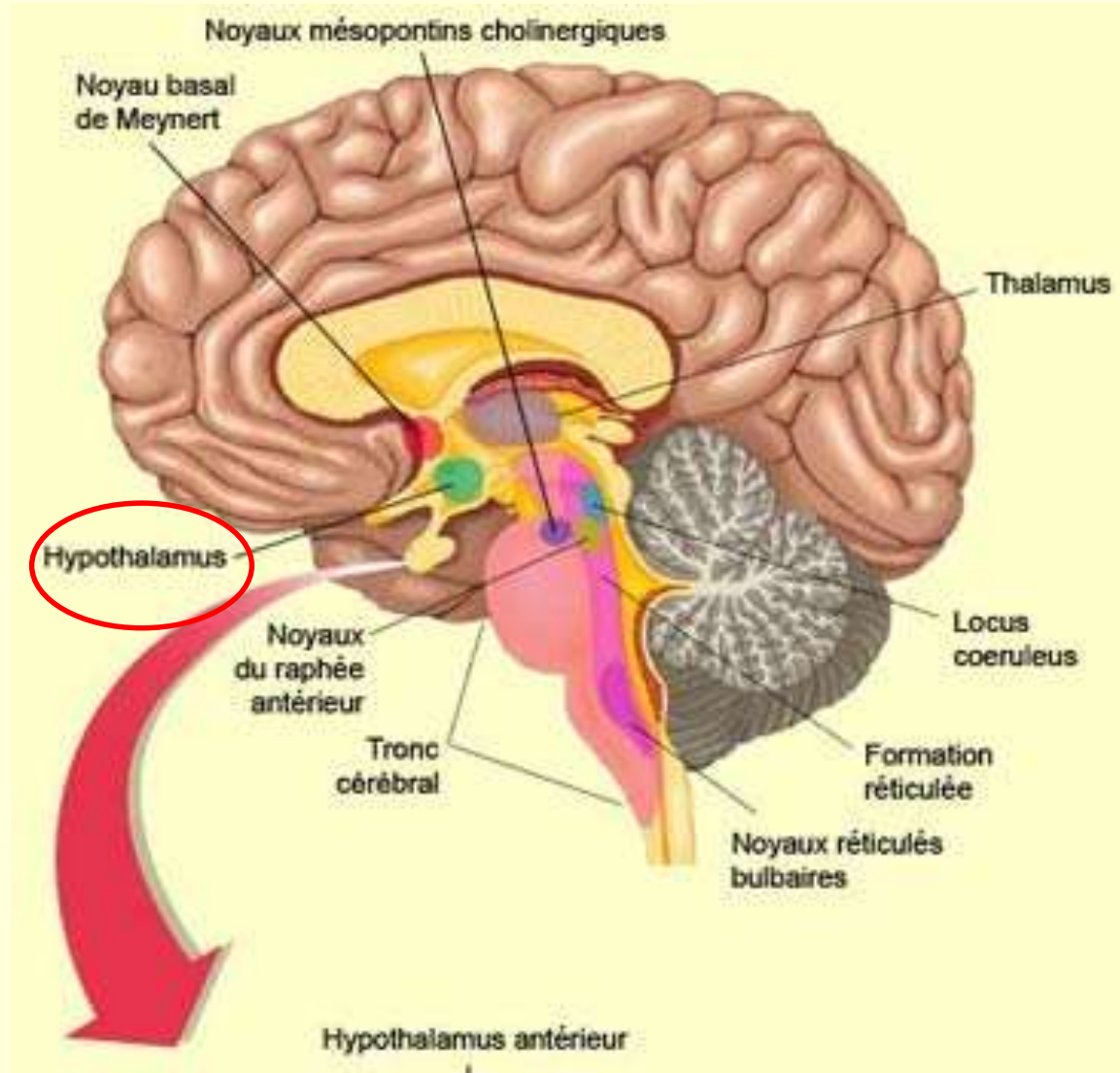


La formation réticulée mésencéphalique, qui se projette massivement sur les noyaux thalamiques, qui vont ensuite influencer tout le cortex. Son rôle est un de désynchronisateur du cortex au sens large, favorisant l'éveil mais aussi le sommeil paradoxal.



Dans l'hypothalamus postérieur, certains neurones à **histamine** sont actifs dès le réveil, mais sont complètement silencieux durant le sommeil paradoxal.

Ces neurones envoient leurs projections sur l'ensemble du cerveau et notamment sur les autres neurones de l'éveil qu'ils contribuent à activer.

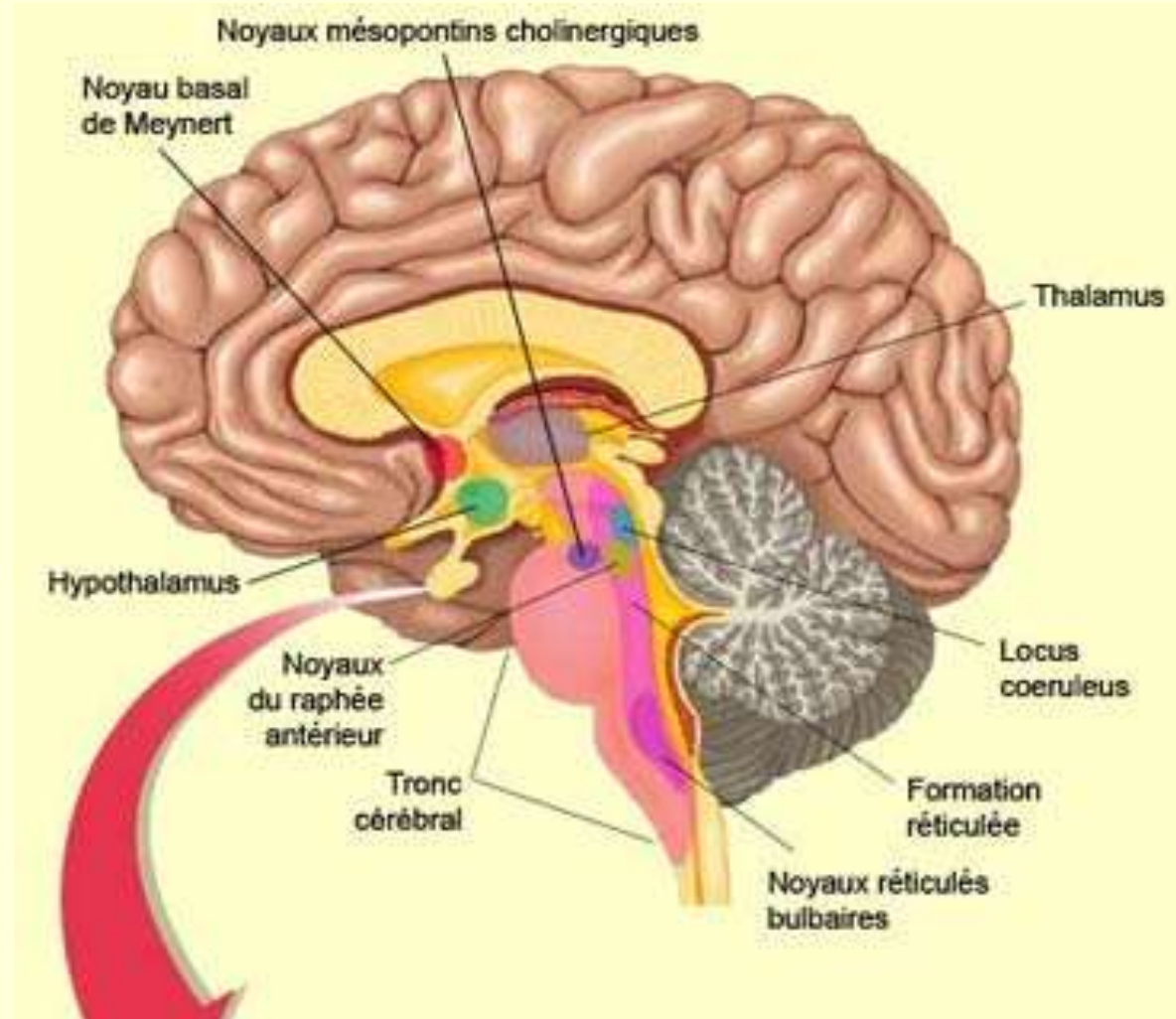


L'ensemble de ces structures du tronc cérébral reçoit des **collatérales des afférences sensorielles et végétatives** qui participent ainsi au maintien de leur activité.

