

Plan du cours

~~Cours 1: Évolution cosmique, chimique et biologique (des unicellulaires aux multicellulaires)~~

~~Cours 2: Un neurone, deux neurones, quelques neurones (la grammaire de base du cerveau)~~

~~Cours 3: Des milliers et des millions de neurones (des structures cérébrales distinctes)~~

~~Cours 4: Des milliards de neurones (qui forment des réseaux à l'échelle du cerveau entier)~~

Cours 5 : Des réseaux de milliards de neurones qui oscillent et se synchronisent dans le temps

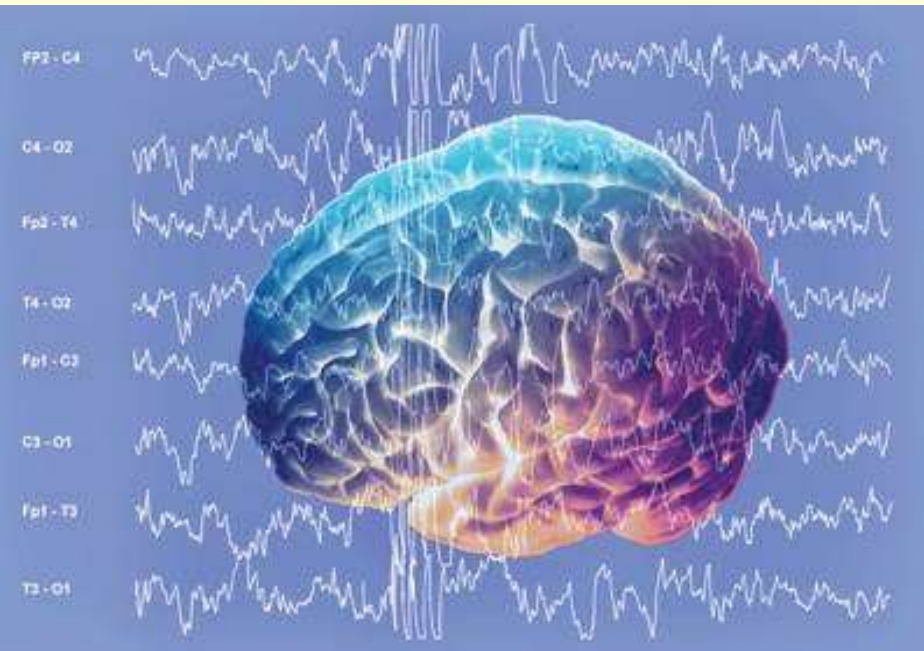
Cours 6 : Tout ce qui précède dans un corps situé dans un environnement

Cours 7 : Tout ce qui précède fait émerger les « fonctions supérieures »

Cours 8 : Tout ce qui précède pour considérer de grandes questions (libre arbitre, éducation, etc.)

Cours 5: 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



Avant de commencer, récapitulons à rebours l'histoire
des **nombreux processus dynamiques**
que l'on a racontée jusqu'ici.

Échelle de temps :

Processus dynamiques :

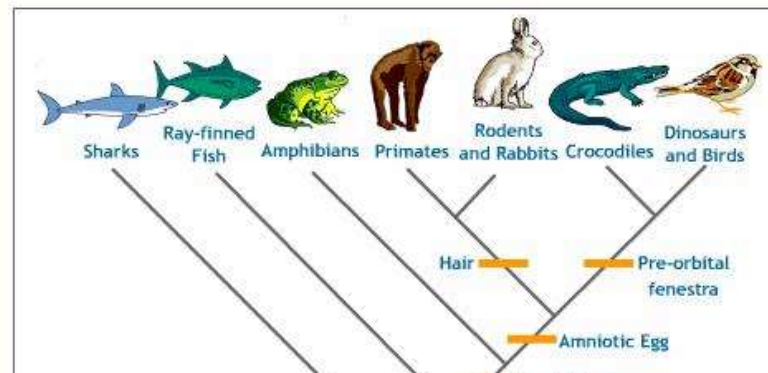
$10^{-3} s$

$10^0 s$

$10^3 s$

$10^6 s$

$10^{15} s$



Évolution biologique qui façonne les plans généraux du système nerveux

Échelle de temps :

Processus dynamiques :

$10^{-3} s$

$10^0 s$

$10^3 s$

$10^6 s$

$10^{15} s$



Survolé à la séance #2

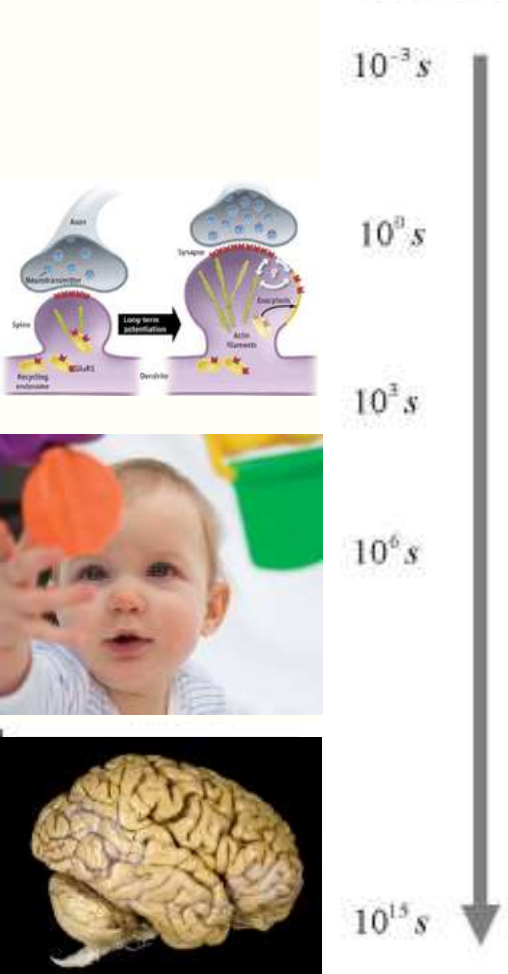


Développement
du système nerveux
(incluant des mécanismes
épigénétiques)

Évolution biologique
qui façonne les plans
généraux du système
nerveux

Échelle de temps :

Processus dynamiques :

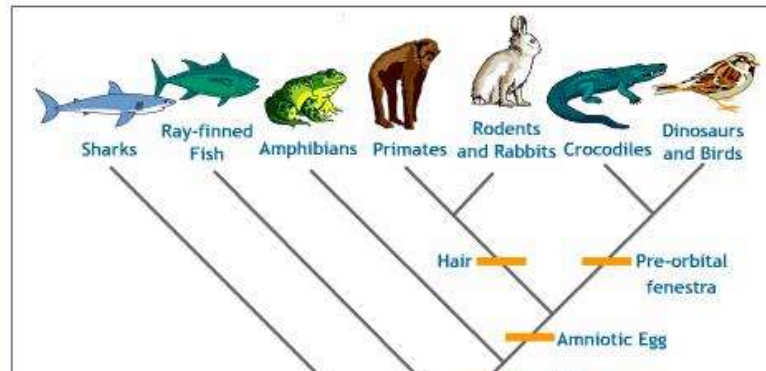


Abordé à la
séance #3

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



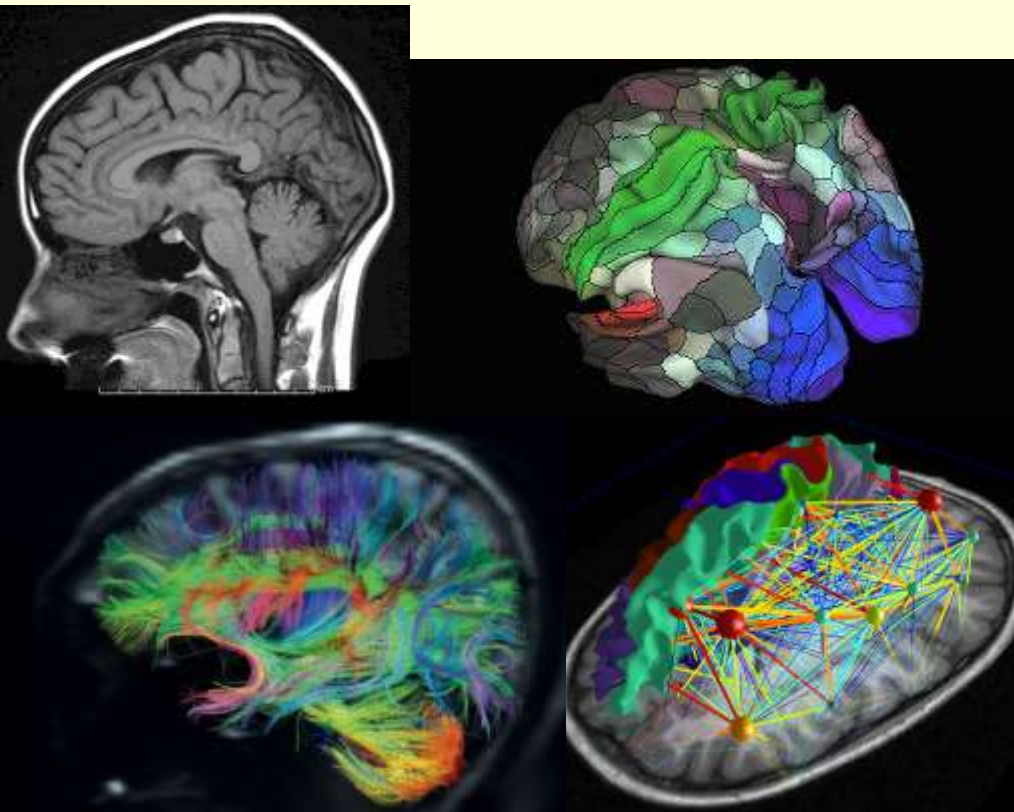
Développement
du système nerveux
(incluant des mécanismes
épigénétiques)



Évolution biologique
qui façonne les plans
généraux du système
nerveux

La semaine dernière à la séance #4...

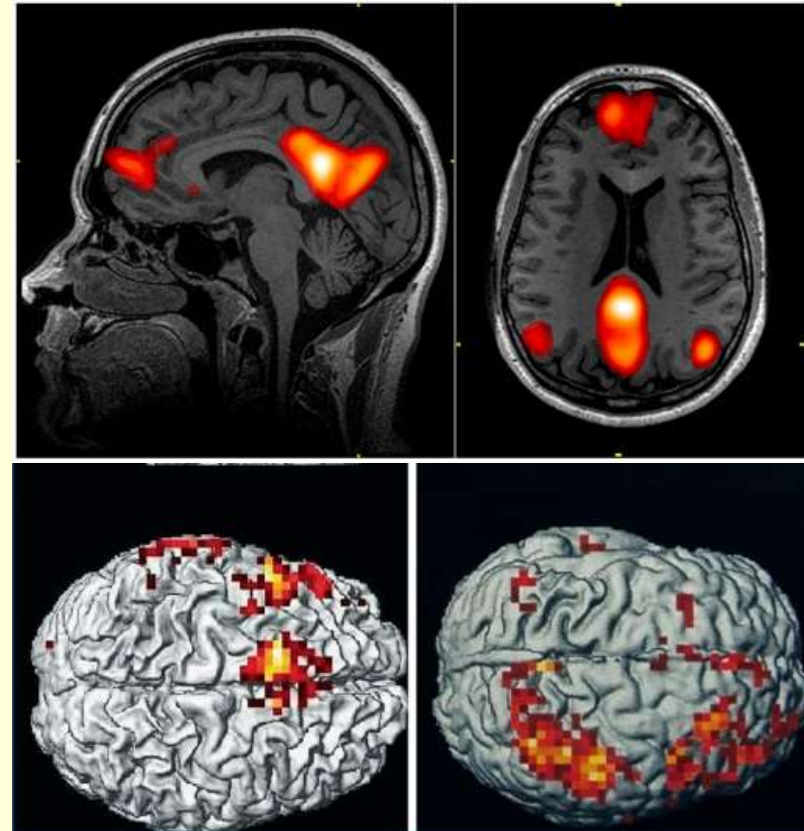
A- La cartographie **anatomique**
du cortex d'hier à aujourd'hui



B- Imagerie cérébrale **fonctionnelle** :
voir nos réseaux cérébraux s'activer

...mais pas en temps réel !

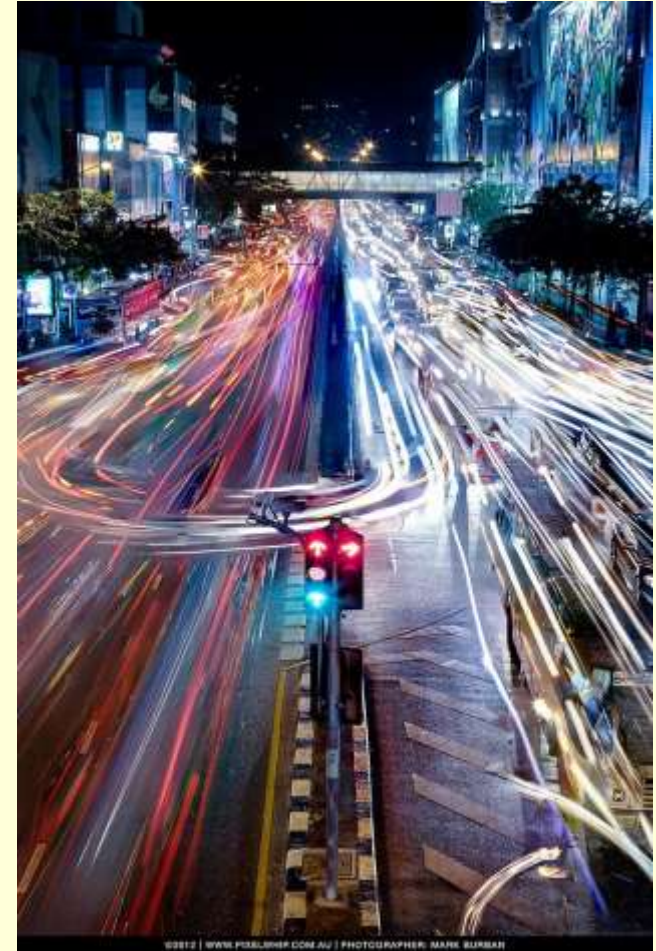
(mauvaise résolution temporelle de l'IRMf)



Une cartographie ou une photo des routes nous indique où les routes passent, donc les chemins **possibles**.

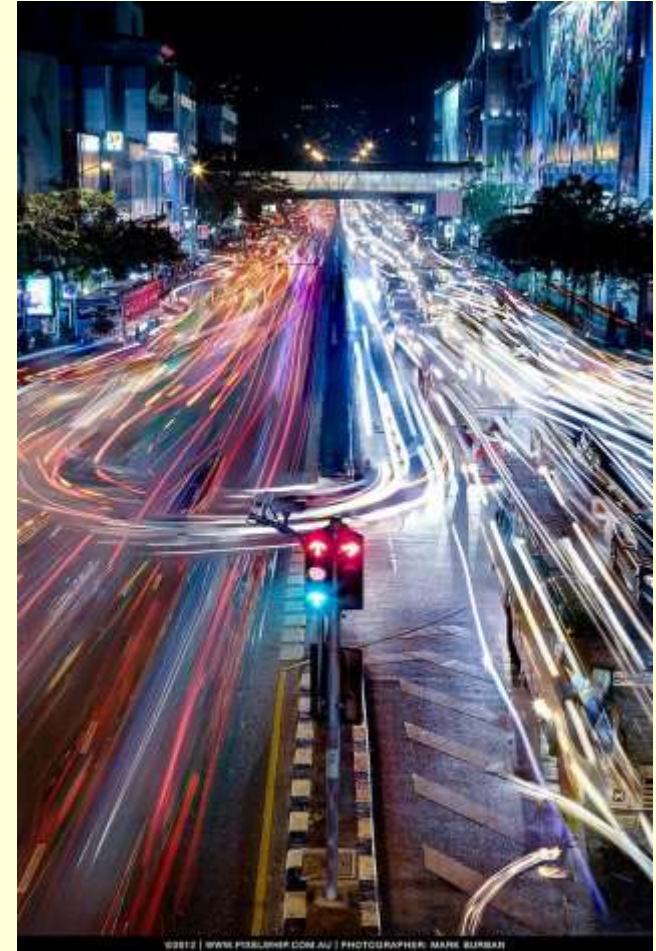
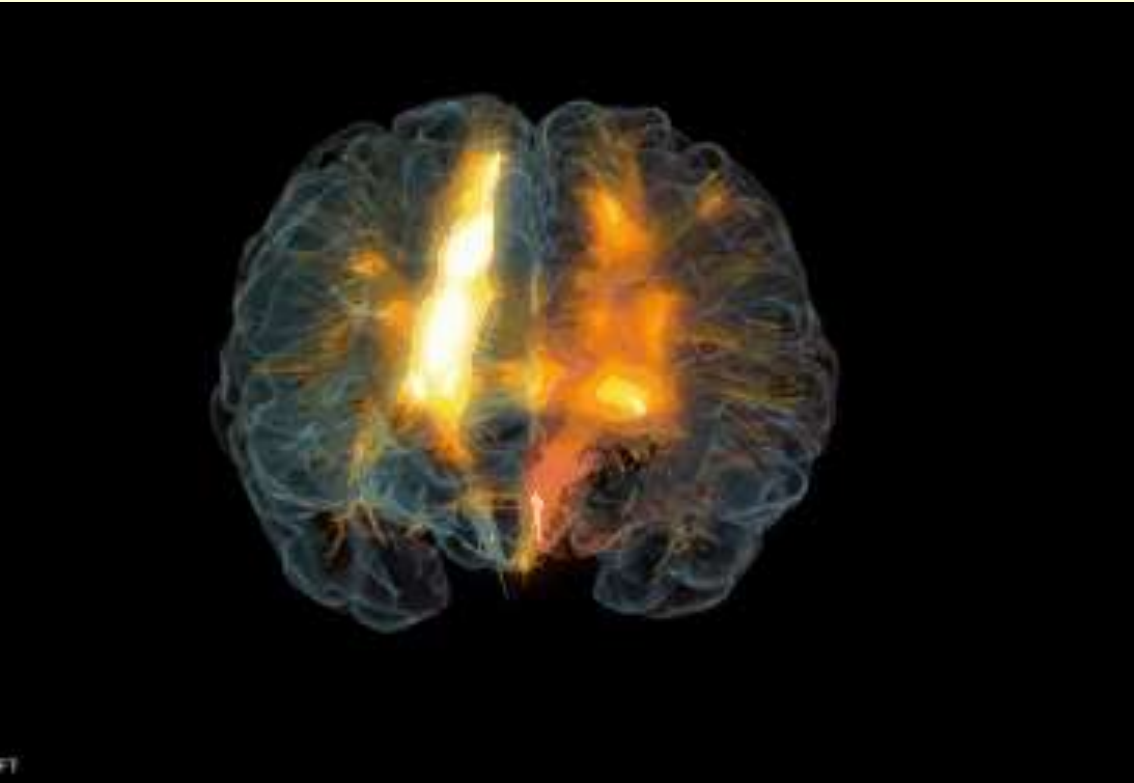


Mais elle ne nous indique pas...



...l'**intense** trafic du matin et du soir versus le **calme** du milieu de journée, la **direction** prédominante du trafic à ces différents moments, ses **cycles** plus lents comme la tranquillité des vacances d'été et de Noël versus la plus grande activité le reste de l'année, etc.