Cette organisation redondante explique aussi pourquoi l'inactivation d'un seul système est suivie, après quelques jours, d'une **récupération complète de l'éveil**.

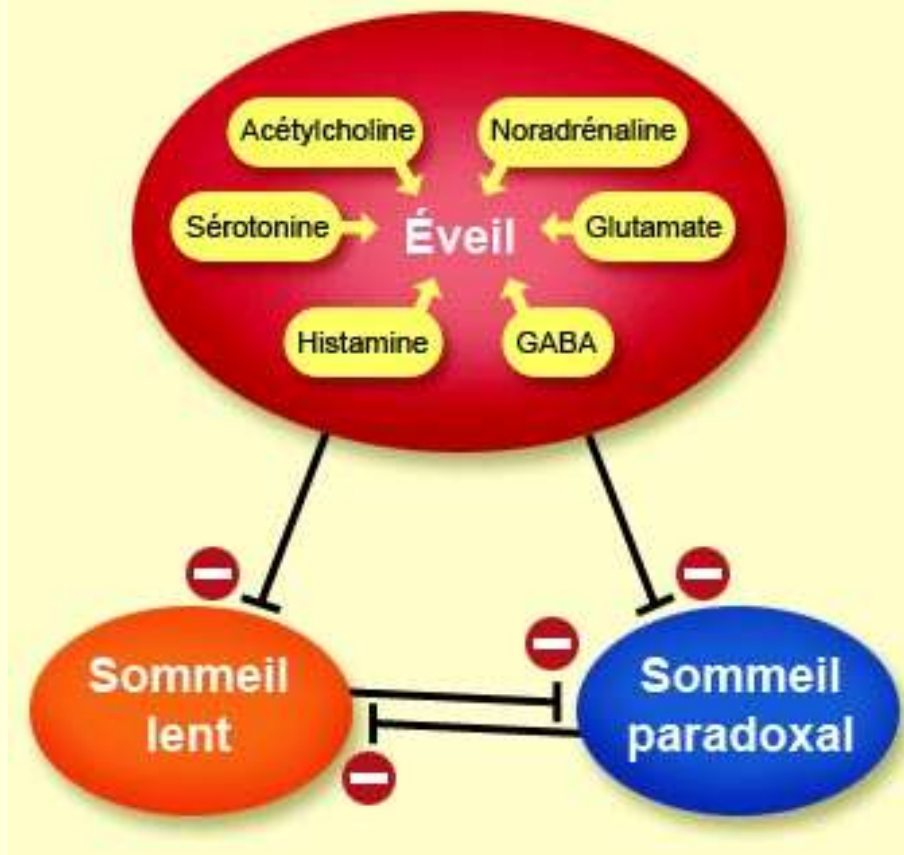
Aucune des structures décrites, prise isolément, n'est donc indispensable à l'activation corticale.

Il n'existe pas un interrupteur «on-off» **unique** de l'éveil ni du sommeil.



Les populations neuronales associées à l'éveil, au sommeil lent et au sommeil paradoxal fonctionnent donc un peu comme différents **interrupteurs** :

l'une d'entre elle entre en activité quand l'activité cesse dans l'autre, et vice versa.



Mais d'autre part, un deuxième mécanisme parallèle favorise l'éveil : **l'inhibition du sommeil**.

Et les deux types de sommeil, **lent** et **paradoxal**, semblent faire l'objet d'une inhibition séparée par des circuits de l'éveil distincts.

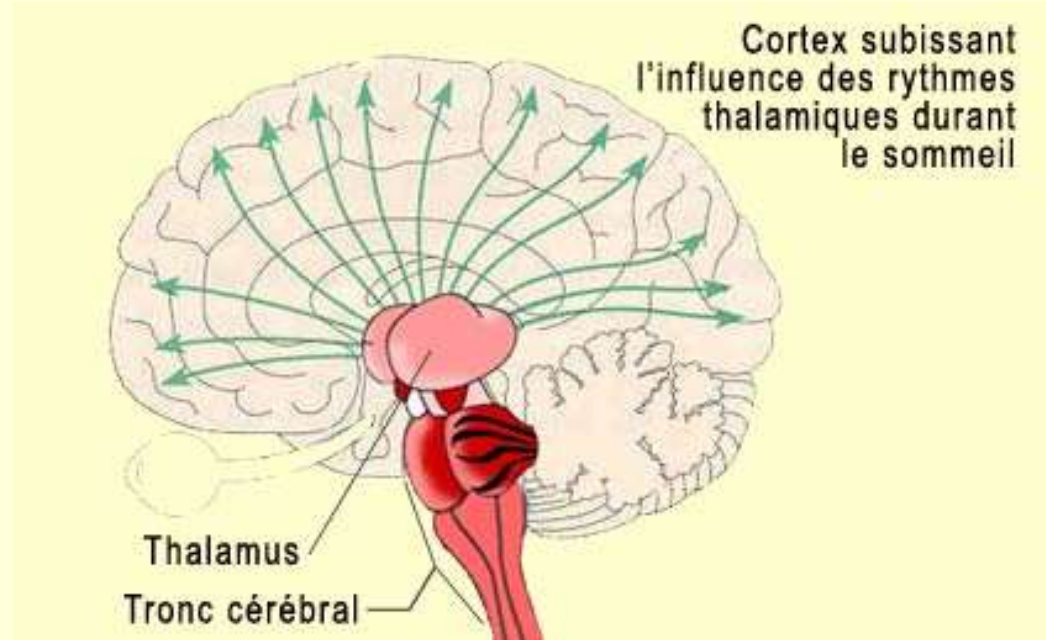
Les régulations complexes entre éveil et sommeil

Neuromodulateurs du **sommeil**

→ Le cerveau doit mener une véritable lutte contre lui-même en désactivant le puissant système de vigilance-éveil.

Car c'est l'ensemble de ces signaux d'éveil qui vont cesser de parvenir au cortex avec l'avènement du sommeil lent.

Ils seront interrompus au niveau du thalamus, véritable voie d'accès au cortex qui est grandement influencée par les systèmes neuromodulateurs diffus du tronc cérébral.