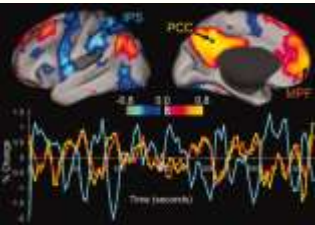
Et ces rythmes ne sont pas les mêmes en banlieue qu'au centre-ville.



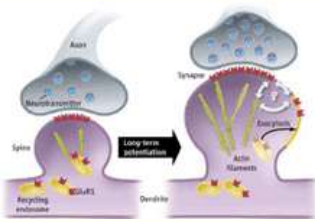
Et ce sera la même chose pour le cerveau qui possède **toutes sortes de rythmes à différentes échelles de temps** et selon les régions observées.

Échelle de temps :

Processus dynamiques :



$10^{-3} s$



$10^{11} s$

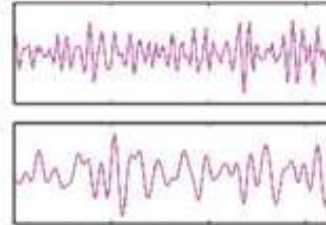
$10^3 s$



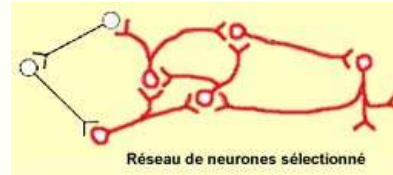
$10^6 s$



$10^{15} s$



Cette semaine !

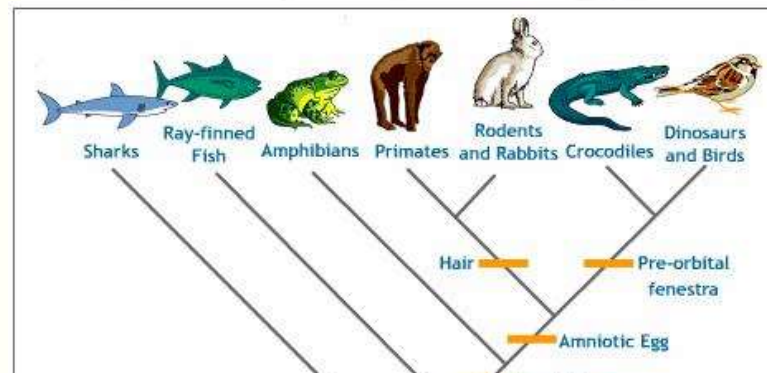


Perception et action devant des situations en temps réel grâce à des coalitions neuronales synchronisées temporairement

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

Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

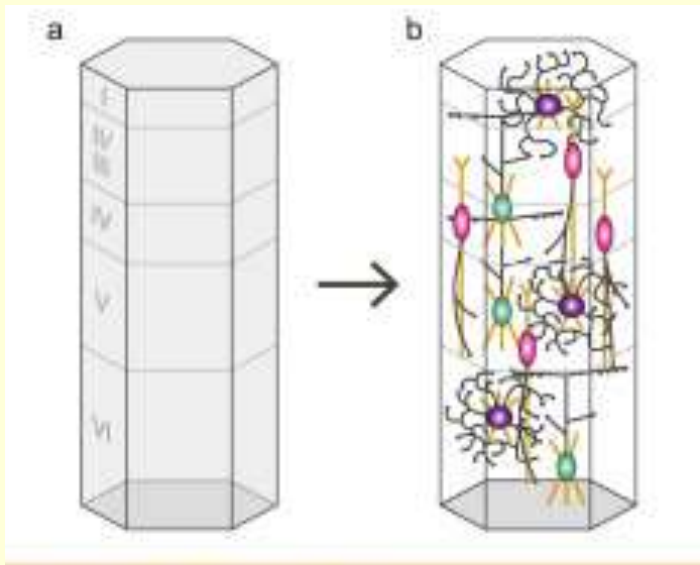
Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

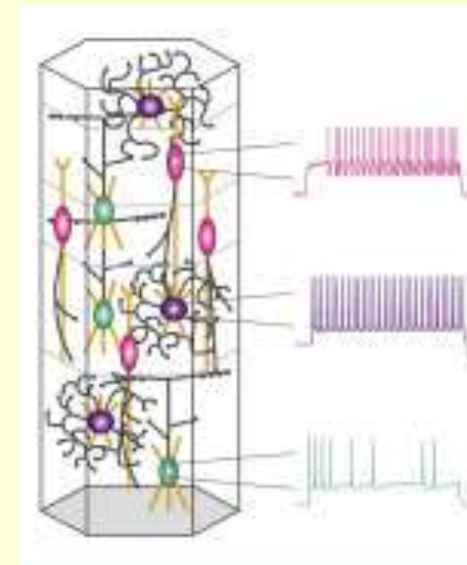
L'optogénétique

B- Éveil, sommeil et rêve



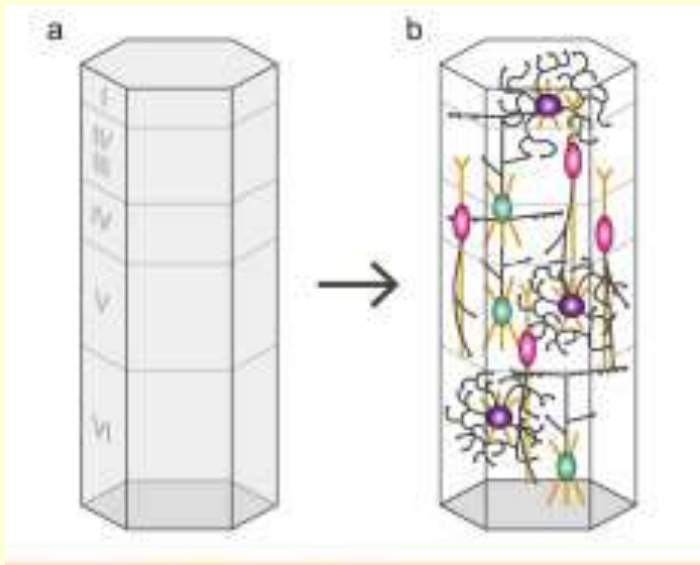


Donc après avoir placé un peu
l'anatomie des circuits nerveux...

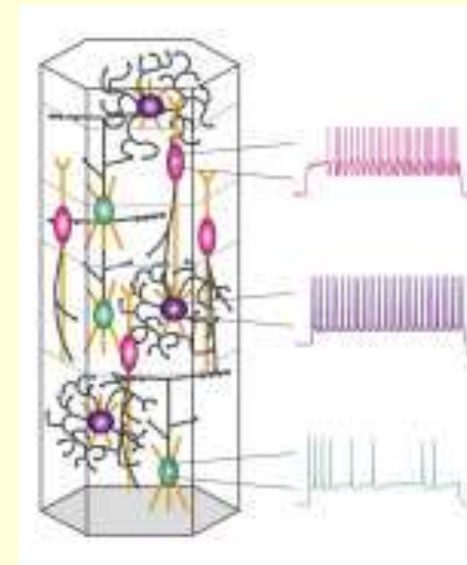


et avoir introduit l'activité électrique
dans ces circuits...

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

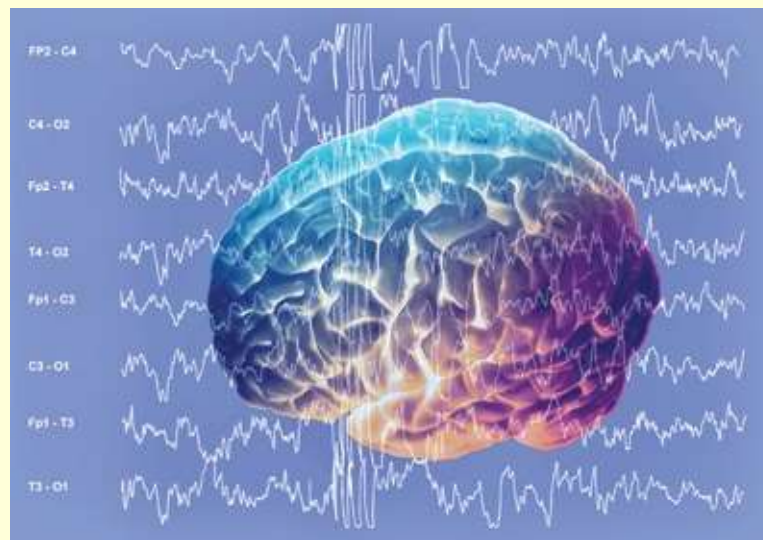


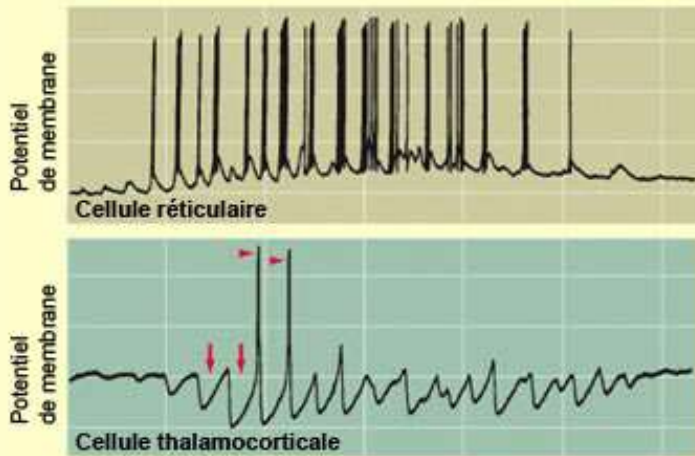
Donc après avoir placé un peu l'anatomie des circuits nerveux...



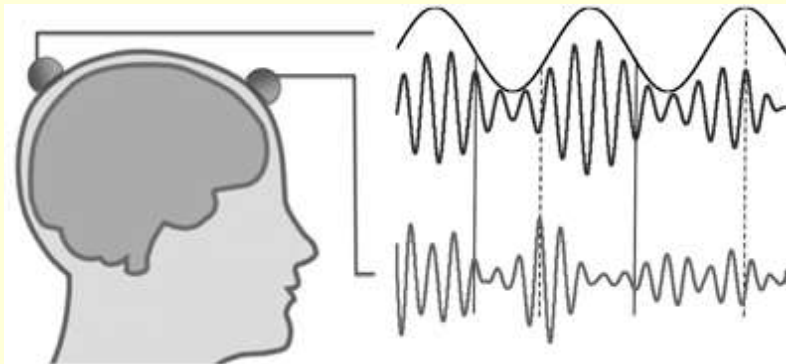
et avoir introduit l'activité électrique dans ces circuits...

on va maintenant observer l'apparition de **variations cycliques** dans cette **activité électrique** à différentes échelle, incluant à l'échelle du cerveau entier.





L'approche dominante a toujours considéré que les neurones encodent l'information en fonction de leur **taux de décharge**.



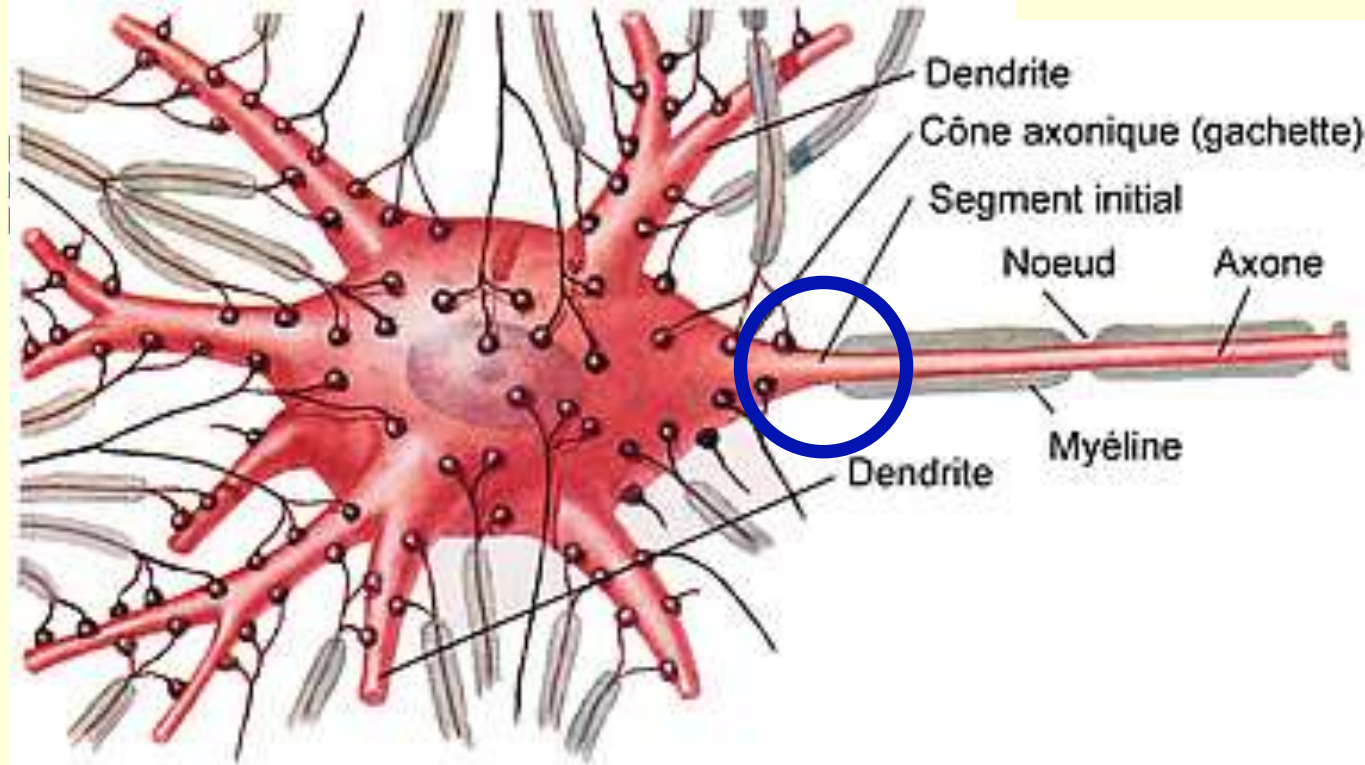
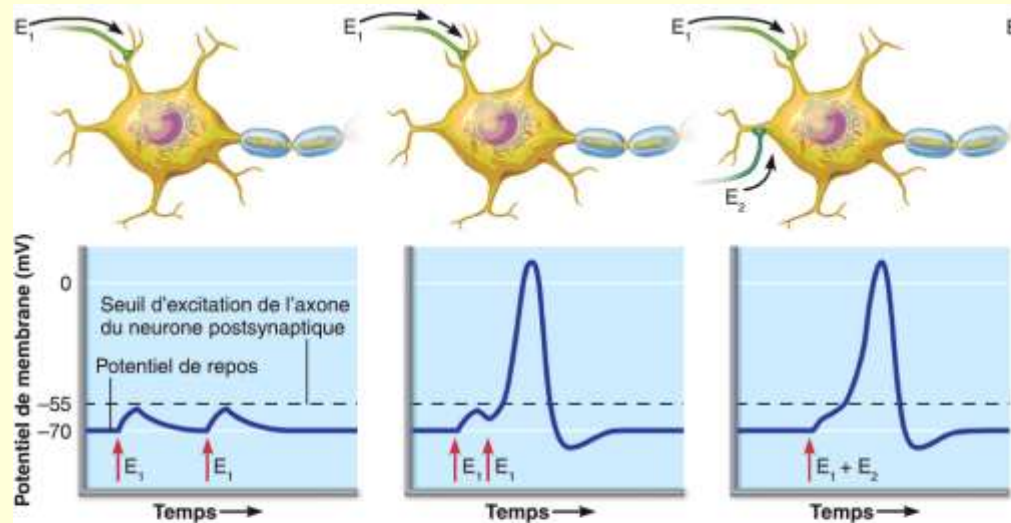
Mais beaucoup de données se sont accumulées et montrent qu'il y a une **“valeur ajoutée”** dans la **synchronisation temporelle précise** des potentiels d'action !

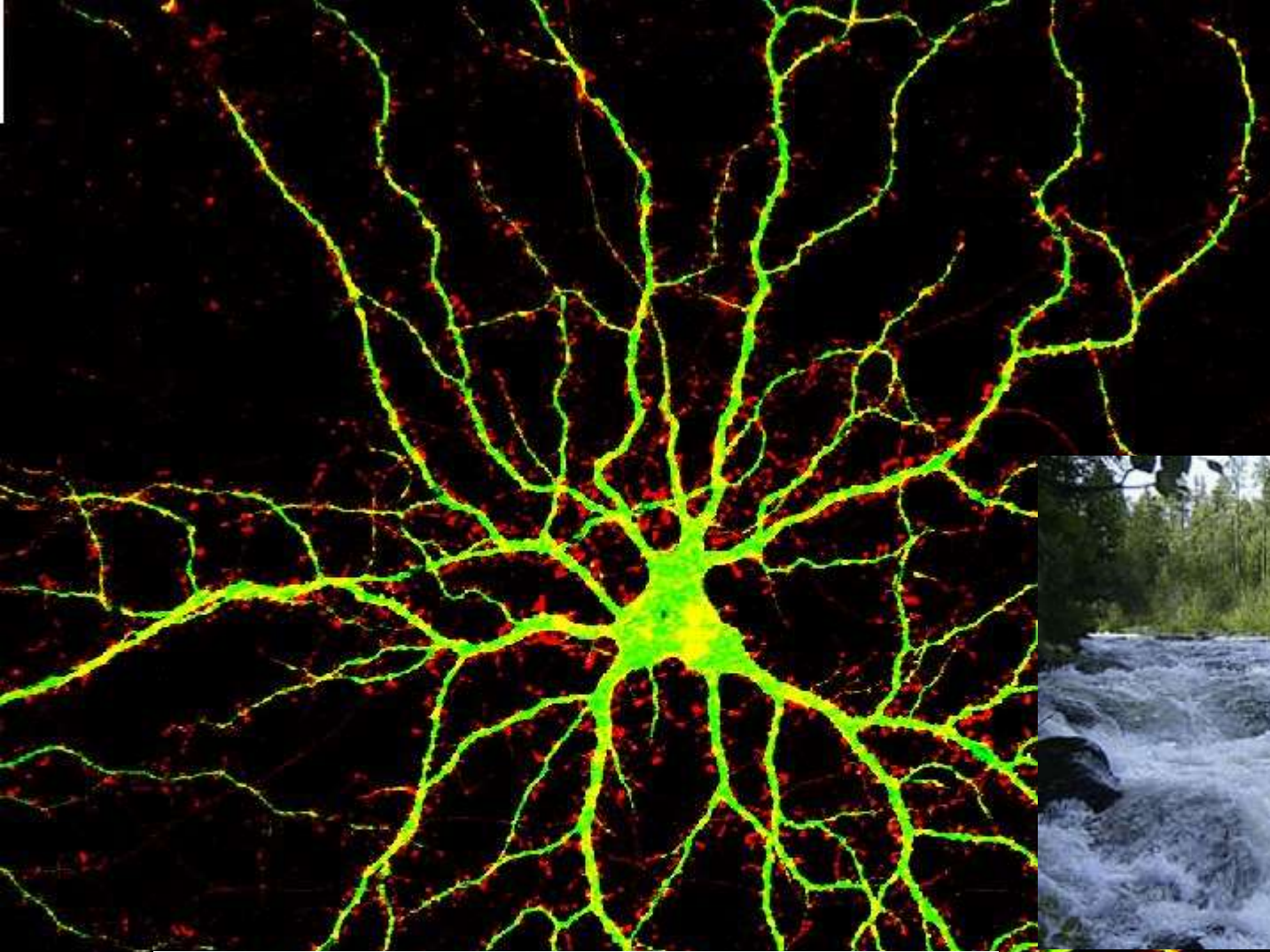
On a vu qu'à tout moment,

chacun de nos 85 milliards de neurones reçoit des milliers **d'excitations et d'inhibitions** synaptiques.