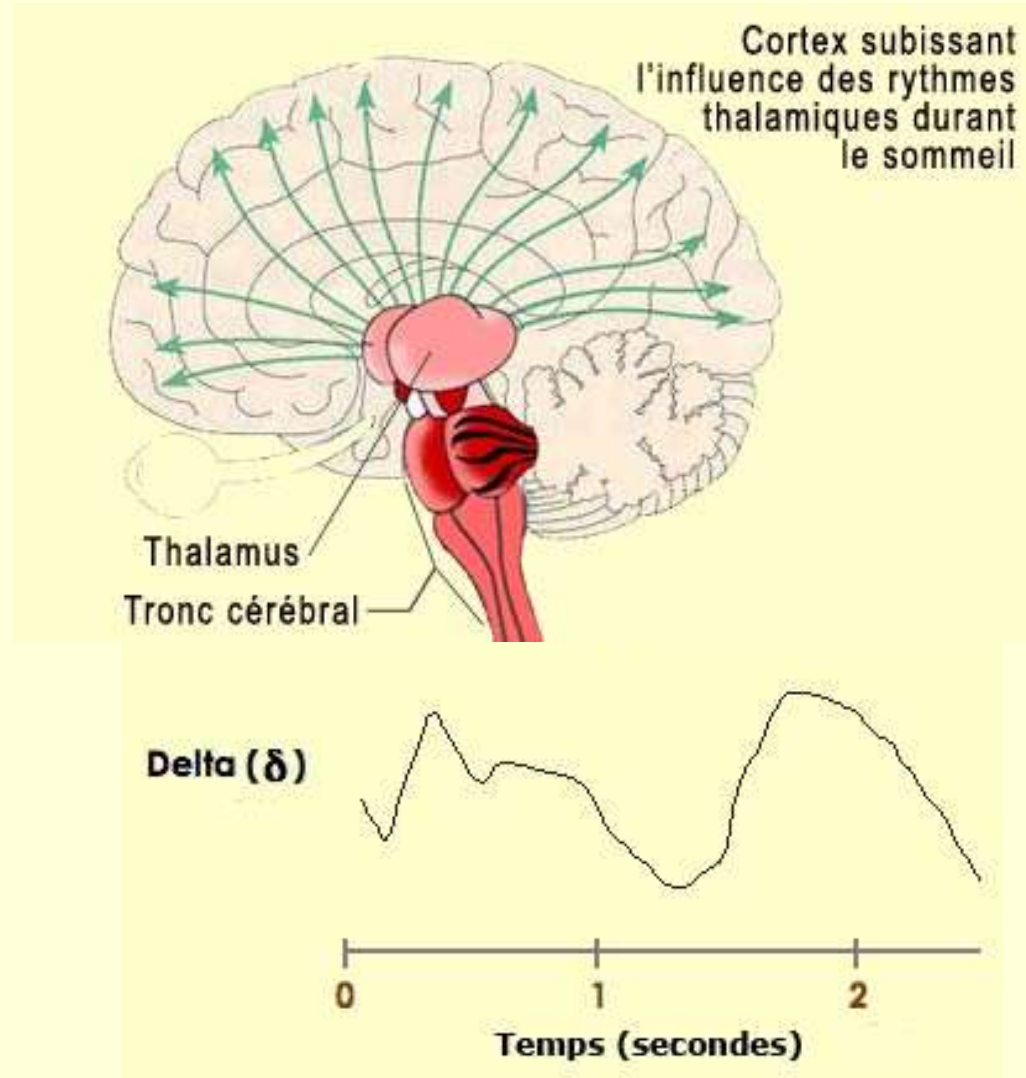


Plus précisément, c'est l'activité rythmique qui se met alors en place dans les neurones thalamo-corticaux de la région intra-laminaire du thalamus qui provoque cette déconnexion corticale des signaux internes et externes

tandis que **l'hypothalamus antérieur** inonde progressivement le cerveau de GABA (acide gamma aminobutyrique) jusqu'à la mise au silence complet de tous les systèmes d'éveil.

Le sommeil lent apparaît donc avec la disparition des effets cholinergiques de l'éveil qui libère les neurones « pacemaker » du noyau réticulaire thalamique.

Ceux-ci vont alors entraîner à leur rythme les neurones thalamo-corticaux qui vont à leur tour induire leurs « ondes lentes » dans tout le cortex.

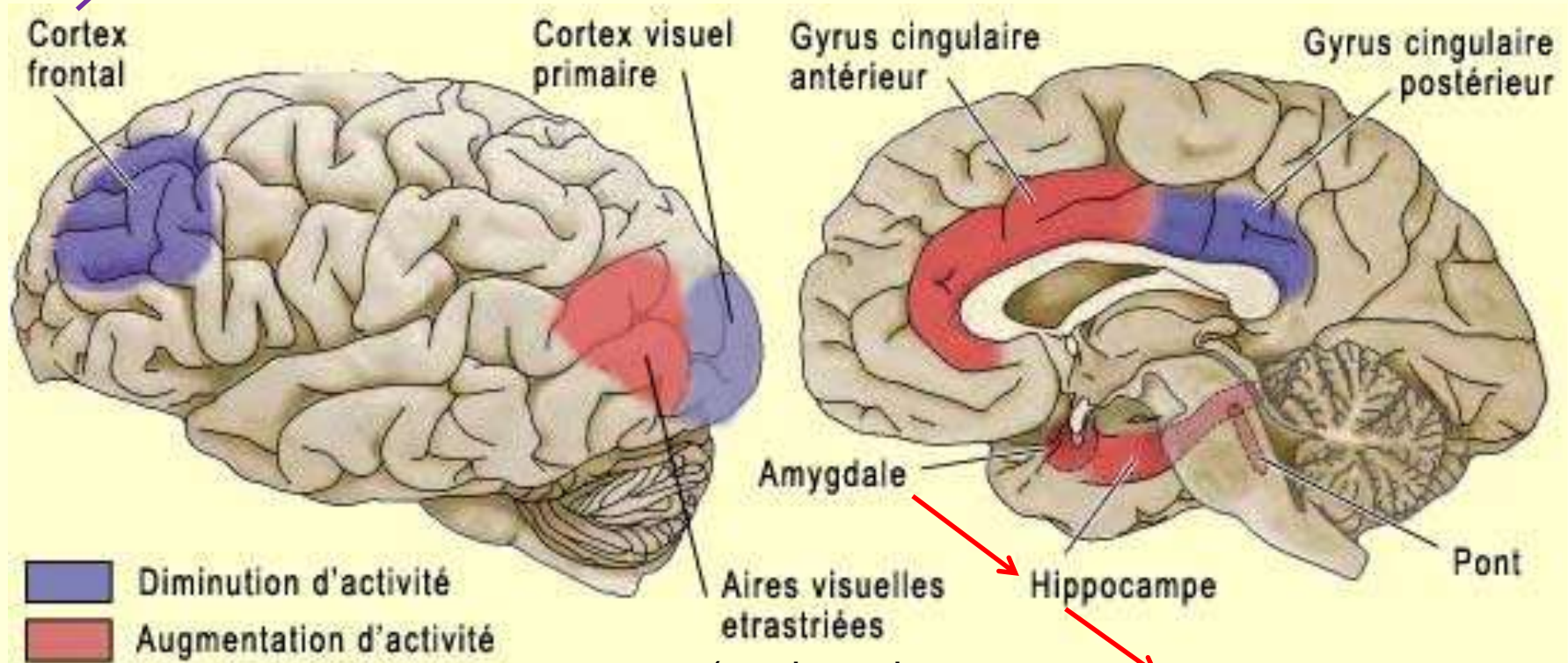


Les régulations complexes entre éveil et sommeil

La nuit avance et l'on se met à **rêver**...

Variation d'activité cérébrale typique durant le REM (versus l'éveil)

impliqué dans la pensée consciente et le jugement, sa faible activité pourrait rendre compte des rêves bizarre, illogiques



(analyse de scènes visuelles complexes durant le sommeil paradoxal)

« émotions »

Pourquoi on rêve ?

L'une des hypothèses part du constat qu'à la naissance, l'enfant consacre huit heures par jour au sommeil paradoxal et un peu plus encore durant sa vie intra-utérine.

Et aussi sur le fait que chez le jeune nourrisson, la paralysie musculaire étant imparfaite durant son sommeil paradoxal, celui-ci émet volontiers des mimiques correspondant aux expressions faciales de base comme la peur, le dégoût ou l'étonnement, alors qu'il est encore incapable d'offrir un simple sourire à sa mère durant l'éveil !

Or, ces expressions faciales, on le sait, relèvent d'une programmation génétique destinée à assurer, au sein de l'espèce, une communication élémentaire. Certains pensent donc que l'expression de notre patrimoine génétique dans le système nerveux du nourrisson aurait besoin des stimulations endogènes intenses qui surviennent durant les rêves pour compléter le câblage de nos circuits cérébraux.

D'où cette **hypothèse développementale sur les rêves.**

Comment ça explique qu'on continue à rêver une fois adulte ?

D'où l'« **hypothèse de la préservation de la personnalité** » proposée par des gens comme Michel Jouvet au début des années 1990.

Elle suggère que chez l'humain adulte, **le sommeil paradoxal contribuerait à préserver la personnalité de l'individu ou à la modifier** en fonction de l'expérience vécue. Pour qu'elle soit le plus adaptée possible à son environnement.

Cette approche élargie, où le rêve contribue à la fois à maintenir les bases génétiques de la communication émotionnelle et de la personnalité, cadre bien dans une perspective évolutive.

Tout comme d'ailleurs la **théorie de la simulation de menaces** proposée au début des années 2000 par des gens comme Antti Revonsuo.

L'idée étant qu'en simulant des situations menaçantes comme dans les rêves où on est poursuivi, on peut tester des moyens d'y échapper.

Et ces simulations auraient été avec le temps étendues plus largement, incluant toutes sortes de situations sociales malaisantes qui sont plus fréquentes dans nos vies d'aujourd'hui.