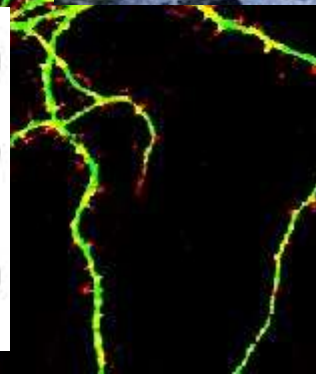
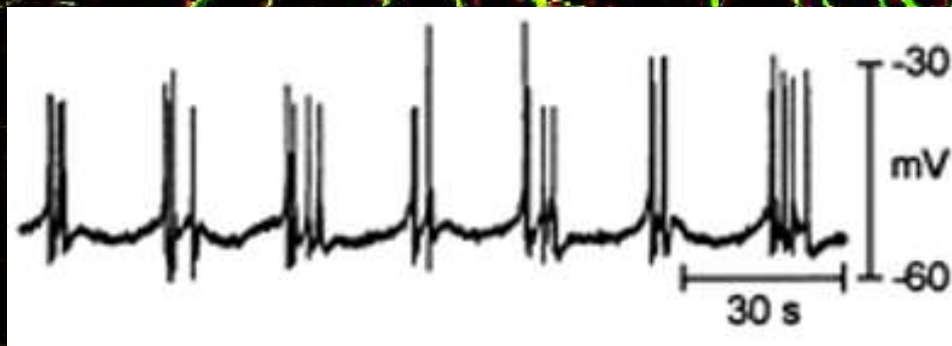
Et à tout moment, si un **certain seuil** est atteint dans le segment initial de l'axone,

le neurone va émettre un **potentiel d'action**.

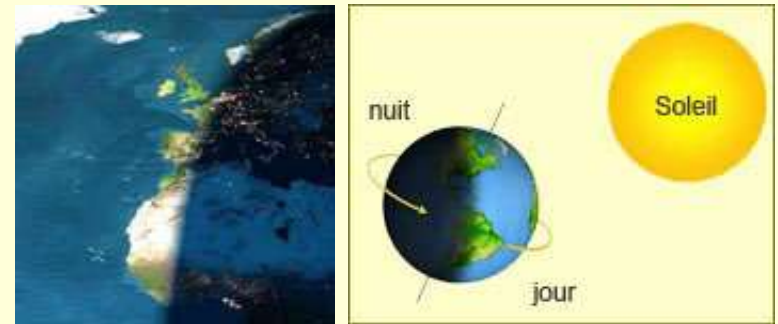
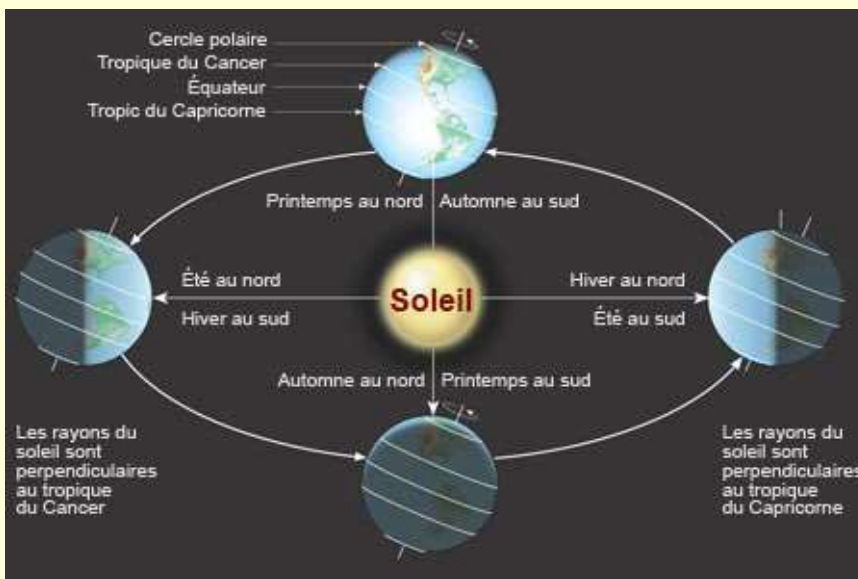




Chaque neurone est donc un intégrateur extrêmement dynamique

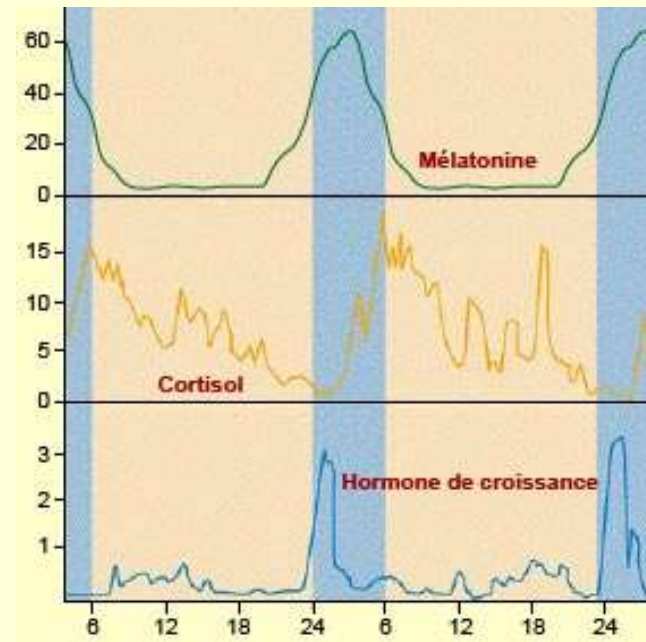


doté bien souvent en plus d'une activité spontanée (cyclique).



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 »

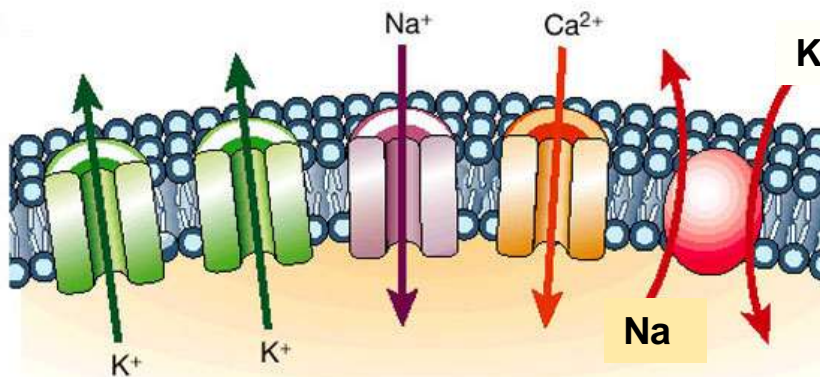
7 octobre 2017 Par Jean Claude Ameisen

<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**.

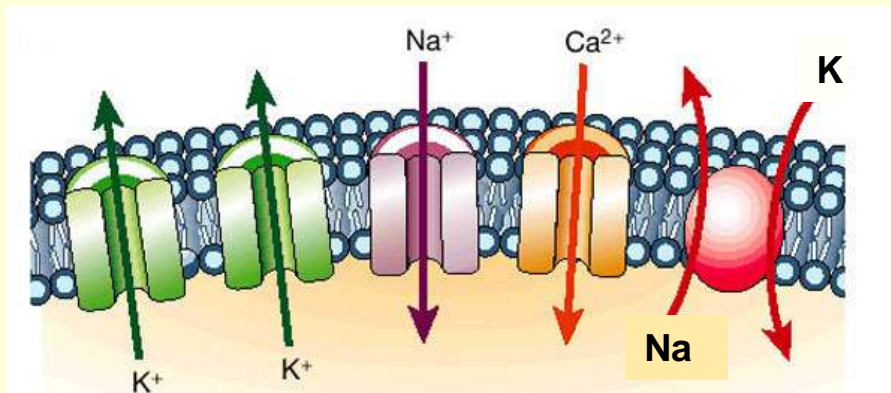
Et notre cerveau regorge de forces qui s'opposent, à commencer par les **canaux ioniques** qui **dépolarisent** ou **hyperpolarisent** les neurones.



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

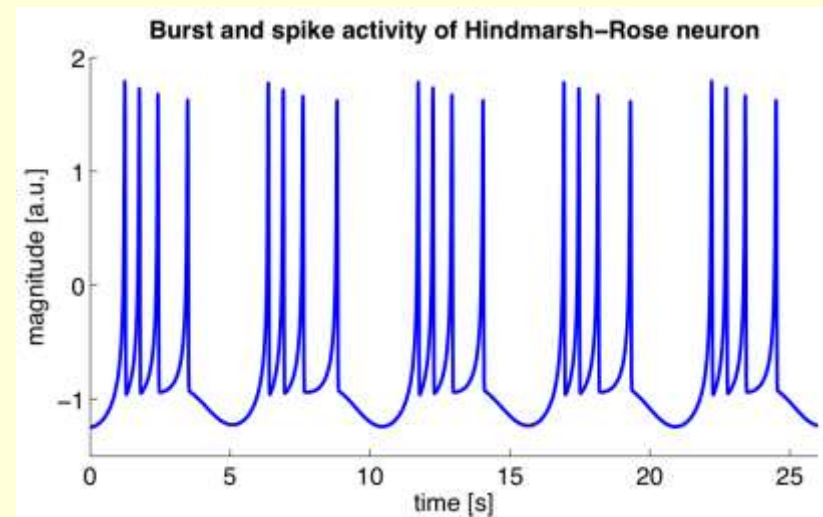
Il suffit que **deux forces s'opposent** pour que le calme plat soit rapidement **remplacé par un rythme**.

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.

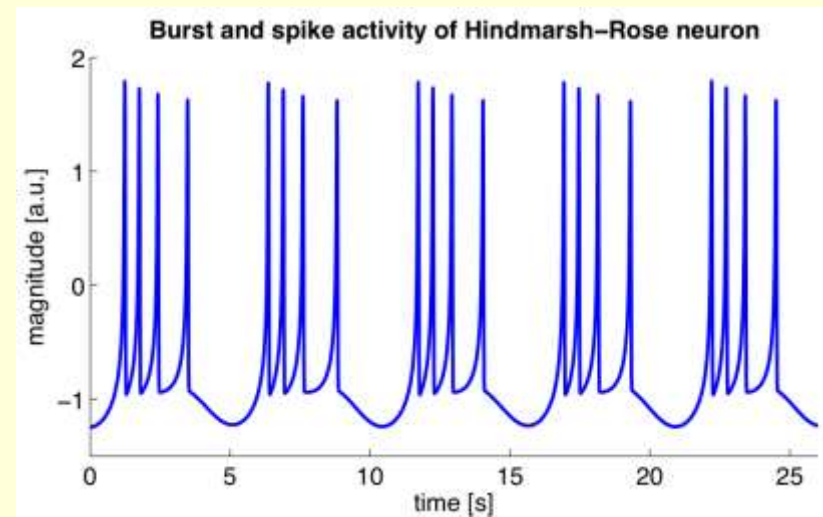
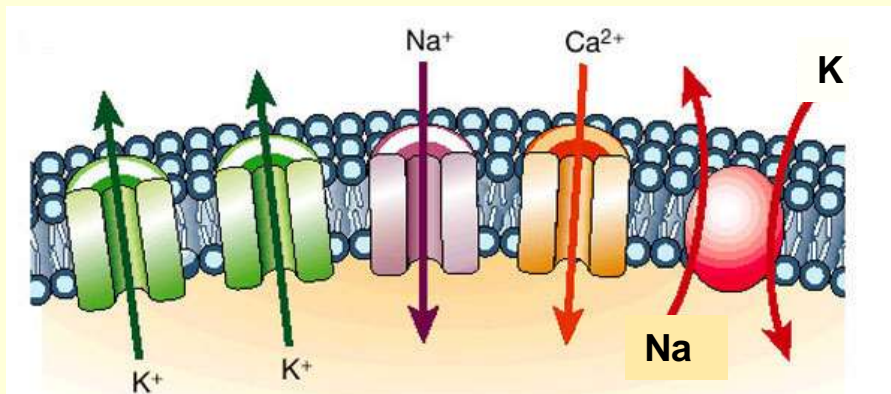


“nature went to a lot of trouble bringing together these channels at the right densities and location just to serve one purpose: **oscillation.**”

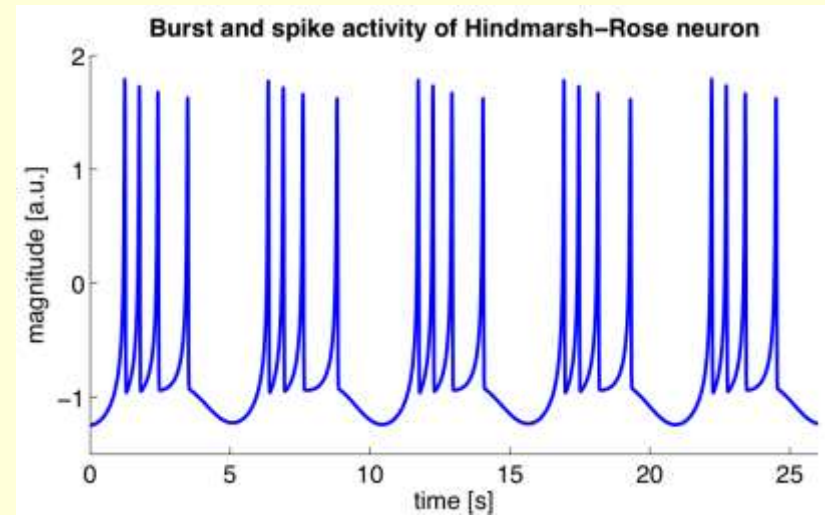
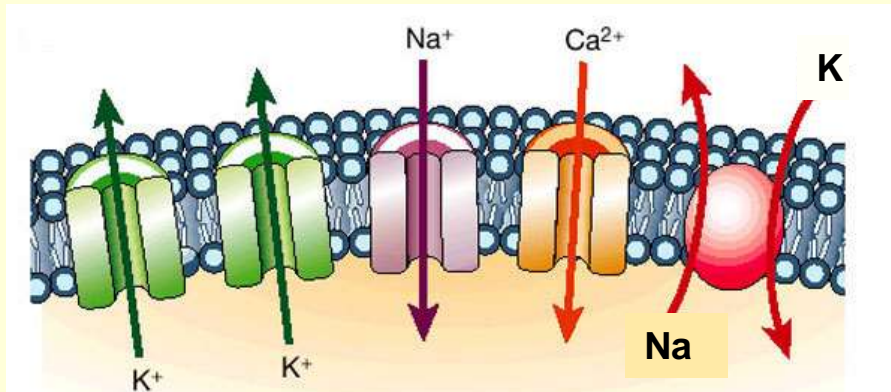
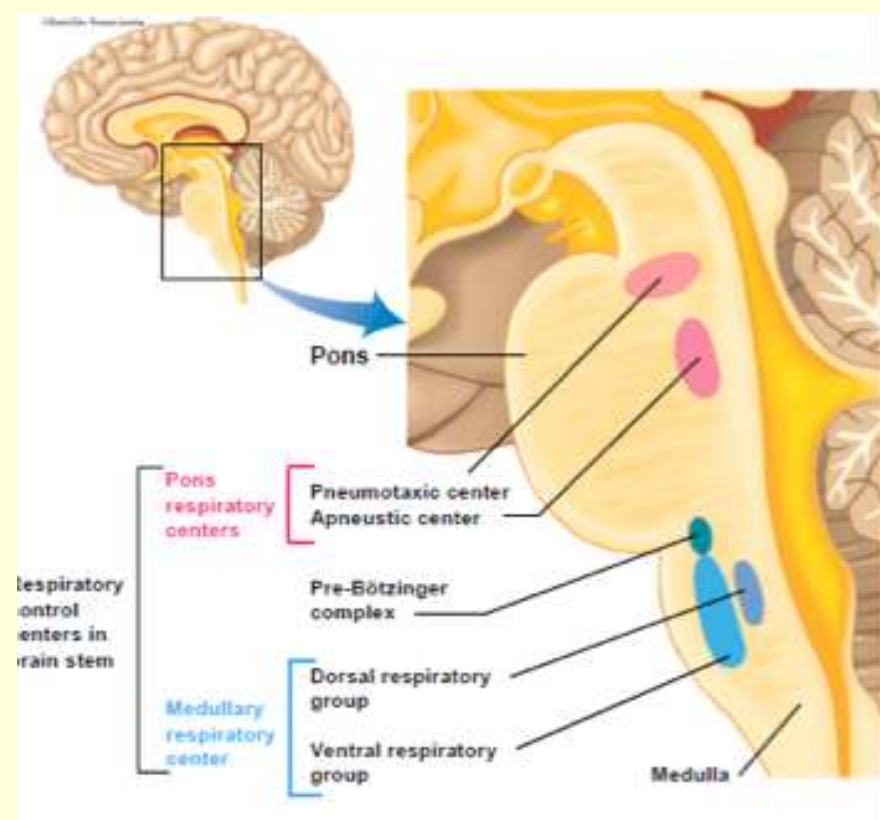
- Buzsáki 2006

[...] Llinás' findings revealed that the **neurons are oscillators**

- William Bechtel (2013)



Exemple :
les centres respiratoires
du tronc cérébral



Donc première façon de générer des rythmes :

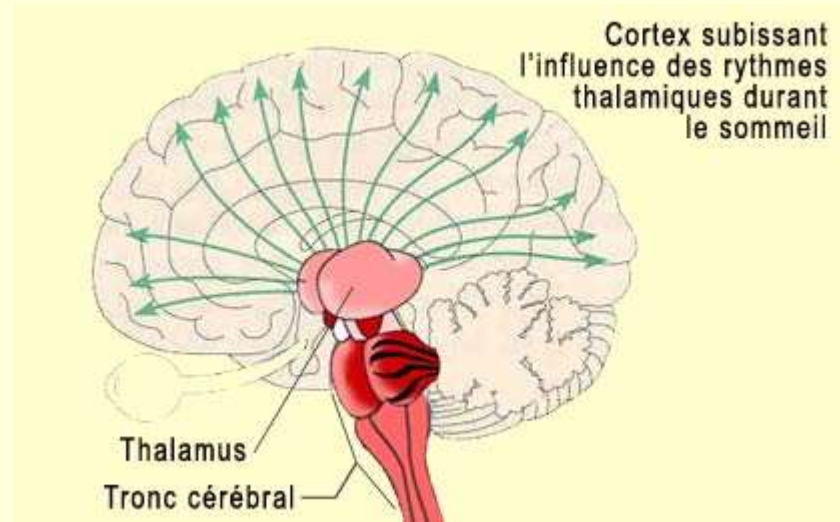
- par les propriétés **intrinsèque** de la membrane du neurone (« endogenous bursting cells »)