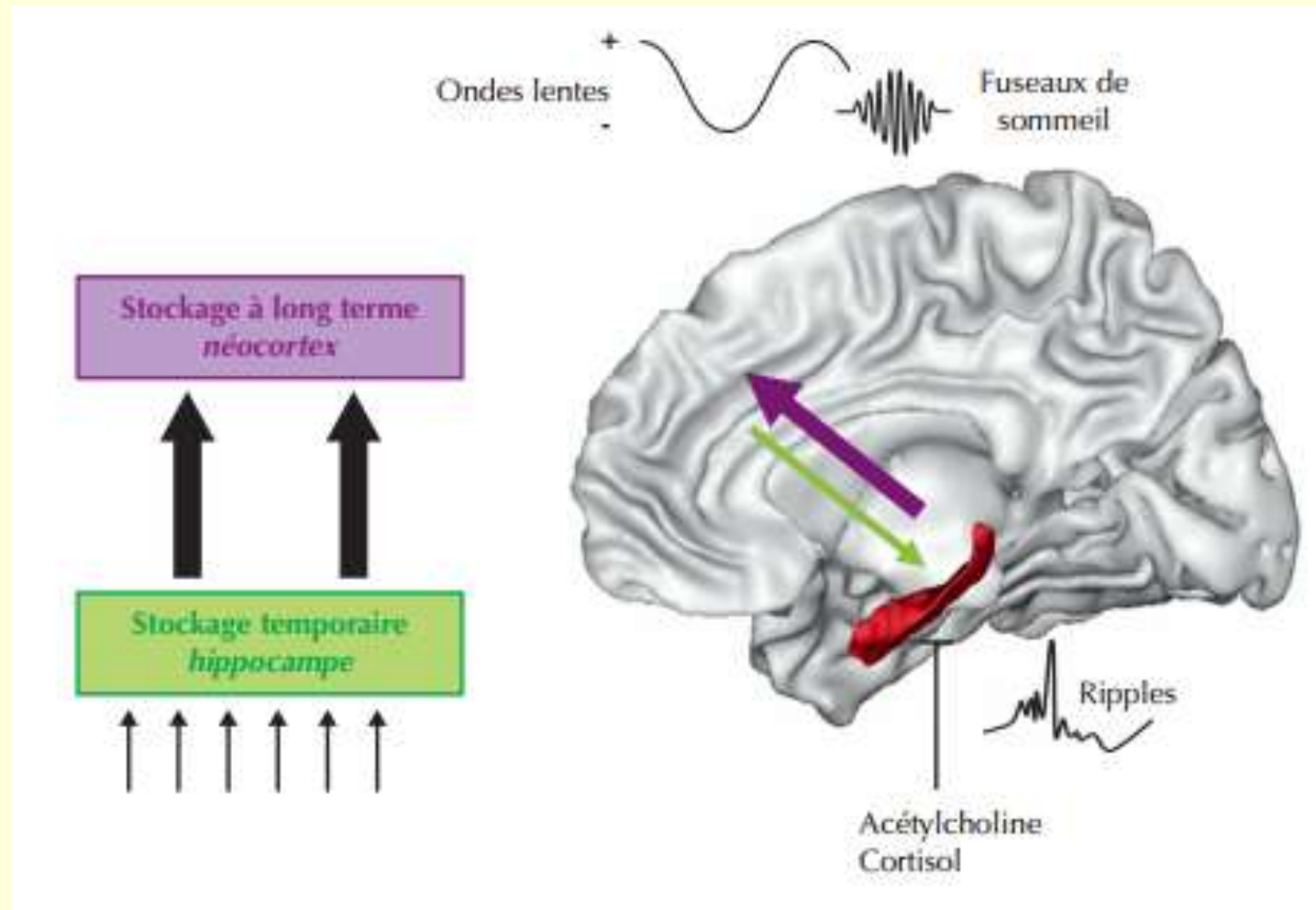
Plus récemment encore, t'as le modèle « NEXTUP » – pour **Network Exploration to Understand Possibilities** – qui vient d'être proposé par Antonio Zadra and Robert Stickgold dans leur livre de 2021 intitulé *When Brains Dream*, et qui élargit encore davantage cette idée de simulation.

Les rêves seraient ainsi une sorte de terrain de jeu où on imaginerait des situations inédites parce que formées par l'association de souvenirs disparates afin de tester nos réactions émotionnelles face à ces situations imaginaires.

Et comme émotion et signification sont intimement liés, comme on va le voir la prochaine fois, les rêves nous permettraient d'évaluer et d'extraire du sens de ces histoires-là, ce qui nous aiderait à adopter dans la vraie vie des comportements plus adaptés à des situations probables parce qu'issues du mélange de souvenirs récents et plus anciens.

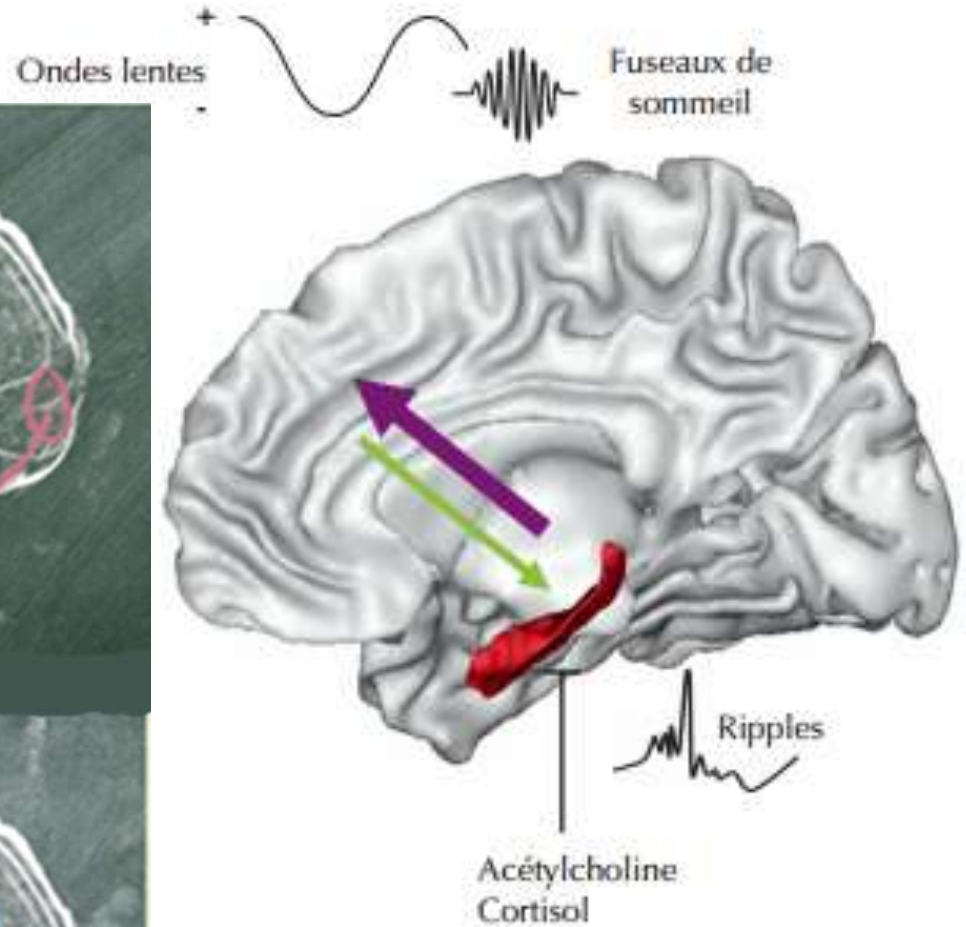
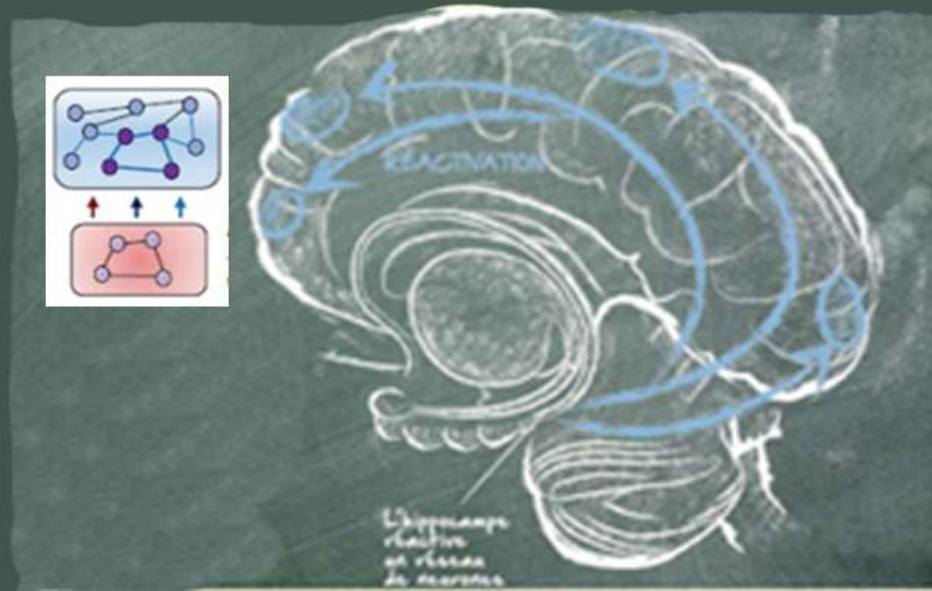
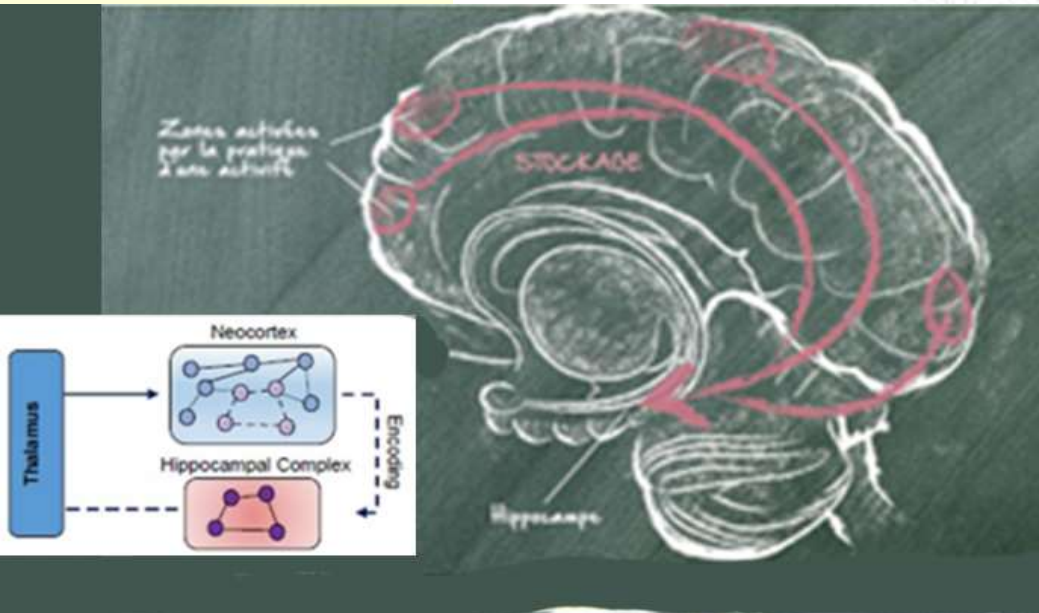
Mais un mélange qui semble se faire surtout au niveau sémantique, par analogies de sens, ce qui donnerait à nos rêves cet aspect métaphorique.

Rôle du sommeil dans la **consolidation** de la mémoire :

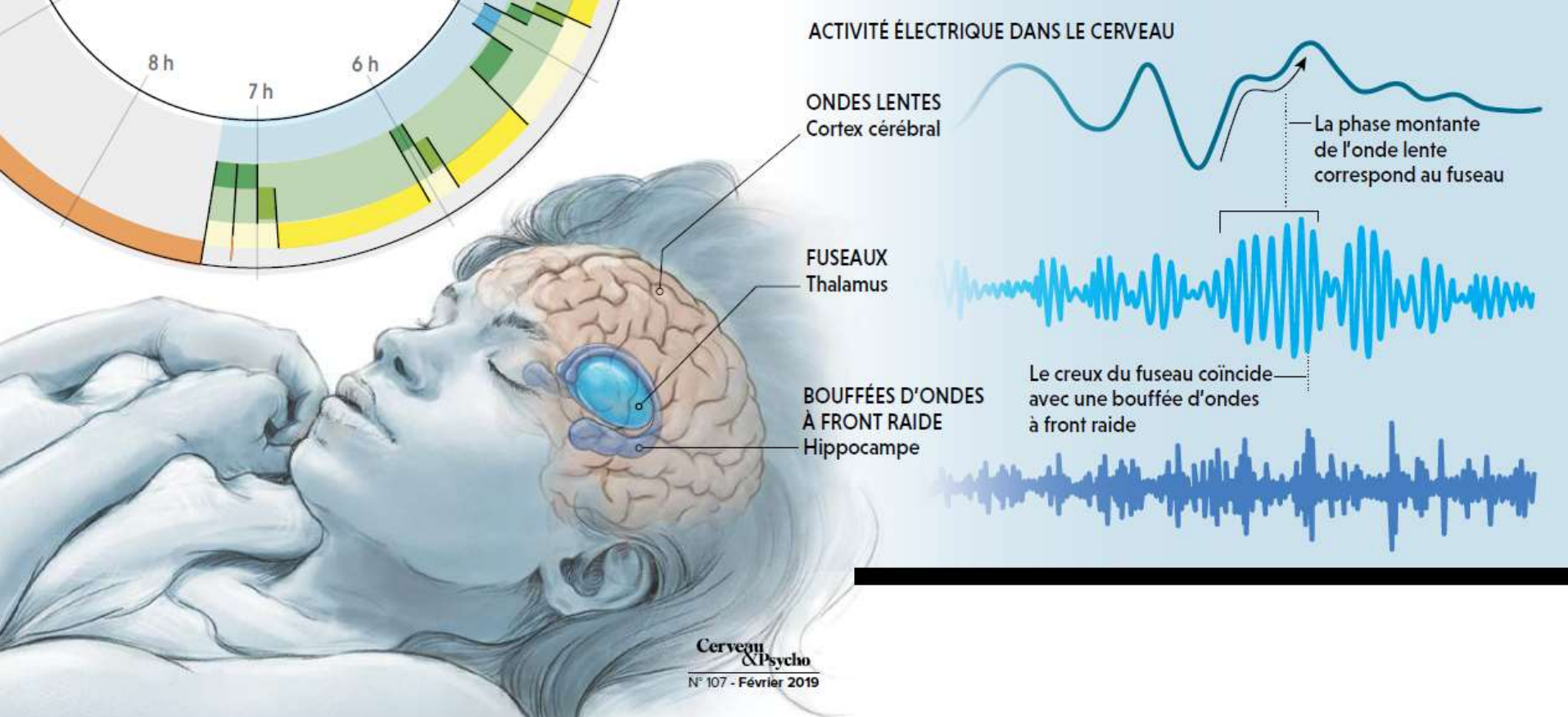


Rôle du sommeil dans la **consolidation** de la mémoire :