Thalamus : presque tous les neurones

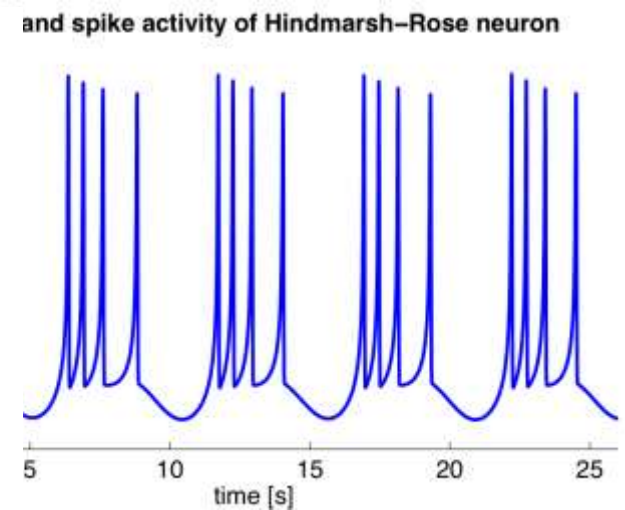
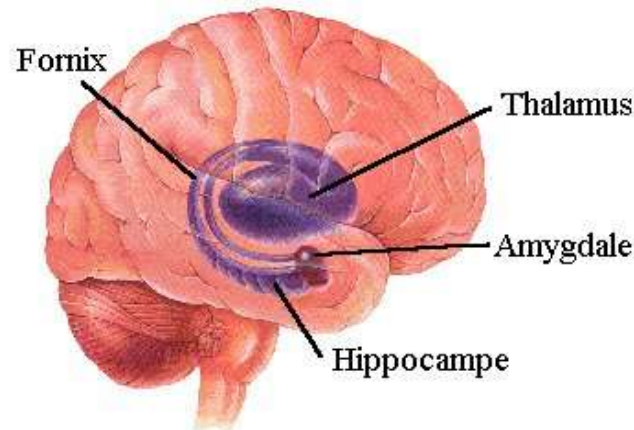
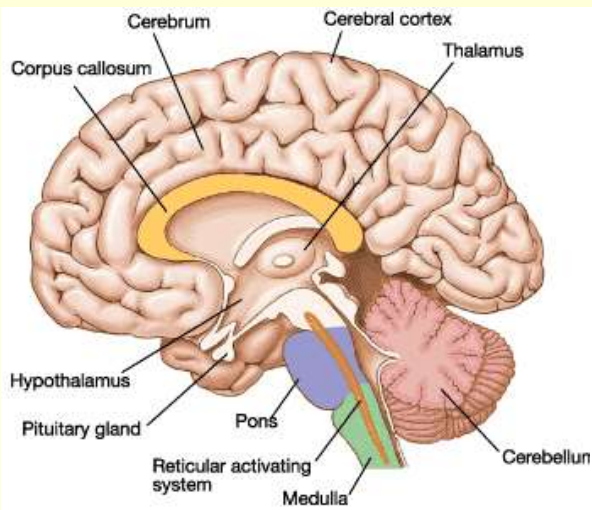
Cortex : non

Cortex enthorinal

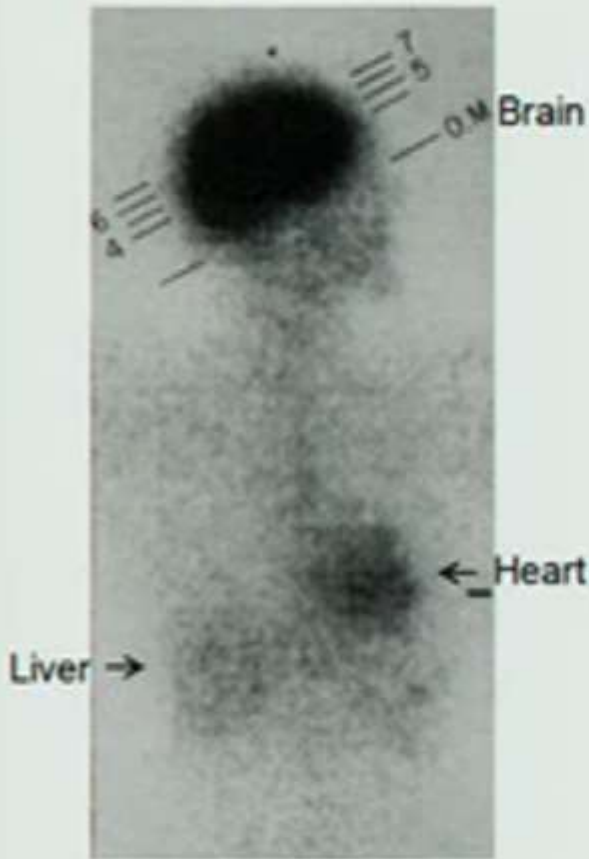
(près de l'hippocampe) : certains neurones



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



Resting Metabolism



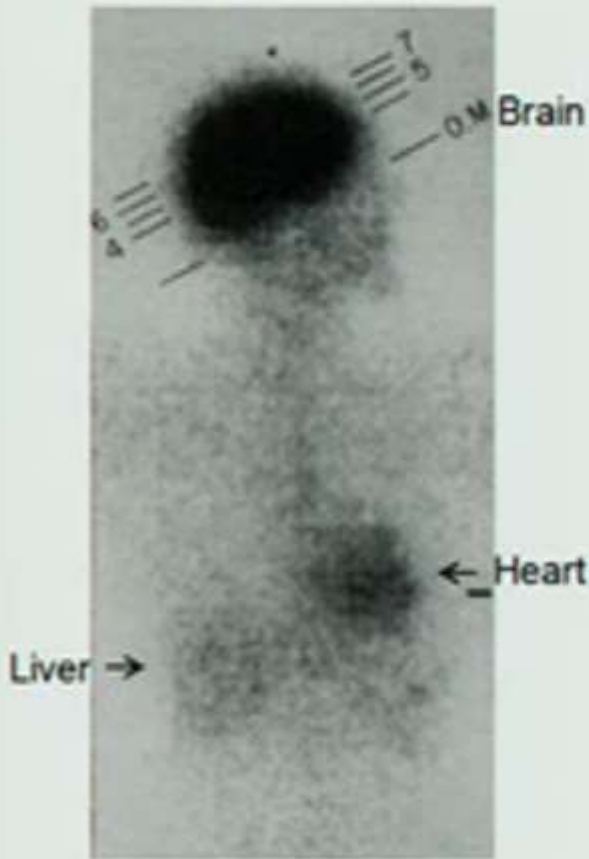
Alavi & Reivich (2002)

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

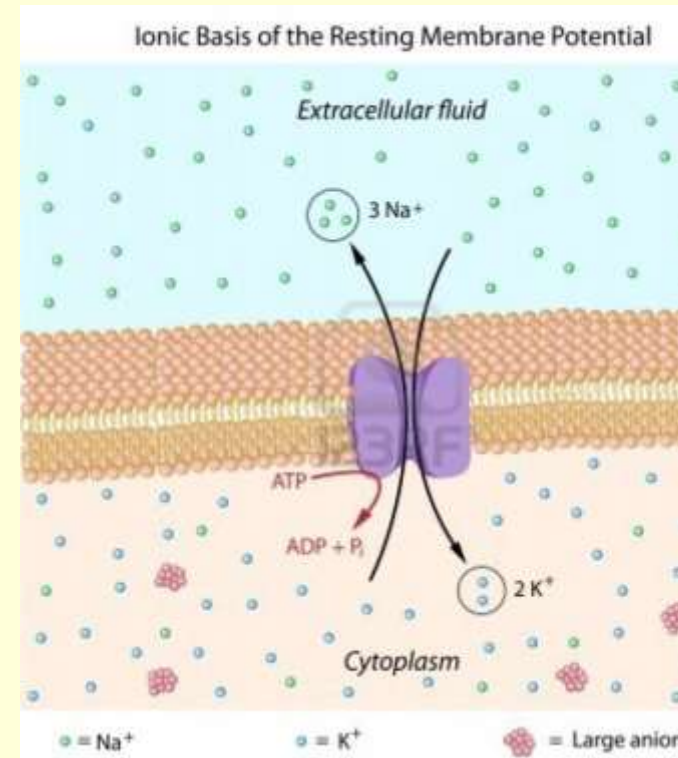


Alavi & Reivich (2002)

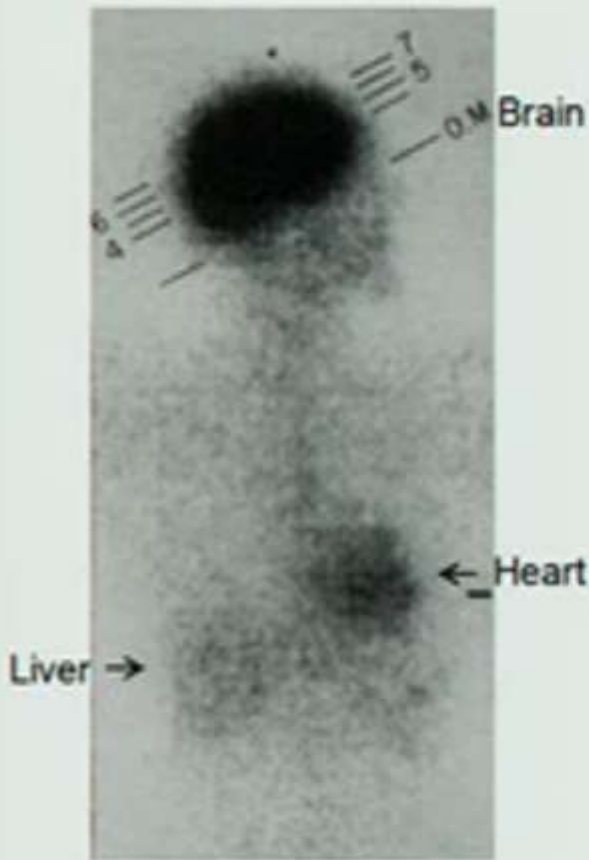
Le cerveau ne représente environ que 2 % du poids du corps humain.

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

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



Resting Metabolism

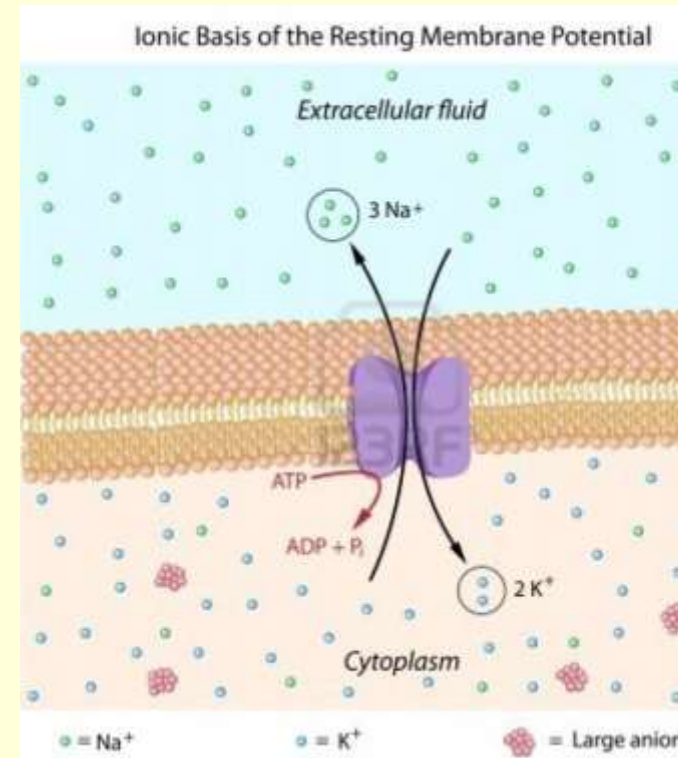


Alavi & Reivich (2002)

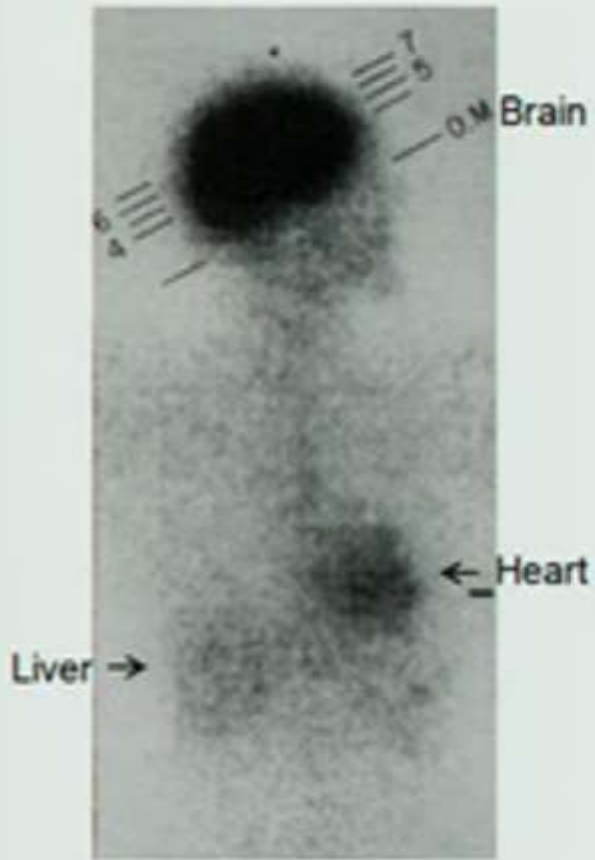
Dans le cerveau, le pourcentage du “budget” énergétique cellulaire attribué à la pompe sodium / potassium avoisine les **50%** !

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-A>

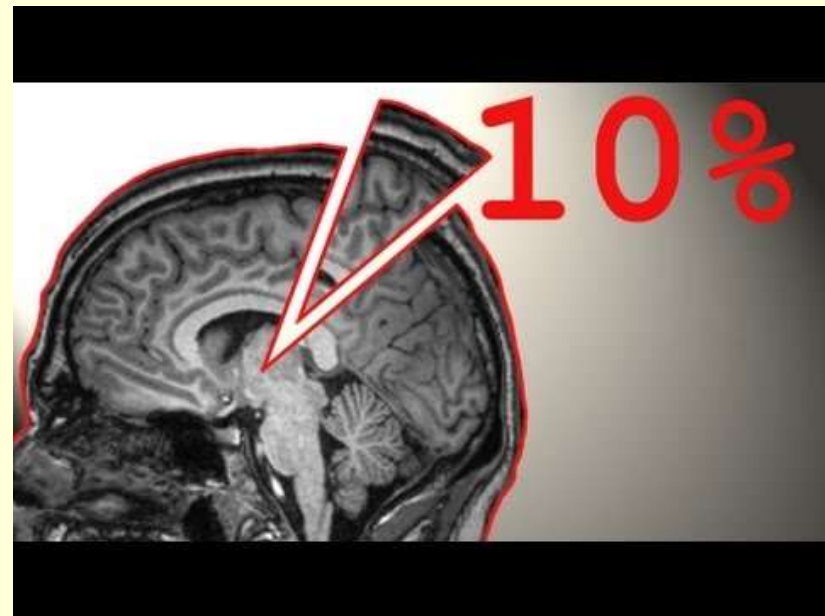


Resting Metabolism

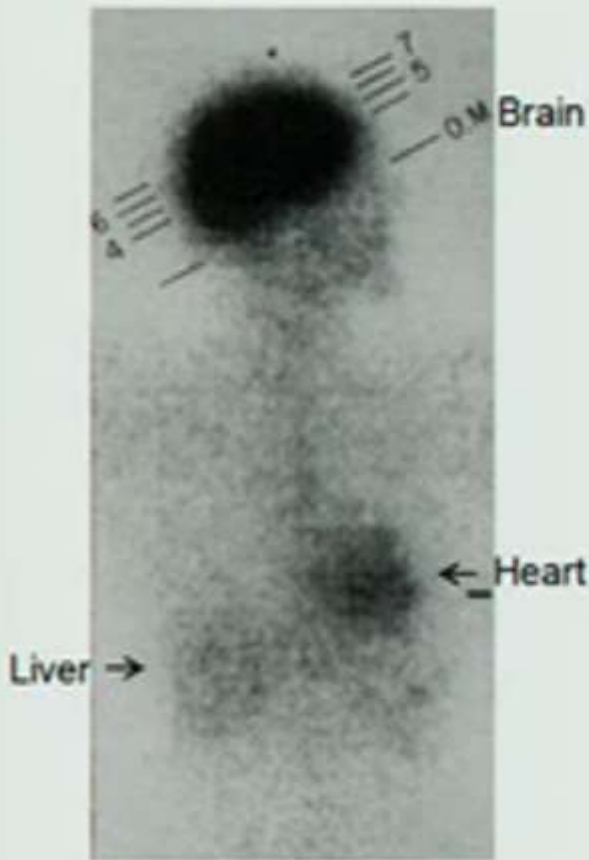


Alavi & Reivich (2002)

?



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,

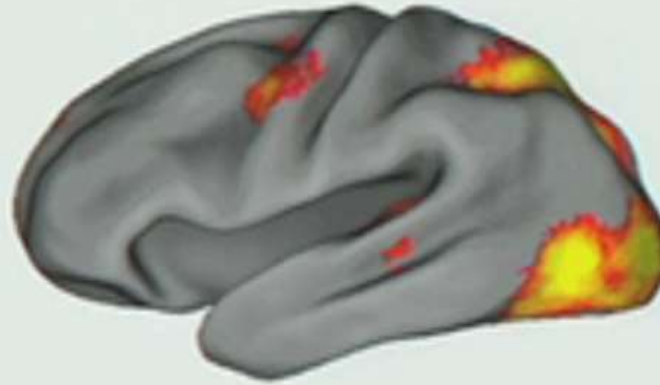
il prendrait déjà 100% de l'énergie consommée...

Oups !

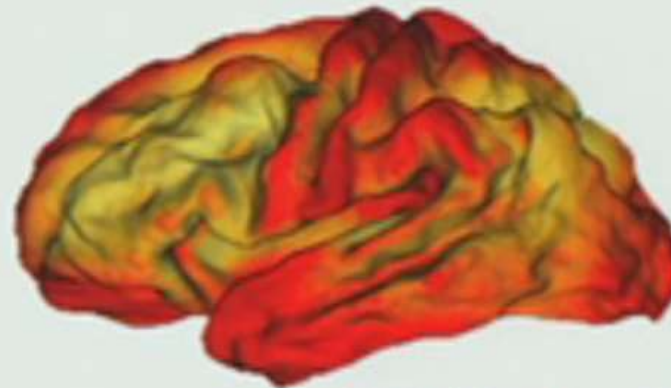


An Historical View

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)

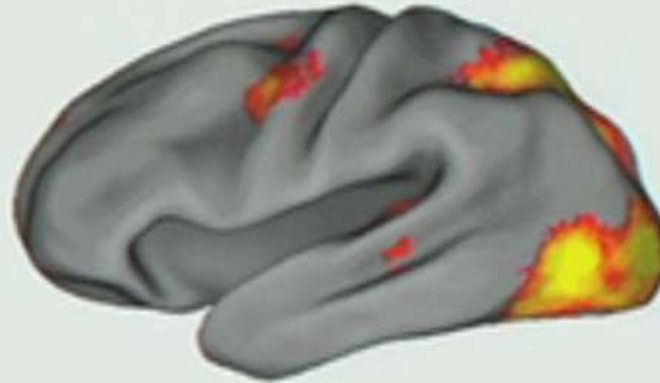


Boutade
mnémotechnique:

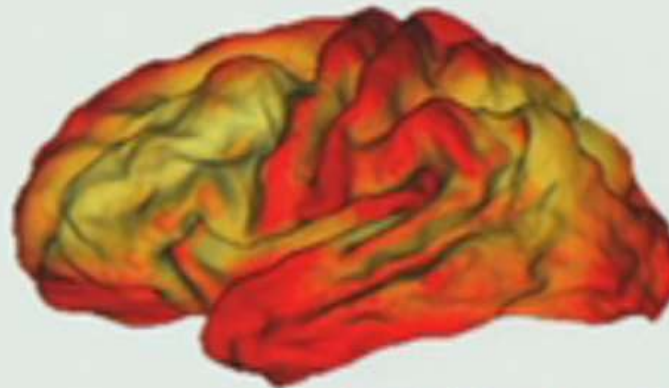
**« Il pleut tout
le temps
dans notre
cerveau ! »**

An Historical View

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)



Boutade
mnémotechnique:

« Il pleut tout
le temps
dans notre
cerveau ! »

The Endogenously
Active Brain:

The Need for an Alternative
Cognitive Architecture

William Bechtel

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

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

Active inference, communication and hermeneutics

Karl J. Friston and Christopher D. Frith (2015)

Recent advances in theoretical neuroscience have produced a **paradigm shift** in cognitive neuroscience.

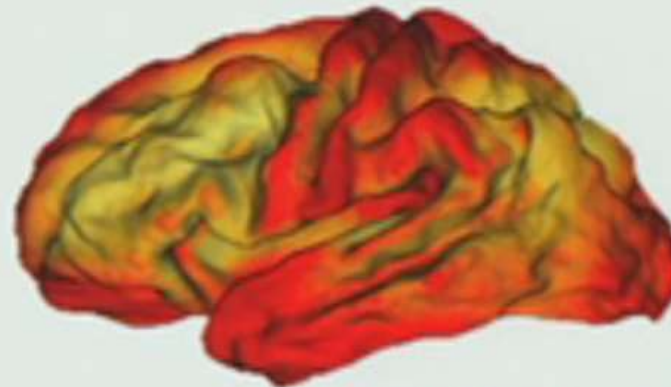
This shift is **away** from the brain as a **passive filter** of sensations or an elaborate **stimulus-response** link

towards a view of the brain as an organ **that generates hypotheses or fantasies** (fantastic: from Greek phantastikos, the ability to create mental images), which are **tested against sensory evidence**.

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)



Raichle: Two Views of Brain Funct

Active inference, communication and hermeneutics

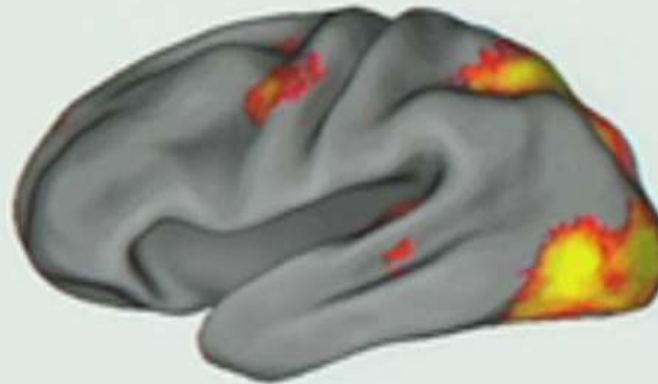
Karl J. Friston and Christopher D. Frith (2015)

Recent advances in theoretical neuroscience have produced a **paradigm shift** in cognitive neuroscience.

This shift is **away** from the brain as a **passive filter** of sensations or an elaborate **stimulus-response** link

towards a view of the brain as an organ **that generates hypotheses or fantasies** (fantastic: from Greek phantastikos, the ability to create mental images), which are **tested against sensory evidence**.

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



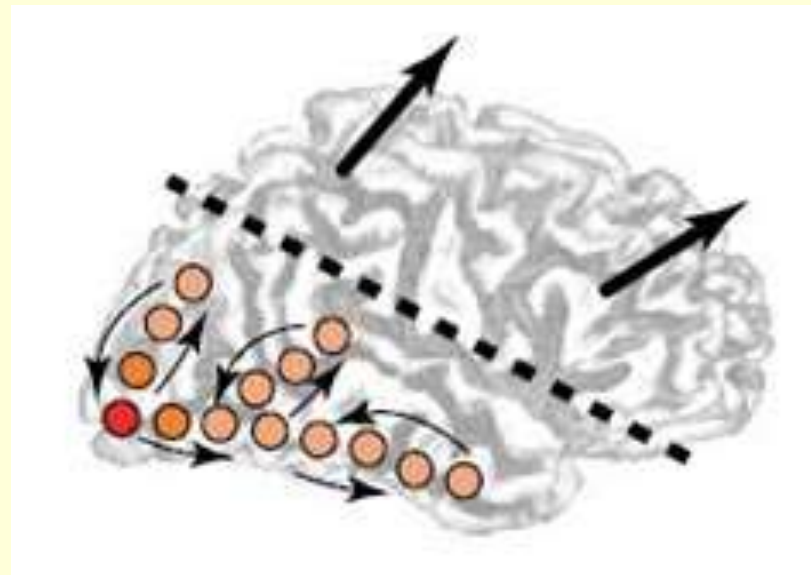
Intrinsic



Le « **cerveau prédictif** »

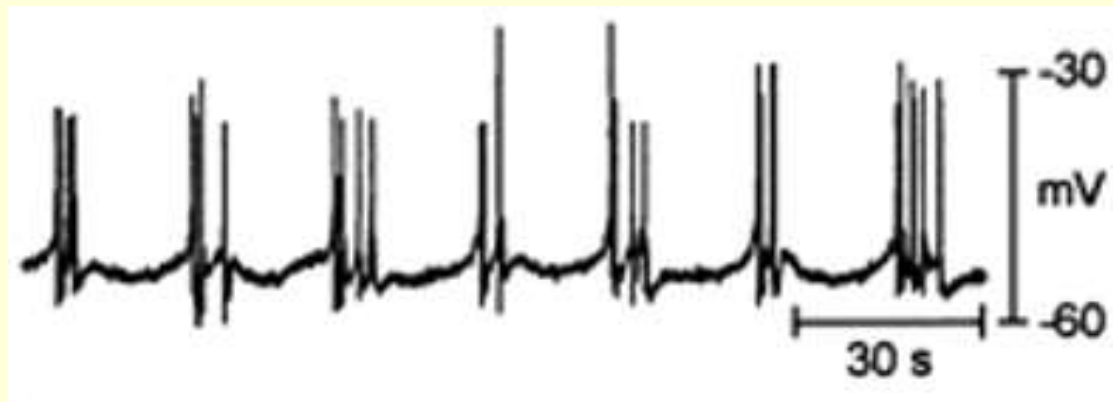
Autrement dit :

“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)

Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique

B- Éveil, sommeil et rêve



Ce « input-output device » a une longue histoire qui remonte au **vieux schéma cartésien** « perception → esprit → action ».



Ce « input-output device » a une longue histoire qui remonte au **vieux schéma cartésien** « perception → esprit → action ».

Mais comme l'esprit n'a plus la cote depuis le behaviorisme



– Stop this metaphysical nonsense...



John Watson.

(Source de cette diapo : <http://www.slideshare.net/BrainMolecul>
eMarketing/uqam2012-cisek)

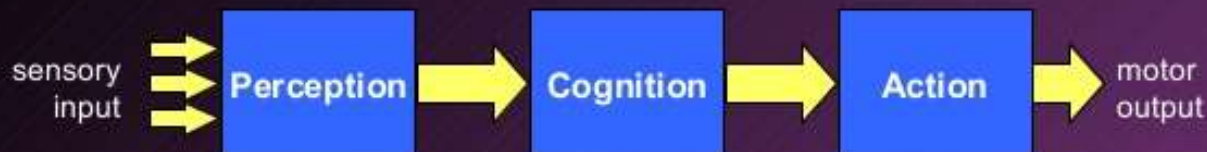
Ce « input-output device » a une longue histoire qui remonte au **vieux schéma cartésien** « perception → esprit → action ».

Mais comme l'esprit n'a plus la cote depuis le behaviorisme c'est la « cognition » qui l'a remplacé mais avec le **même schéma linéaire**.



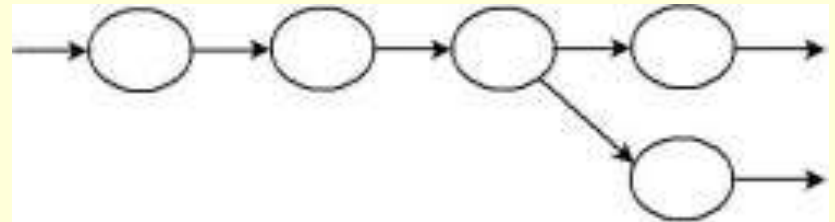
– Stop this metaphysical nonsense...

Psychological architecture for behavior





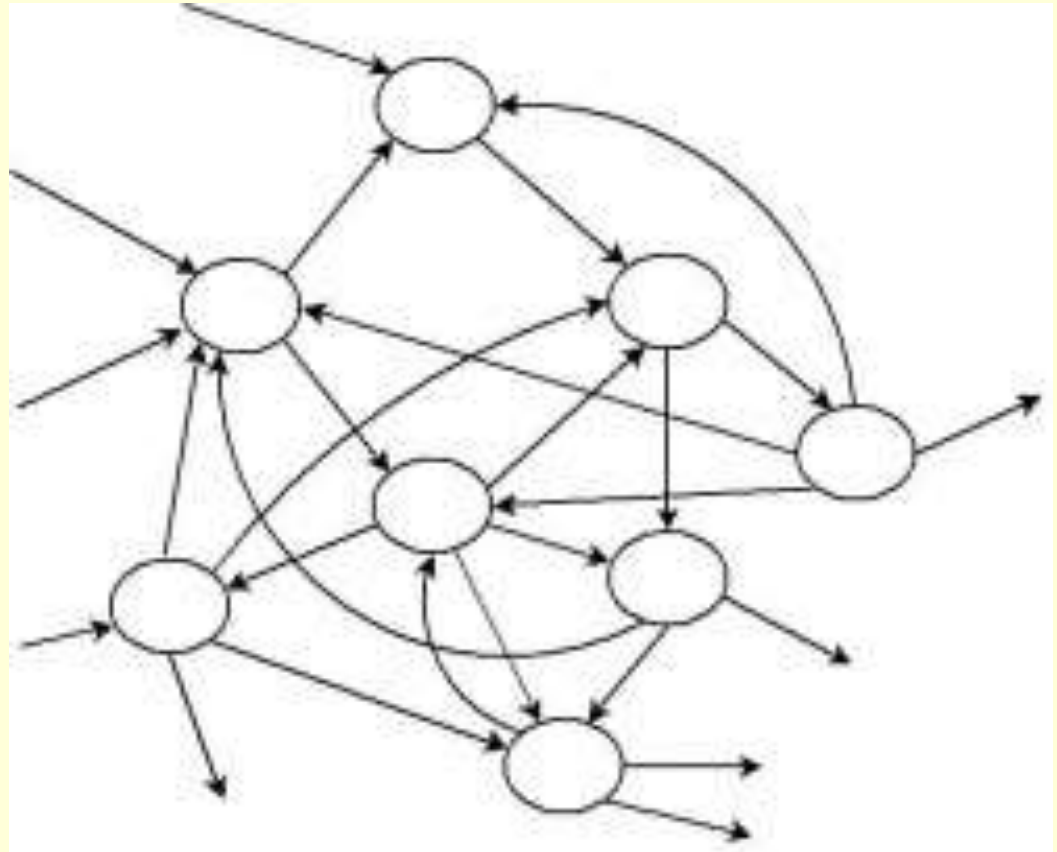
Depuis la physique de Newton et même avant, on peut expliquer beaucoup de phénomènes en terme de causalité **linéaire**.



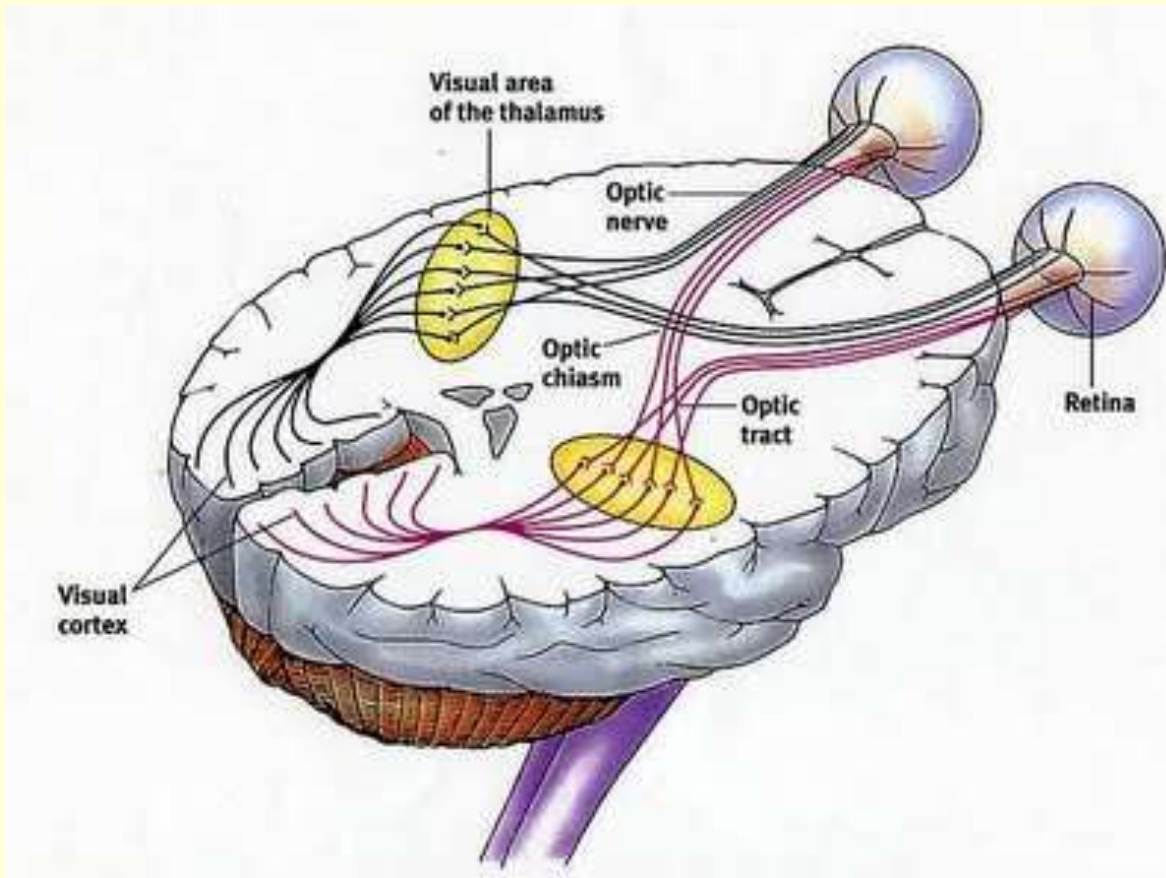
Sauf que dans un système complexe comme le cerveau...

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

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

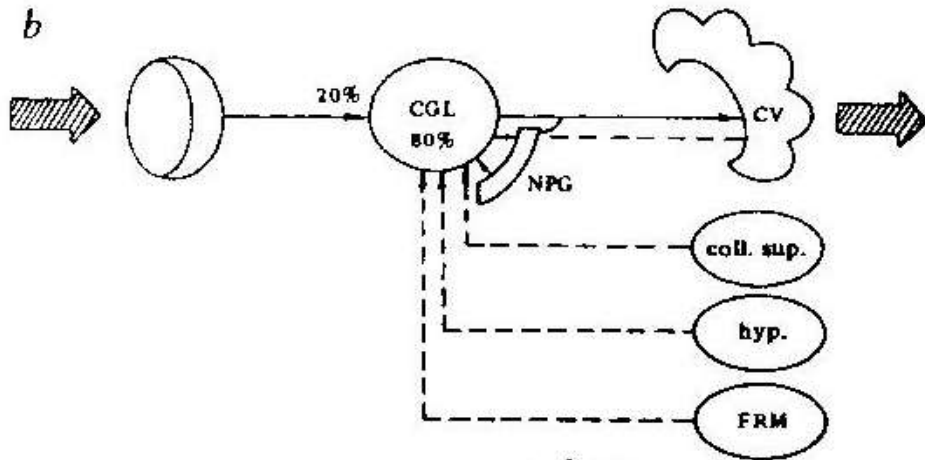


Exemple #1 :



Voici un schéma classique des voies visuelles dans le cerveau humain.

Il suggère que ce qui est capté par nos yeux est transmis **de façon linéaire** au cortex visuel en faisant au passage des connexion aux neurones du corps genouillé latéral qui est vu ici comme **un relais** vers le cortex.



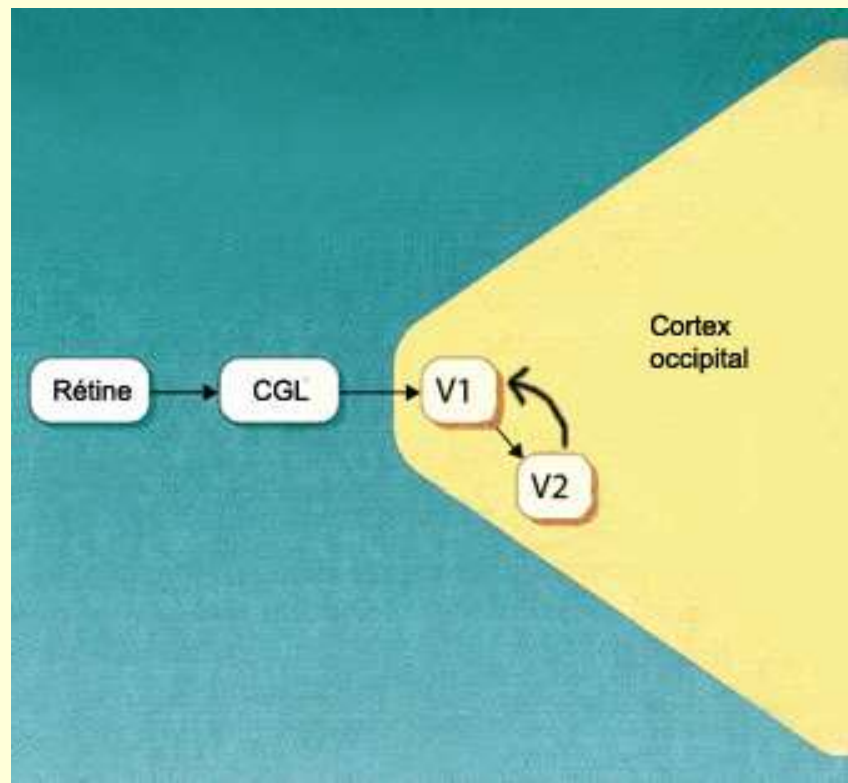
On a la même représentation
mais plus schématique ici.