Éveil

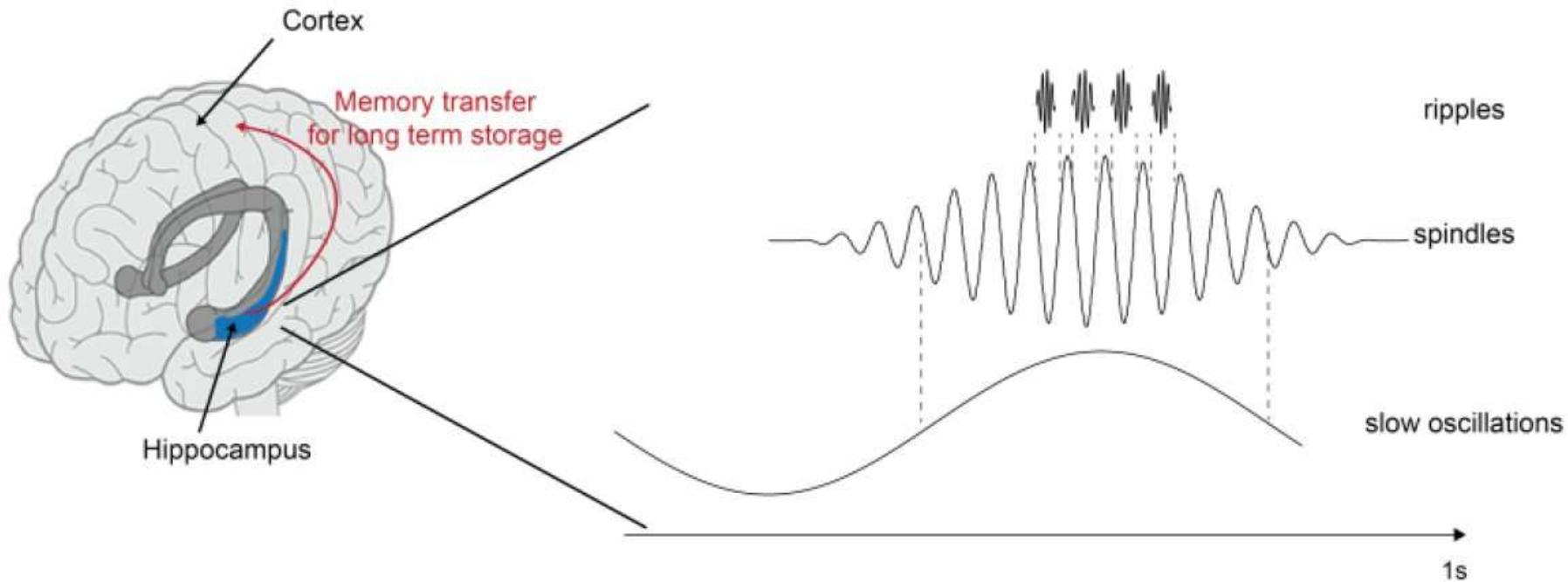


Sommeil



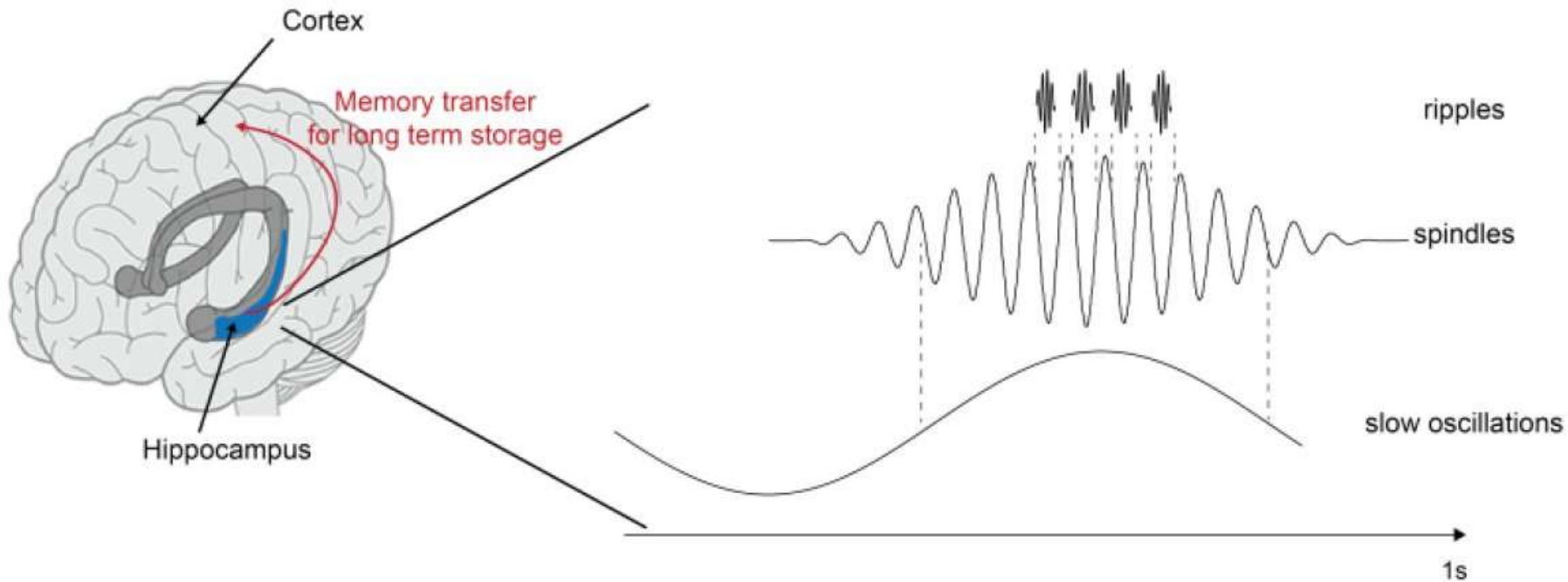
Les rythmes cérébraux fournissent des indices sur la façon dont le sommeil aide à stocker des souvenirs.

Chaque ondes lentes ou ondes delta, comptant de 0,5 à 4 oscillations par seconde, comporte une phase **descendante**, durant laquelle les neurones sont **silencieux**, et une phase **montante**, durant laquelle ils **reprennent leur activité**.



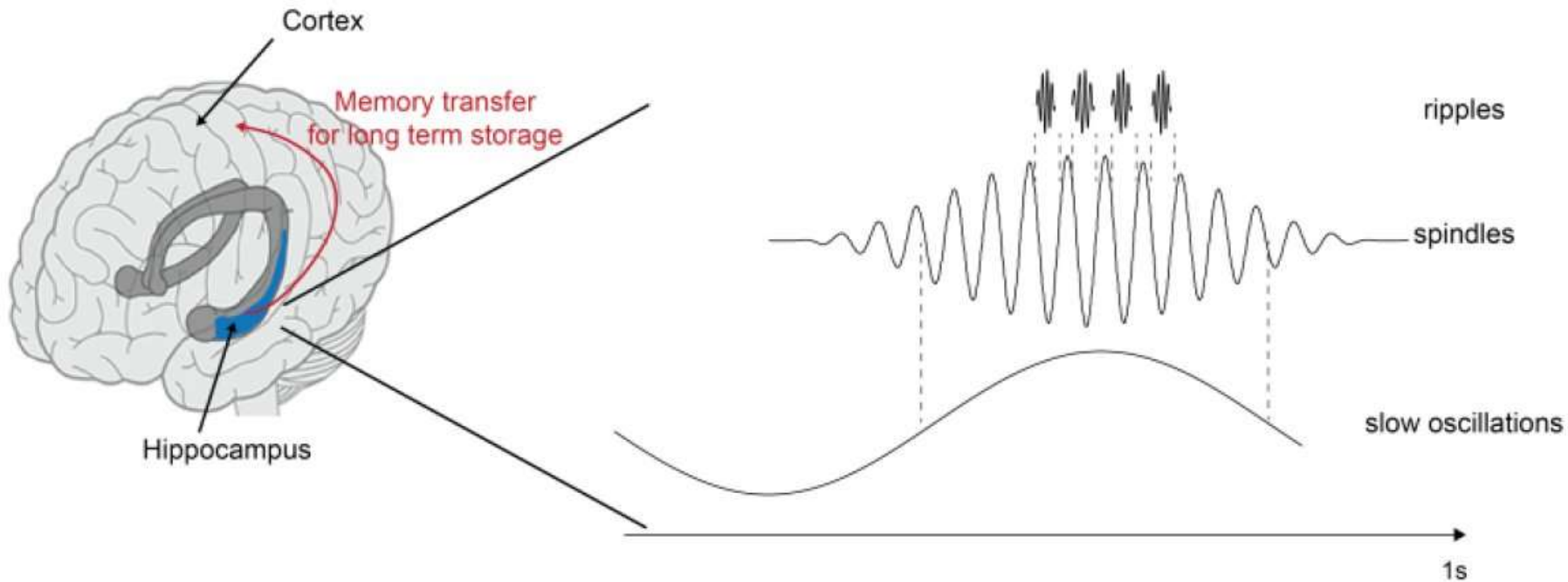
La phase ascendante coïncide souvent avec des « **fuseaux de sommeil** » émis par le thalamus, de brèves accélérations de 12 à 15 oscillations par seconde pendant 0,5 à 2 secondes.

Ils surviennent à leur propre rythme, environ toutes les 5 secondes, et coordonnent l'activité de bouffées d'ondes de haute fréquence (150 à 200 hertz) nommées **ondes à front raide**. Localisées dans l'hippocampe, ces oscillations coïncident avec la réactivation neuronale des souvenirs.



Pendant tout ce temps, les **ondes lentes** continuent de jouer le **rôle de chef d'orchestre** : leurs oscillations mesurées dans le cortex coordonnent le rythme des fuseaux du sommeil et des bouffées d'ondes à front raide.

Un dialogue entre l'hippocampe et le cortex **impliquant tous ces rythmes cérébraux** déclenche le processus dit de consolidation, un processus qui permet aussi de dégager des points communs et d'en extraire l'information essentielle, précieuse pour **anticiper de nouvelles situations**.



“we see that SOs, spindles and ripples are **functionally coupled** in the hippocampus. And we hypothesize that they provide **fine-tuned temporal frames** for the transfer of memory traces to the neocortex.”

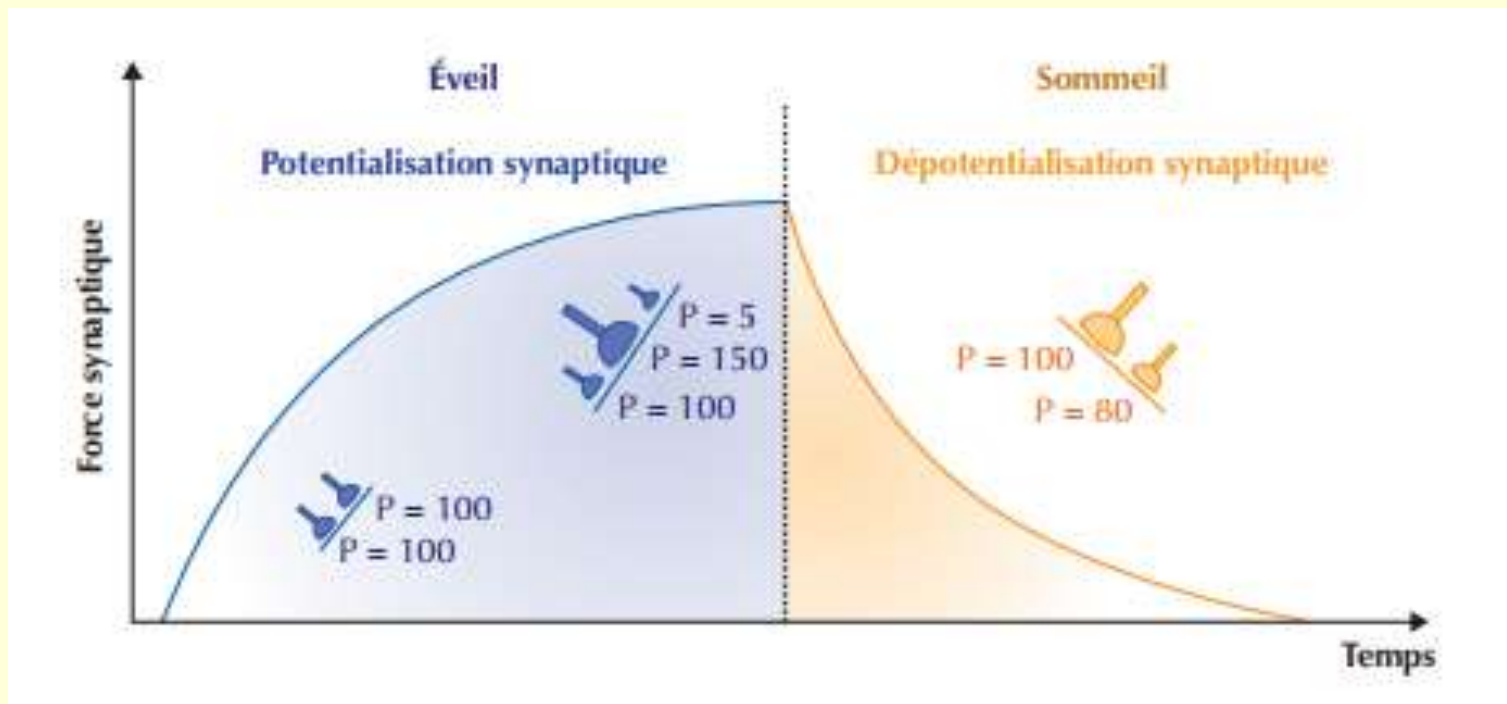
Brain consolidates memory with three-step brainwave

September 21, 2015

<https://www.sciencedaily.com/releases/2015/09/150921133948.htm>

Sommeil et « reset neuronal » [recalibrage synaptique] :

- Diminution de l'ordre de 20% des surfaces de contact synaptiques durant le sommeil;
- Diminution du nombre de récepteur au glutamate dans les synapses excitatrices durant le sommeil



2015 Jan 16.

Sleep, Memory & Brain Rhythms

Brendon O. Watson and György Buzsáki

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4474162/>

“ This theory then postulates that sleep performs a **combination** of **consolidation** and **homeostasis** [**recalibrage synaptique**] that promotes optimal knowledge retention as well as optimal waking brain function.”

« Le sommeil est le prix à payer par notre cerveau pour sa plasticité, sa capacité d'apprendre. »

13 février 2019

Le système glymphatique : les égouts du cerveau

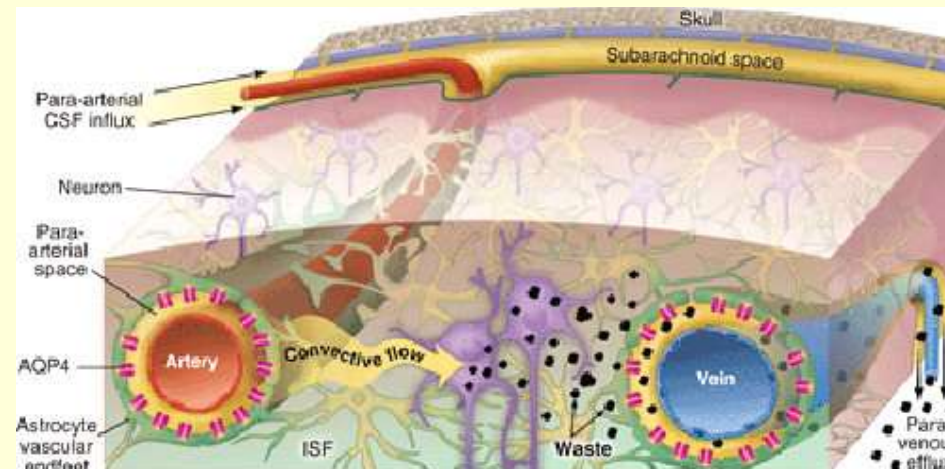
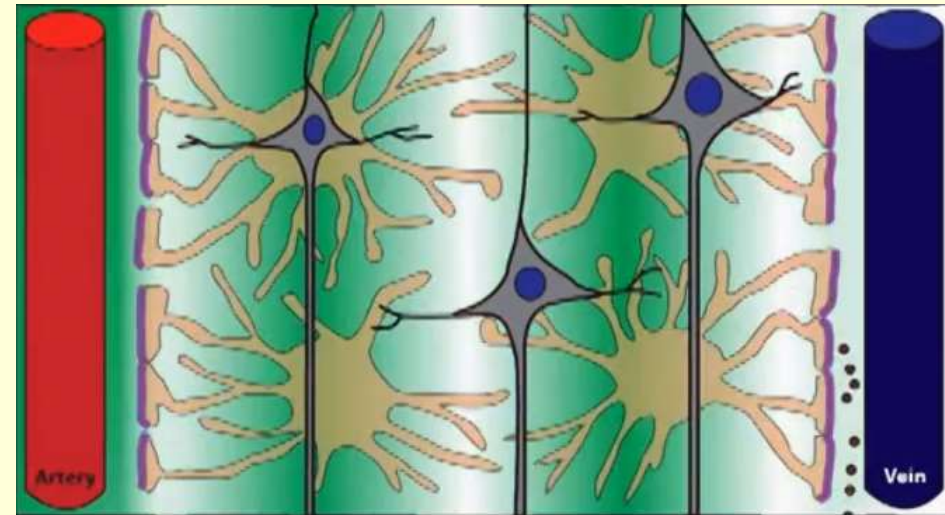
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2019/02/13/7884/>

Durant le **sommeil** l'espace intercellulaire **s'accroît jusqu'à 60 %** permettant une meilleure circulation du fluide.