Mais certains comme Francisco Varela ont rappelé que **80%** de ce que capte toute cellule du CGL **ne vient pas de la rétine** mais de l'interconnectivité dense **d'autres régions du cerveau.**

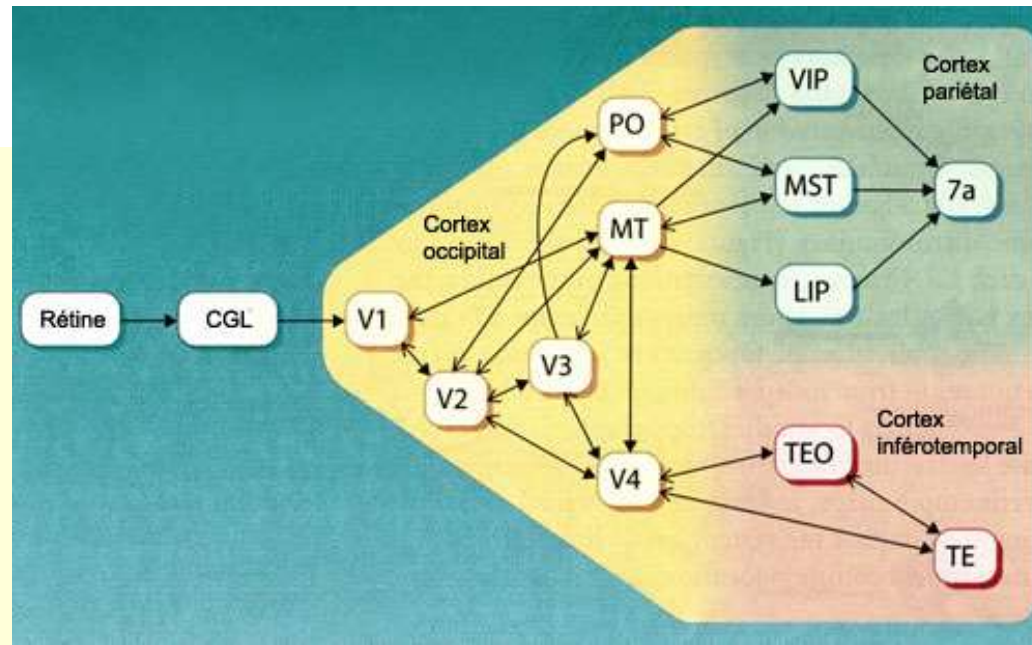
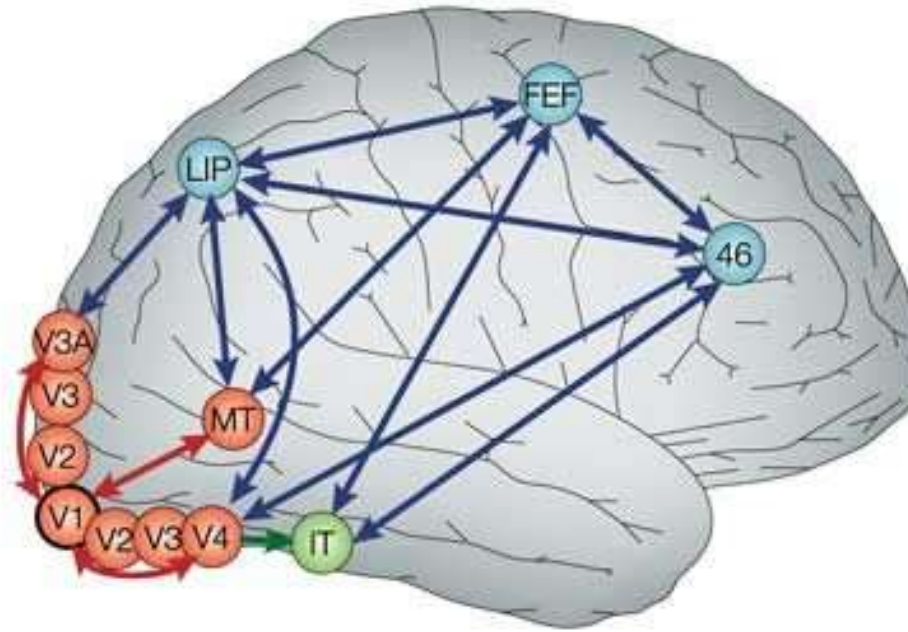
On peut aussi constater qu'il existe plus de fibres reliant le cortex au CGL qu'il n'y en a dans le sens inverse !

Considérer les voies visuelles comme constituant un dispositif de traitement séquentiel des yeux vers le cortex **s'avère complètement arbitraire.**

Si l'on regarde maintenant entre V1 et V2...
C'est la même chose !



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.



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.



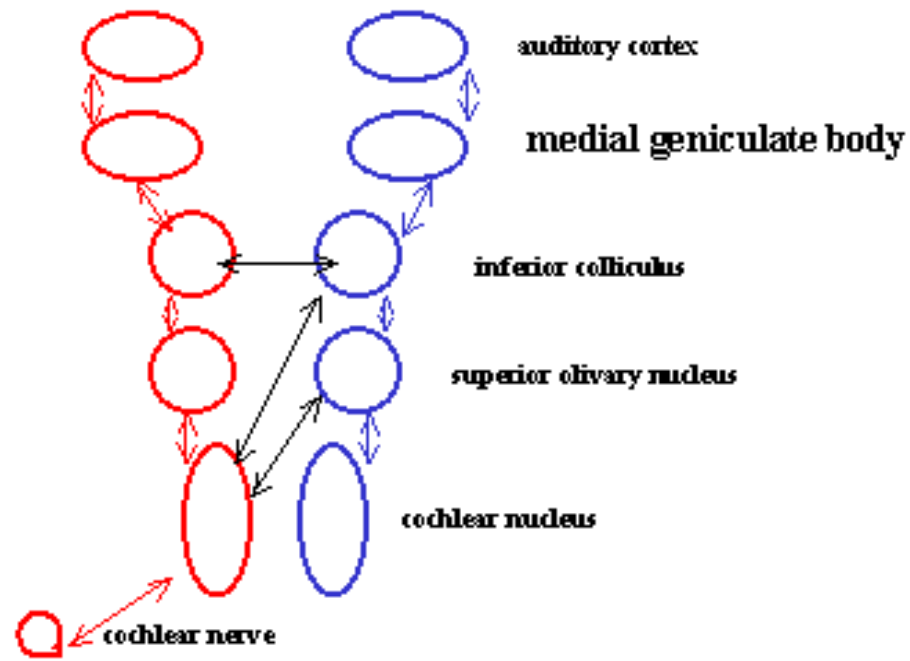
Après un certain temps dans de telles chambres, on peut y entendre son propre corps. On peut percevoir le sang qui bat dans ses vaisseaux et monte à la tête, l'air qui passe dans ses poumons, le battement de son cœur et le gargouillement du système digestif, le bruit de ses articulations en mouvement.

Tout le monde ne réagit pas de la même façon dans ces chambres, mais au bout de quelques minutes, plusieurs ont des **hallucinations auditives**.

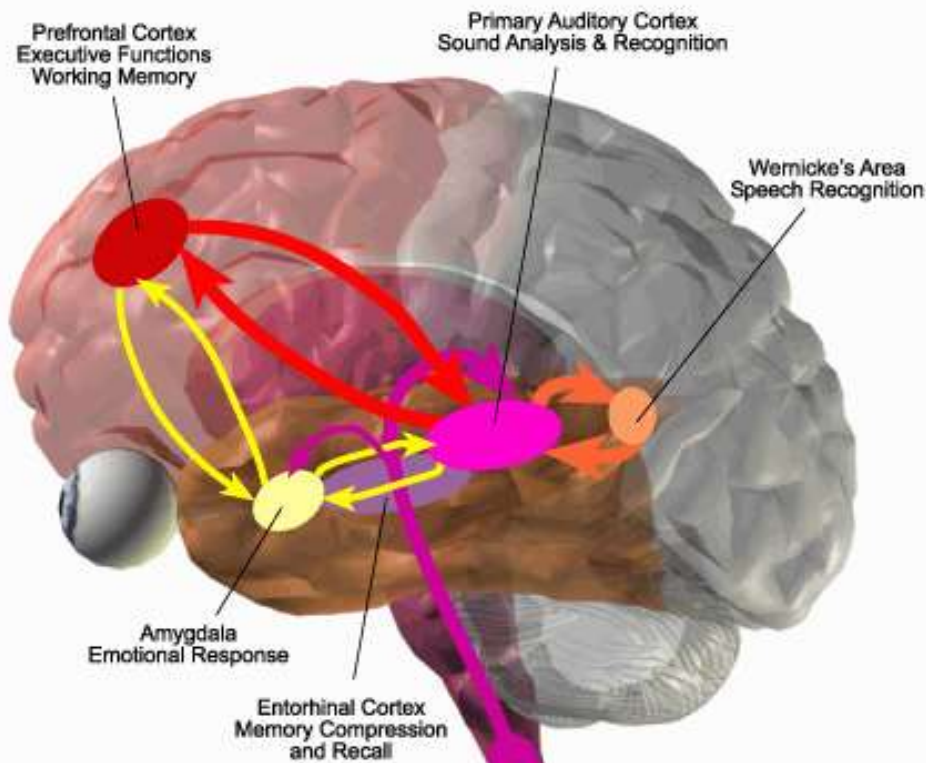
Par exemple, une personne croyait entendre une nuée d'abeilles. Puis elle avait l'impression de percevoir le sifflement du vent dans des arbres ou la sirène d'une ambulance. Ces sons apparaissaient puis disparaissaient. Au bout de 45 minutes, elle distinguait les paroles d'une chanson, comme si elle était jouée sur la sono d'une maison voisine.



Alors que des micros hypersensibles dans la pièce pouvait attester qu'il n'y avait **aucun de ces sons**.



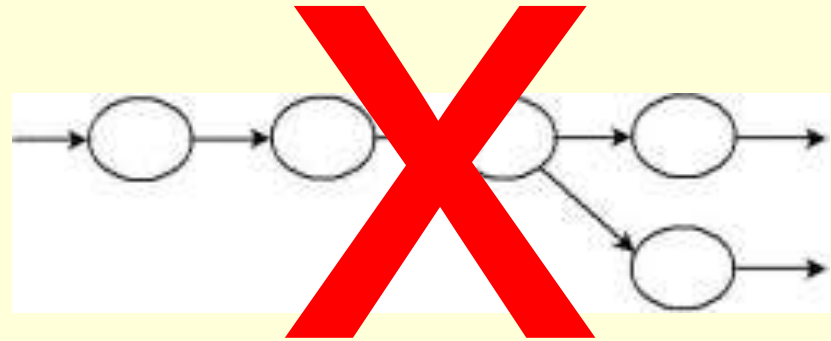
Auditory Pathway



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

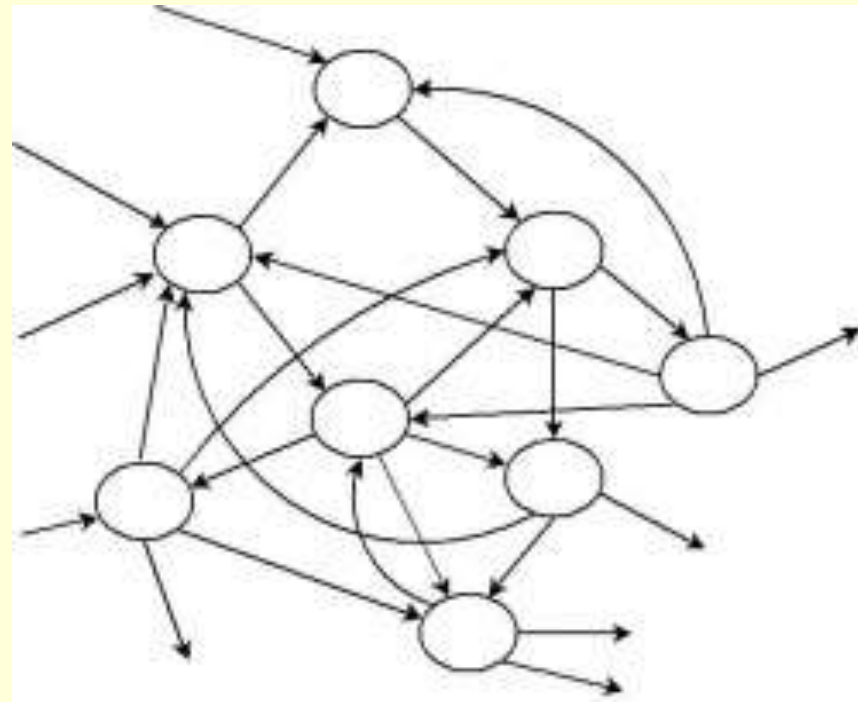
“The brain is decidedly not a primarily feed-forward system.”

- Michael Anderson,
Precis of After Phrenology

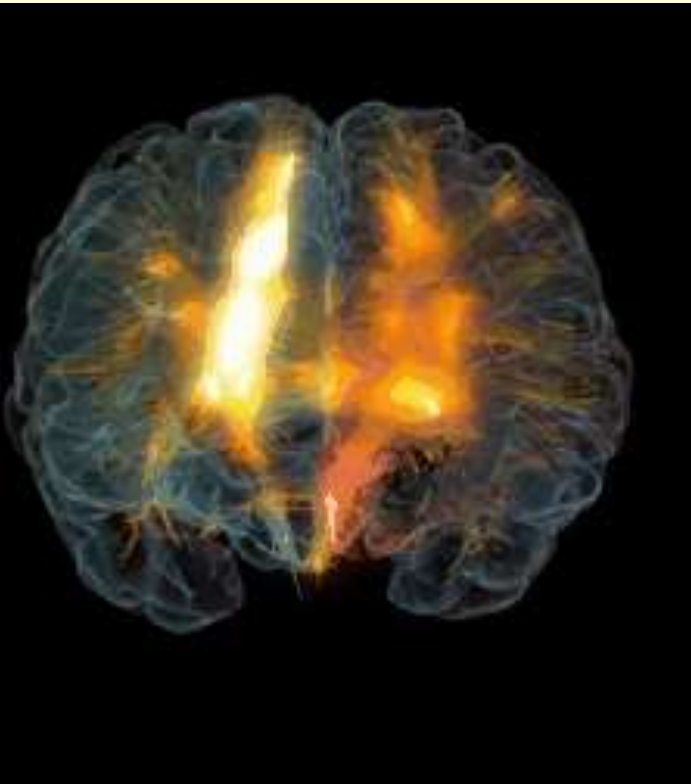


Et les organismes ne sont pas des récepteurs passifs de stimulations environnementales.

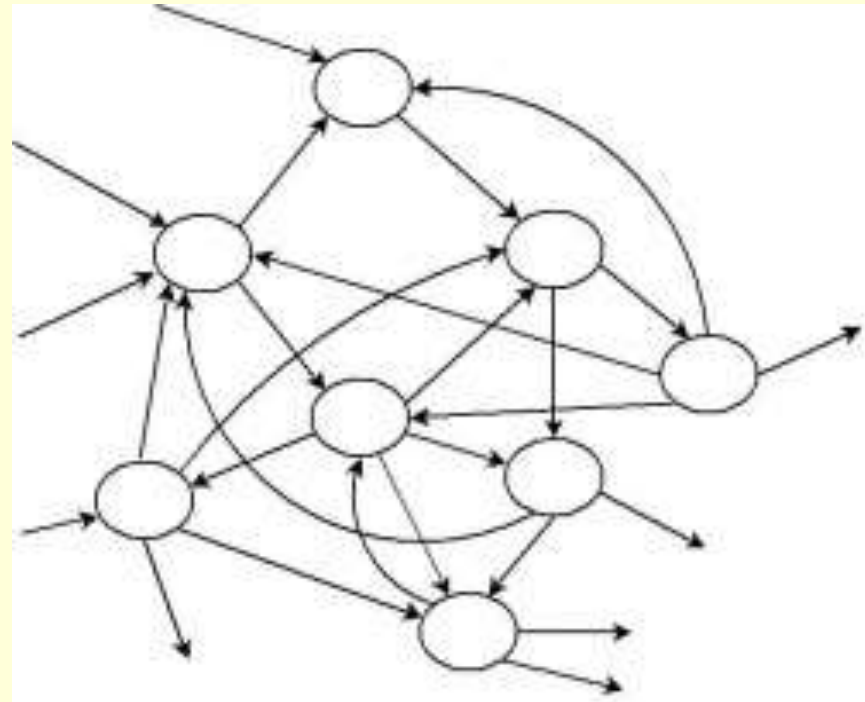
En fait, **ces patterns changeants de l'activité endogène vont influencer constamment les activations induites par le monde extérieur,** comme on va le voir dans un instant...



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



[je vais expliquer cette
animation dans un instant...]



“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]

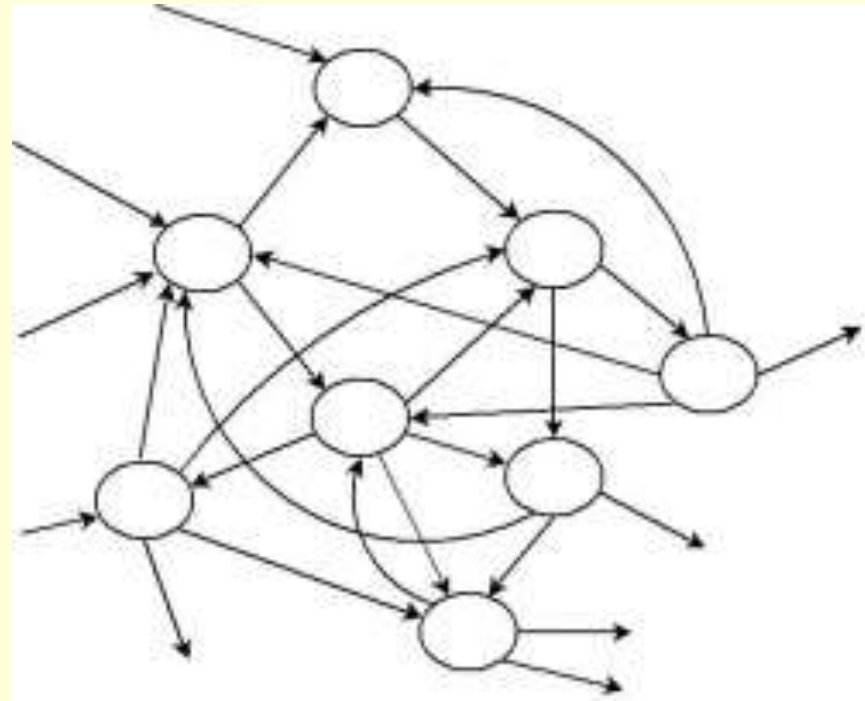


- Michael L. Anderson

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>



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

[traduction libre]

- Michael L. Anderson

The Dynamic Brain (2011)

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

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

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

[traduction libre]

- H. Maturana et F. Varela,

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



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

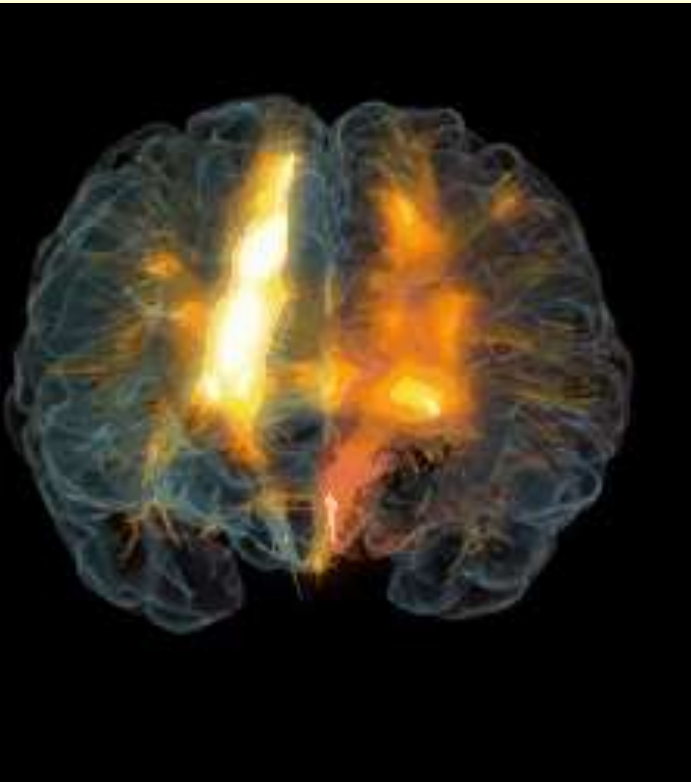
[traduction libre]

- Rodolfo R. Llinás

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

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

Front Cell Neurosci. 2014; 8: 320.



Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

Électroencéphalogramme;

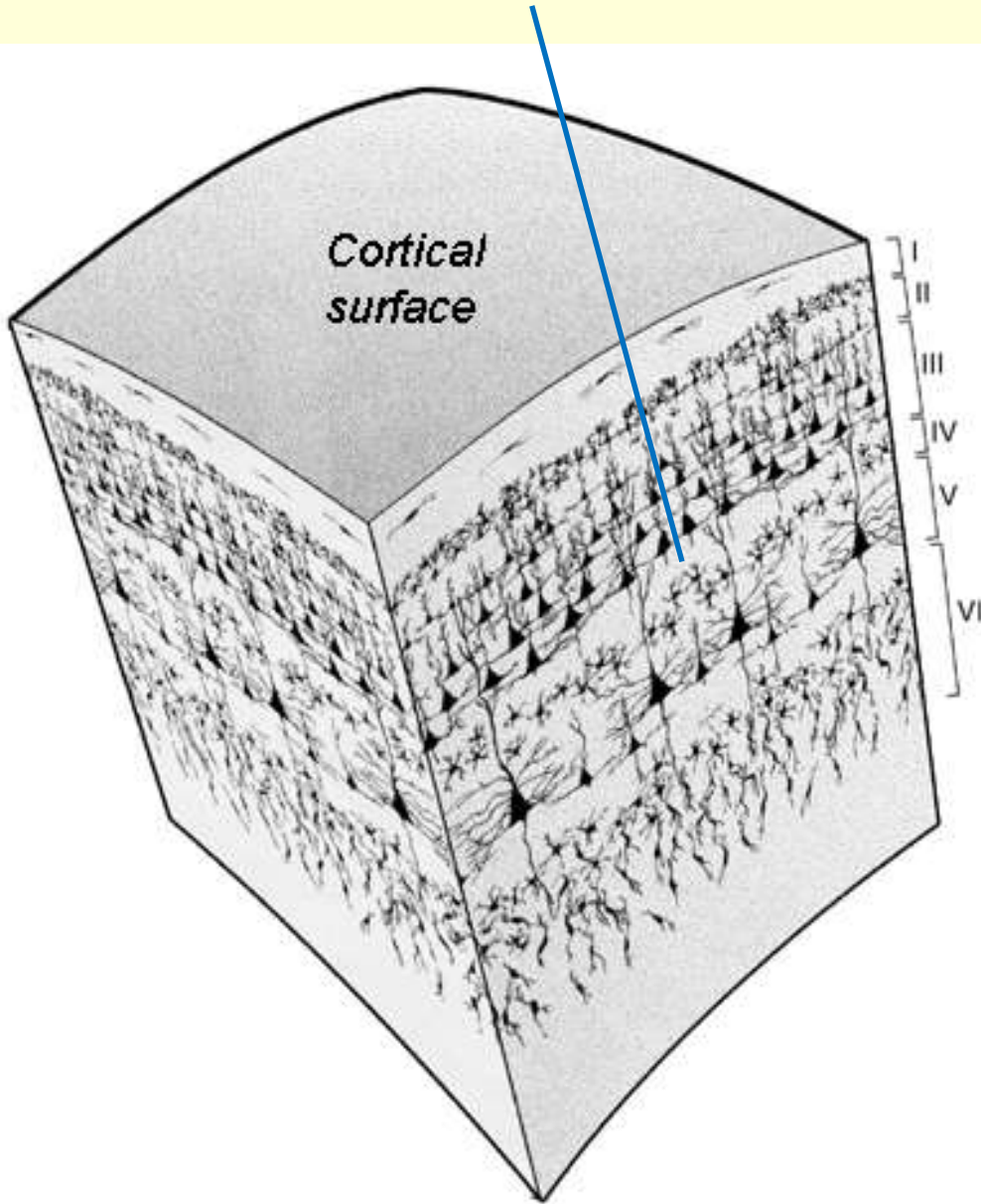
Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique

B- Éveil, sommeil et rêve



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

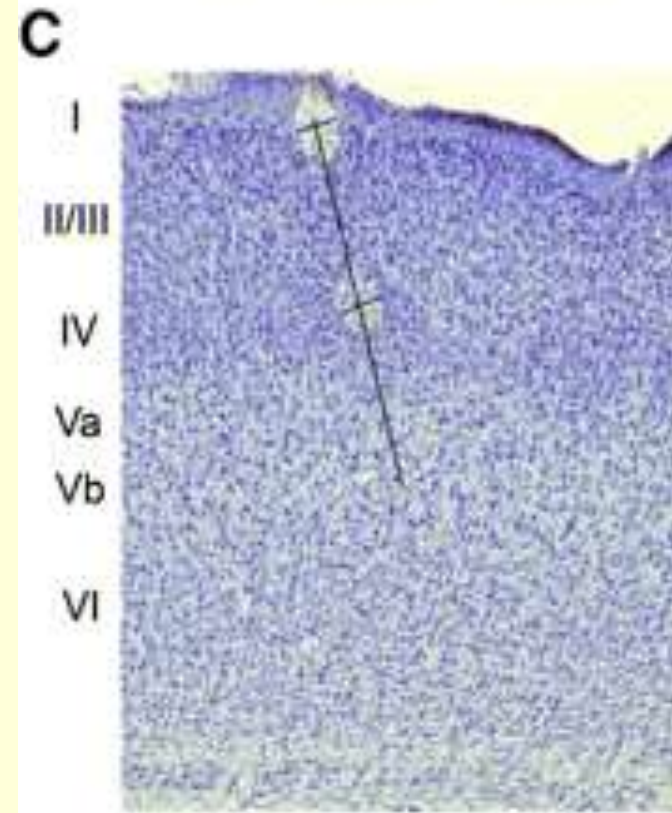
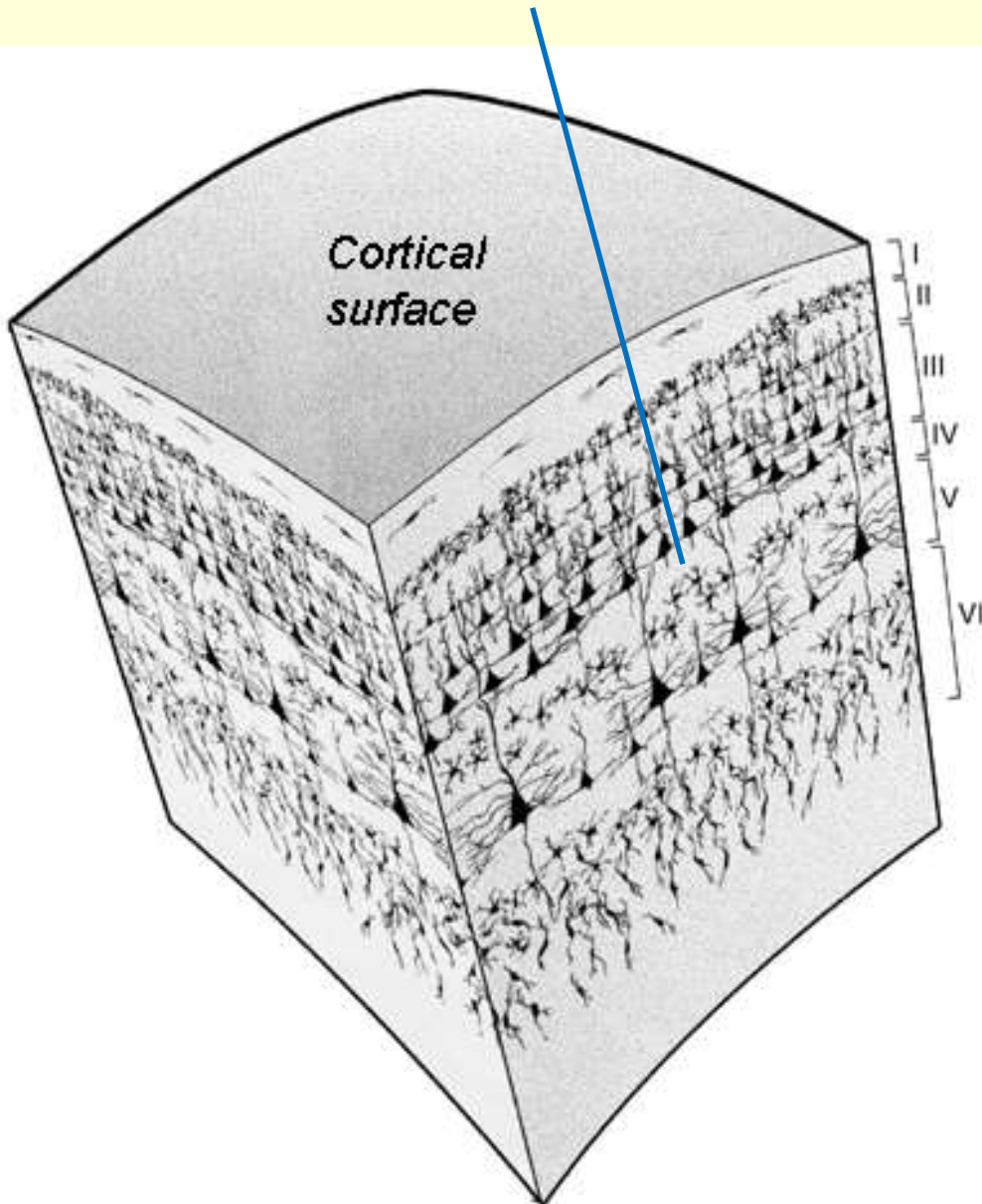


**Enregistrer cette activité
électrique du cerveau
pose de grands défis.**

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 !**

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



Front. Neurosci., **2008**
**Feature selectivity of the
gamma-band of the local field
potential in primate primary
visual cortex**

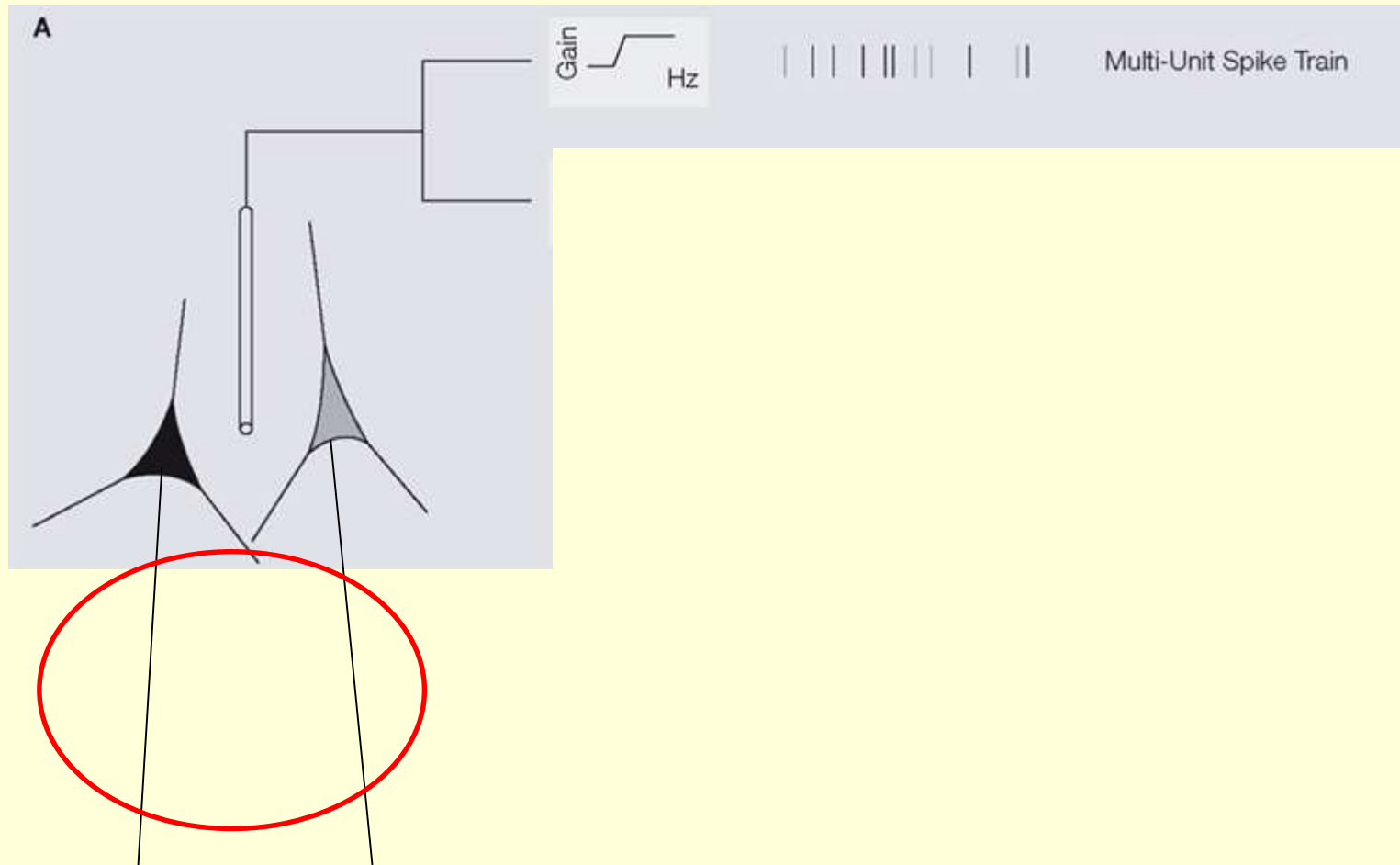
[Philipp Berens](#)^{1,2}, [Georgios A. Keliris](#)¹, [Alexander S. Ecker](#)^{1,2}, [Nikos K. Logothetis](#)^{1,3} and [Andreas S. Tolias](#)^{1,2,4,5*}

<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/neuro.01.037.2008/full>

[|http://dx.doi.org/10.3389/neuro.01.037.2008](http://dx.doi.org/10.3389/neuro.01.037.2008)

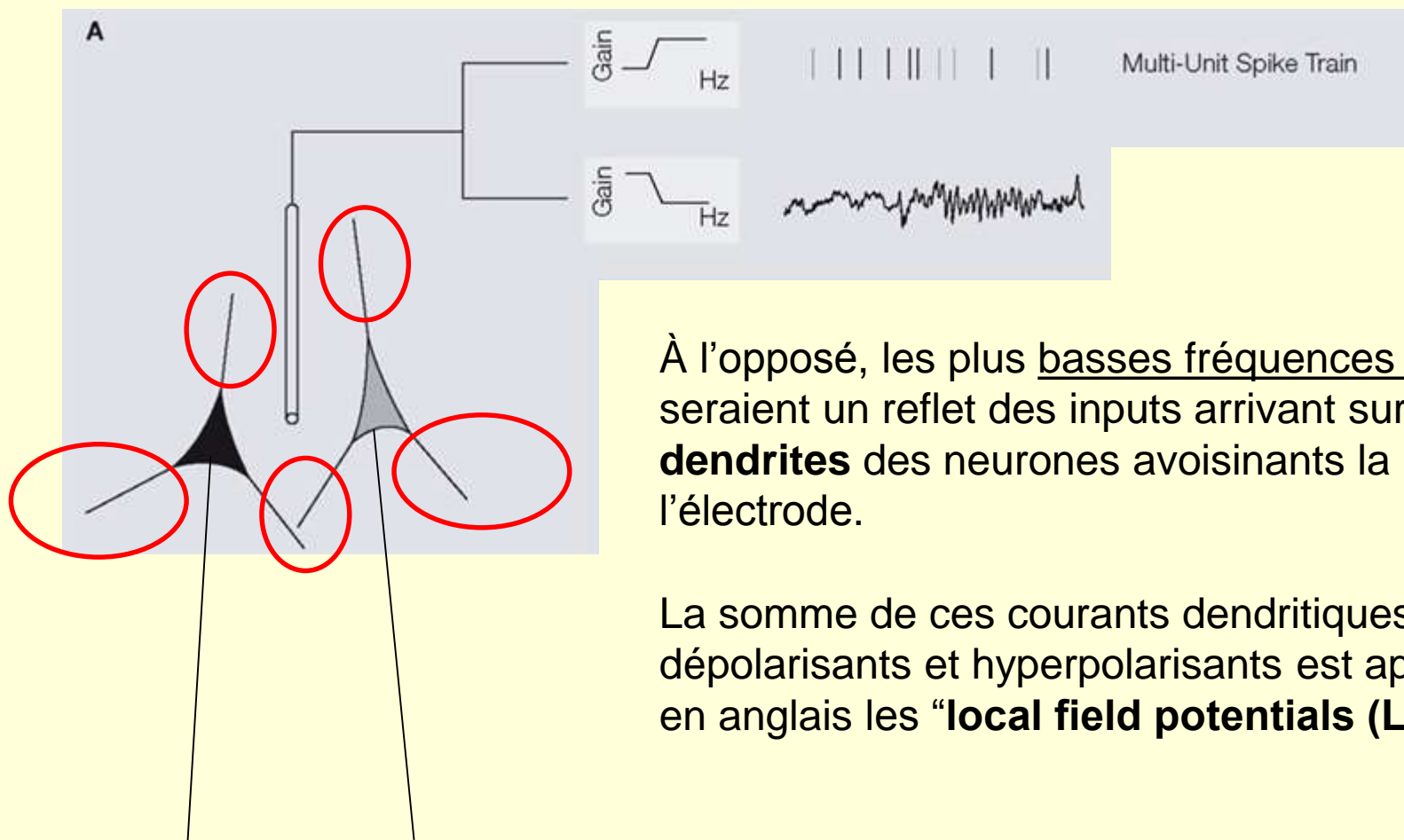
Une électrode extracellulaire placée dans le cerveau mesure l'activité électrique générée par différents phénomènes électrochimiques dans un ensemble de neurones autour de la pointe de l'électrode.

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.



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.

La somme de ces courants dendritiques dépolarisants et hyperpolarisants est appelé en anglais les "**local field potentials (LFP)**".