(les cellules du cerveau se contractent et ouvrent par le fait même un espace le long des vaisseaux par où le liquide céphalo-rachidien va s'écouler)

L'évacuation de la protéine **β -amyloïde** se révèle « **deux fois plus efficace** » chez les souris **endormies** que chez les souris éveillées.

<https://www.lessymboles.com/je-dors-donc-jelimine/>



Deep sleep cleanses the brain

28.2.2019

https://www.helsinki.fi/en/news/health-news/deep-sleep-cleanses-the-brain?utm_source=facebook&utm_medium=social_owned&utm_campaign=news&fbclid=IwAR0uKuQ5xodbcmEOts85vAukNMy-9GB4ilsEB8r3OkCqbqPIShSviuKNN8o

Six different drug combinations were used to anaesthetise mice in the study.

The researchers found that drug combinations containing **dexmedetomidine**, which reduces the noradrenergic signalling of the brain, achieved a state of deep, **slow-wave sleep** closely resembling natural sleep.

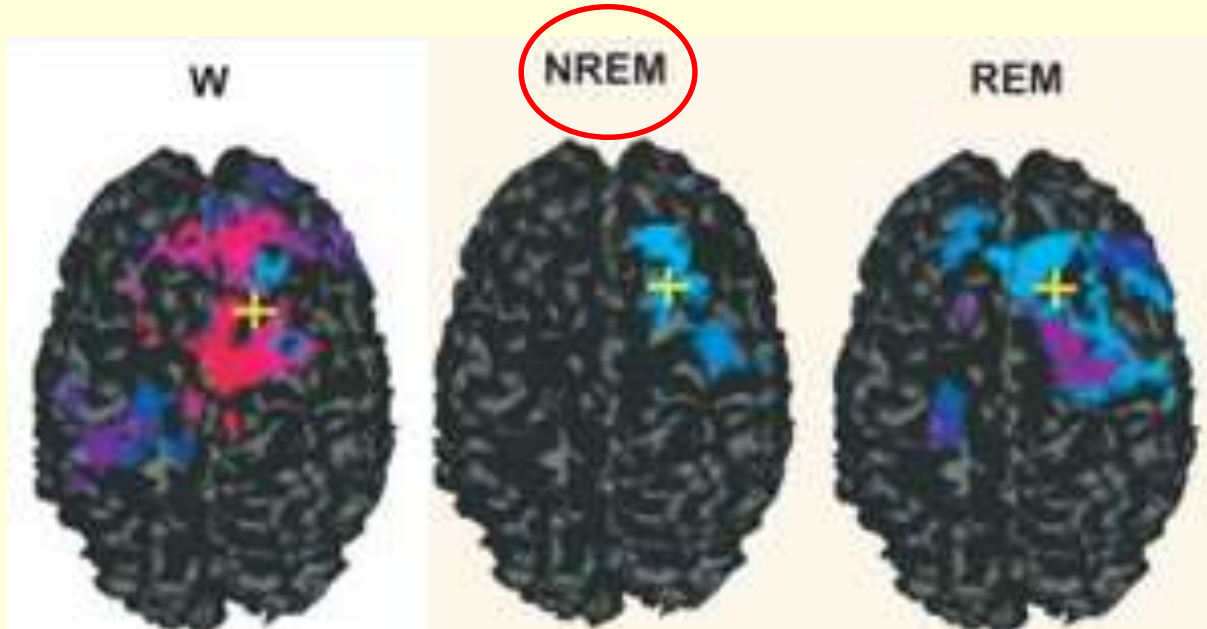
“Dexmedetomidine **improved glymphatic clearance** and is already in clinical use.

Voilà déjà une fonction importante qui justifie de bonnes nuits de sommeil.

Sans compter que d'autres études ont démontré qu'une diminution du sommeil est associé à une augmentation de protéines bêta-amyloïde dans le cerveau.

Sommeil et (perte de) conscience

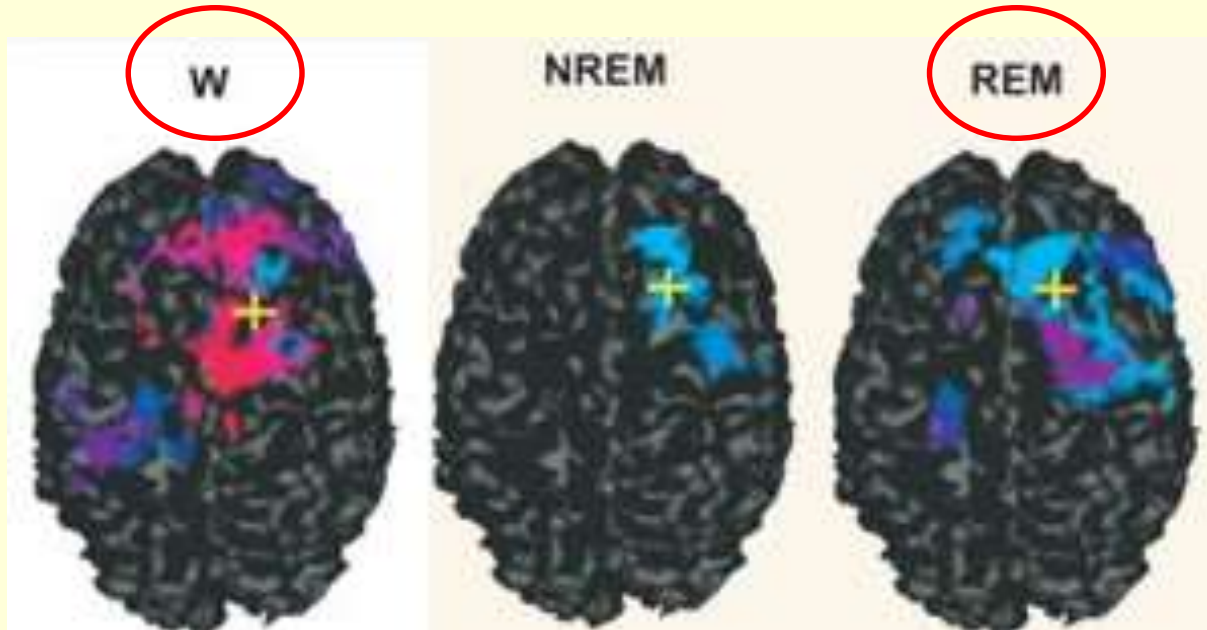
En 2010, Giulio Tononi et son équipe ont publiée dans la revue *Cognitive Neuroscience* une étude où l'on a employé la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) dans trois états suivants :



pendant qu'ils enregistraient l'activité cérébrale évoquée par ce stimulus par électroencéphalogramme (EEG).

L'activité cérébrale en sommeil profond est plus locale et stéréotypée, indiquant possiblement une dégradation du dialogue incessant entre le thalamus et de larges pans du cortex durant l'éveil.

En 2010, Giulio Tononi et son équipe ont publiée dans la revue *Cognitive Neuroscience* une étude où l'on a employé la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) dans trois états suivants :



À l'inverse, **durant le sommeil paradoxal**, période où l'on rêve, donc où l'on a l'impression d'avoir des sensations conscientes et de vivre plein d'aventures, la SMT produisait des **patterns d'activation corticaux plus étendu qui étaient similaire à ceux observés à l'état de veille.**



Cela correspond aussi à ce que Douglass Godwin et son équipe ont observé en analysant la connectivité fonctionnelle du cerveau de leurs sujets lorsqu'ils disaient avoir perçu consciemment une image qui leur était brièvement présentée :

une **réduction soudaine de la modularité fonctionnelle du cerveau** au profit d'une communication neuronale à grande échelle dans l'ensemble des circuits cérébraux.

Benali et ses collègues ont observé, avec une technique d'imagerie cérébrale mesurant la connectivité fonctionnelle entre différentes régions du cerveau, une **fragmentation modulaire de l'activité cérébrale quand on s'endort en sommeil profond** et qu'on perd ce qu'on appelle la conscience.

Et ils font l'hypothèse que **cette réorganisation en de plus en plus de petites unités d'intégration modulaire** qui apparaît avec le sommeil profond empêche le cerveau de faire cette intégration globale qui semble nécessaire à la conscience.