Ce qu'on peut aussi dire de manière générale, c'est que les LFPs ont des signature de **fréquence distinctes** selon les régions cérébrales.

Exemples :

Dans l'**hippocampe** : forts rythme thêta (entre 4 et 10 Hz) considérés comme essentiels au codage temporel de l'information et à la plasticité dans ces circuits, ainsi que pour les interactions hippocampe - cortex.

Dans les **régions sensori-motrice du cortex** : oscillations prononcées entre 15 et 30 Hz reliées à la planification et à la préparation motrice.

Dans le **cortex visuel primaire** : des oscillations rapides dans la bande gamma entre 30 et 90 Hz dominant durant une stimulation visuelle.

Ce qu'on peut aussi dire de manière générale, c'est que les LFPs ont des signatures de **fréquence distinctes** selon les régions cérébrales.

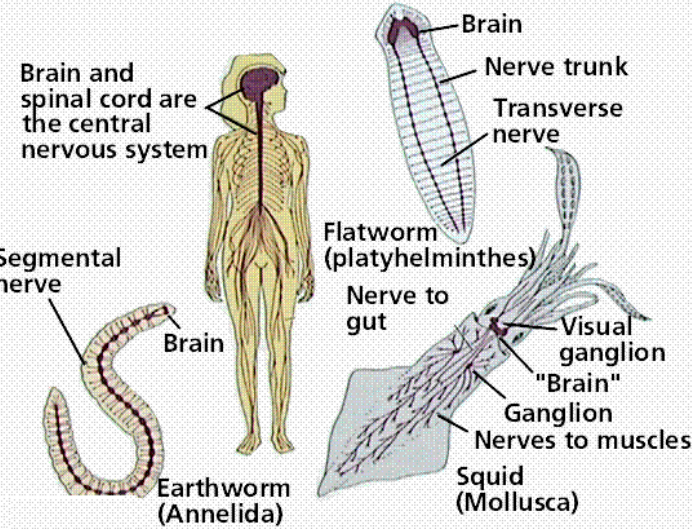
Exemples :

Dans l'**hippocampe** : forts rythme thêta (entre 4 et 10 Hz) considérés comme essentiels au codage temporel de l'information et à la plasticité dans ces circuits, ainsi que pour les interactions hippocampe - cortex.

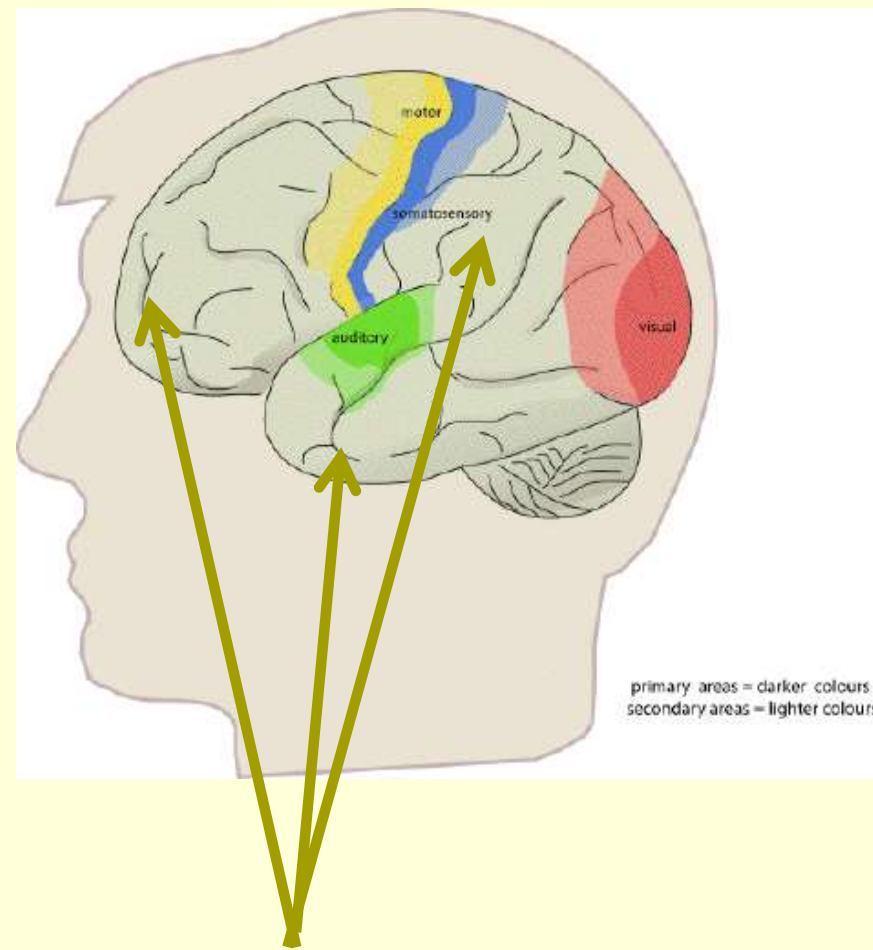
Dans les **régions sensori-motrice du cortex** : oscillations prononcées entre 15 et 30 Hz reliées à la planification et à la préparation motrice.

Dans le **cortex visuel primaire** : des oscillations rapides dans la bande gamma entre 30 et 90 Hz dominant durant une stimulation visuelle.

→ Et l'on commence à se rendre compte que ces différentes fréquences basses ou élevées **s'organisent spatialement** dans le cortex selon une logique particulière...



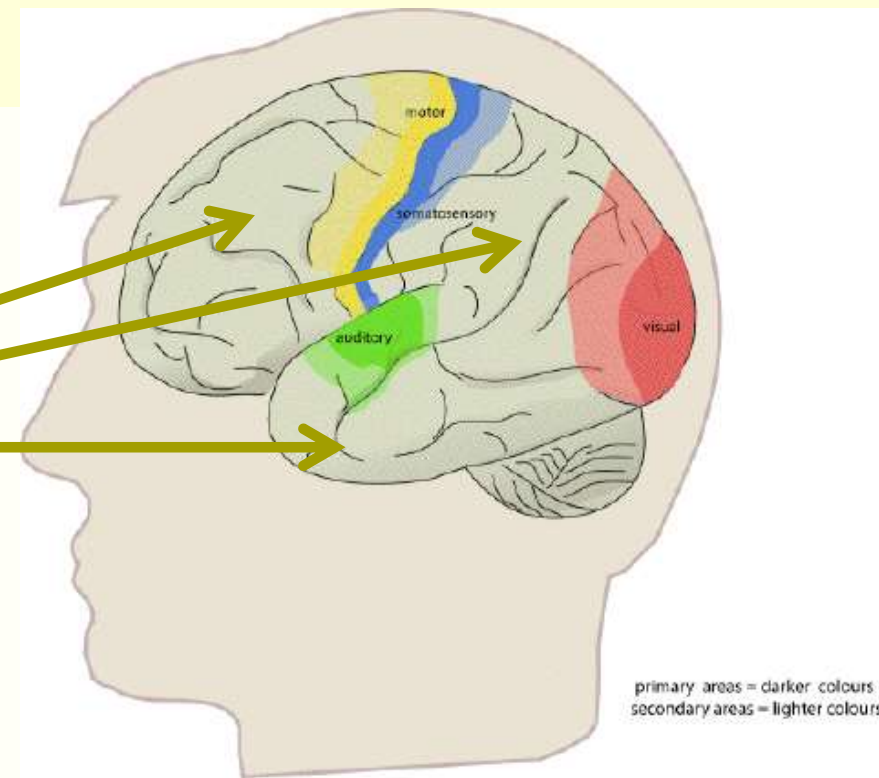
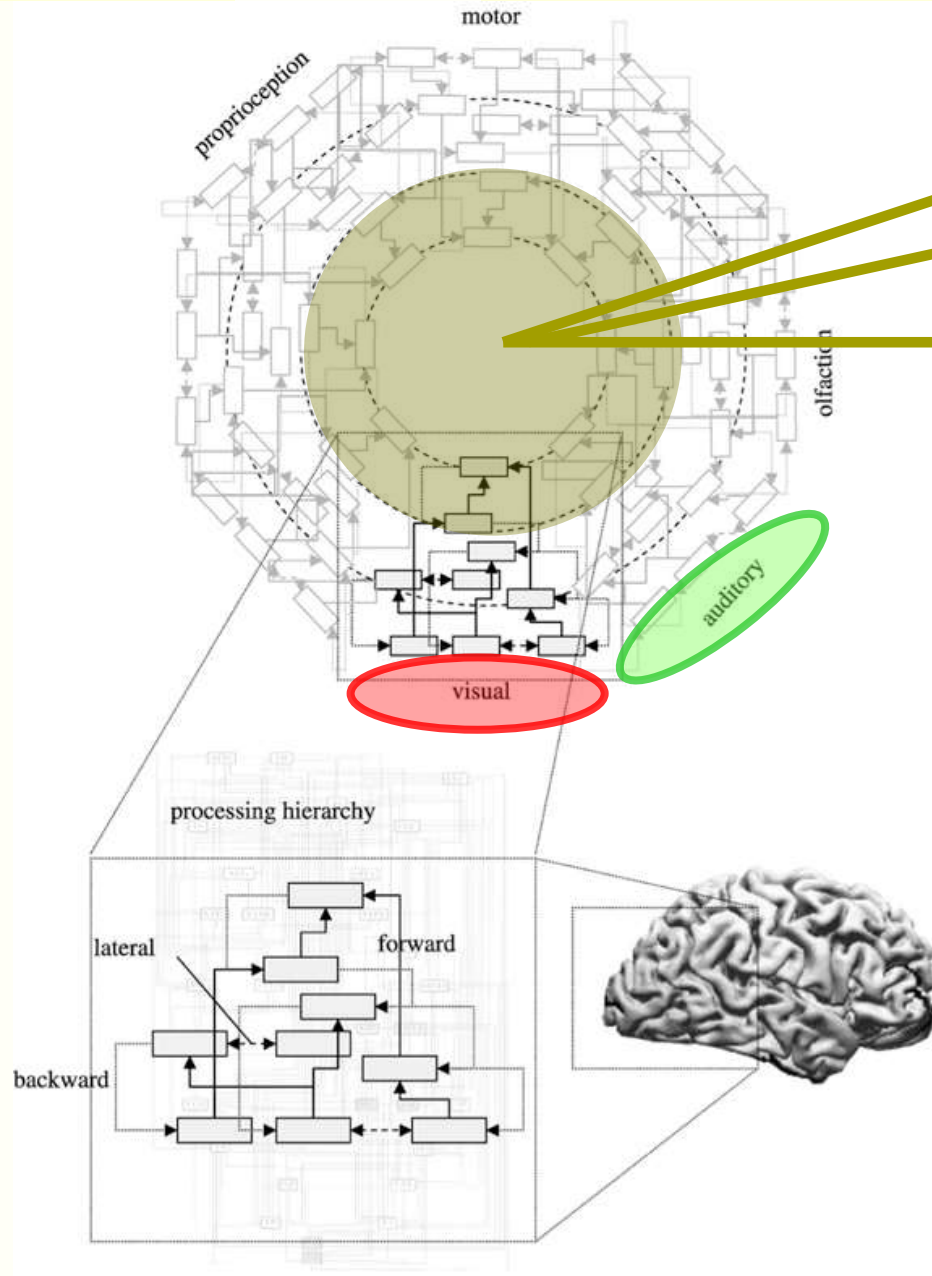
Comme le système nerveux de tous les animaux, on a vu que le cerveau humain est construit sur à partir de la boucle **perception – action**.

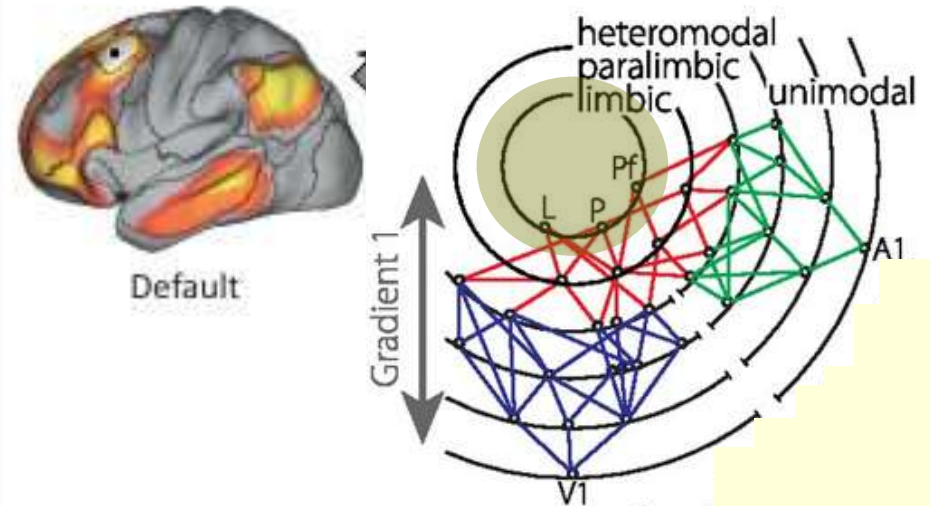
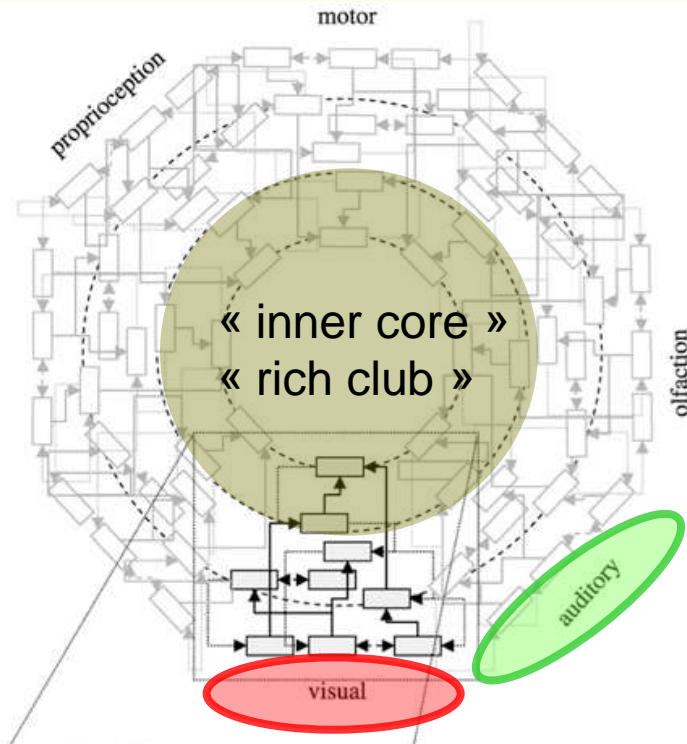


Mais la plus grande partie du cortex humain va essentiellement **moduler cette boucle**.



Autre façon de représenter le cortex :





Mardi, 6 février 2018

Nos réseaux cérébraux s'inscrivent dans un gradient « unimodal – multimodal »

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2018/02/06/7097/>

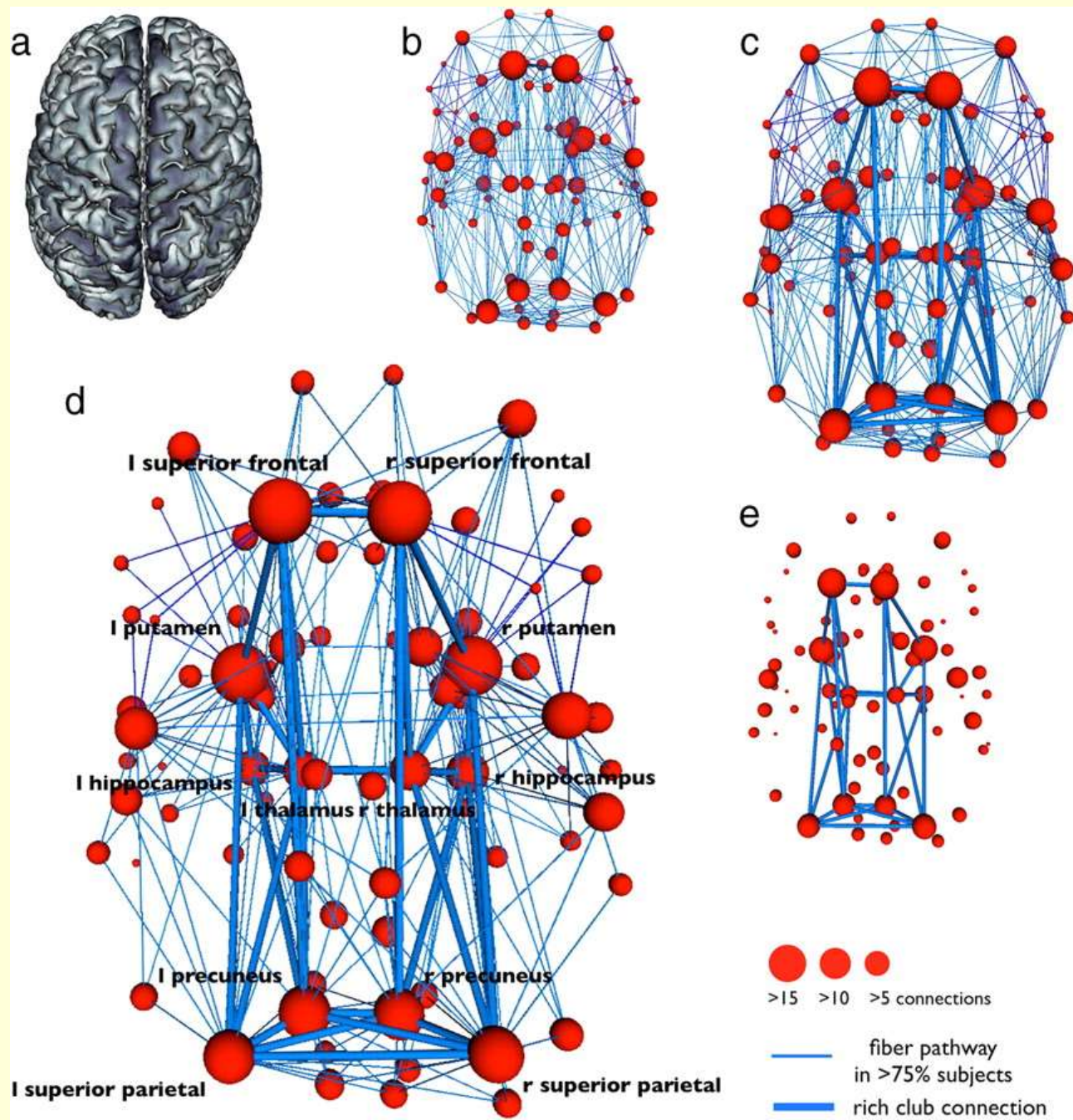
Rich-Club Organization of the Human Connectome

Martijn P. van den Heuvel
and Olaf Sporns

Journal of Neuroscience
2 November 2011

<http://www.jneurosci.org/content/31/44/15775>

“ Here, we demonstrate that brain hubs form a so-called **“rich club,”** characterized by a tendency for high-degree nodes to be **more densely connected among themselves** than nodes of a lower degree, providing important information on the higher-level topology of the brain network.”



Dwelling quietly in the rich club: brain network determinants of slow cortical fluctuations

Leonardo L. Gollo, Andrew Zalesky, R. Matthew Hutchison, Martijn van den Heuvel, and Michael Breakspear

19 May 2015

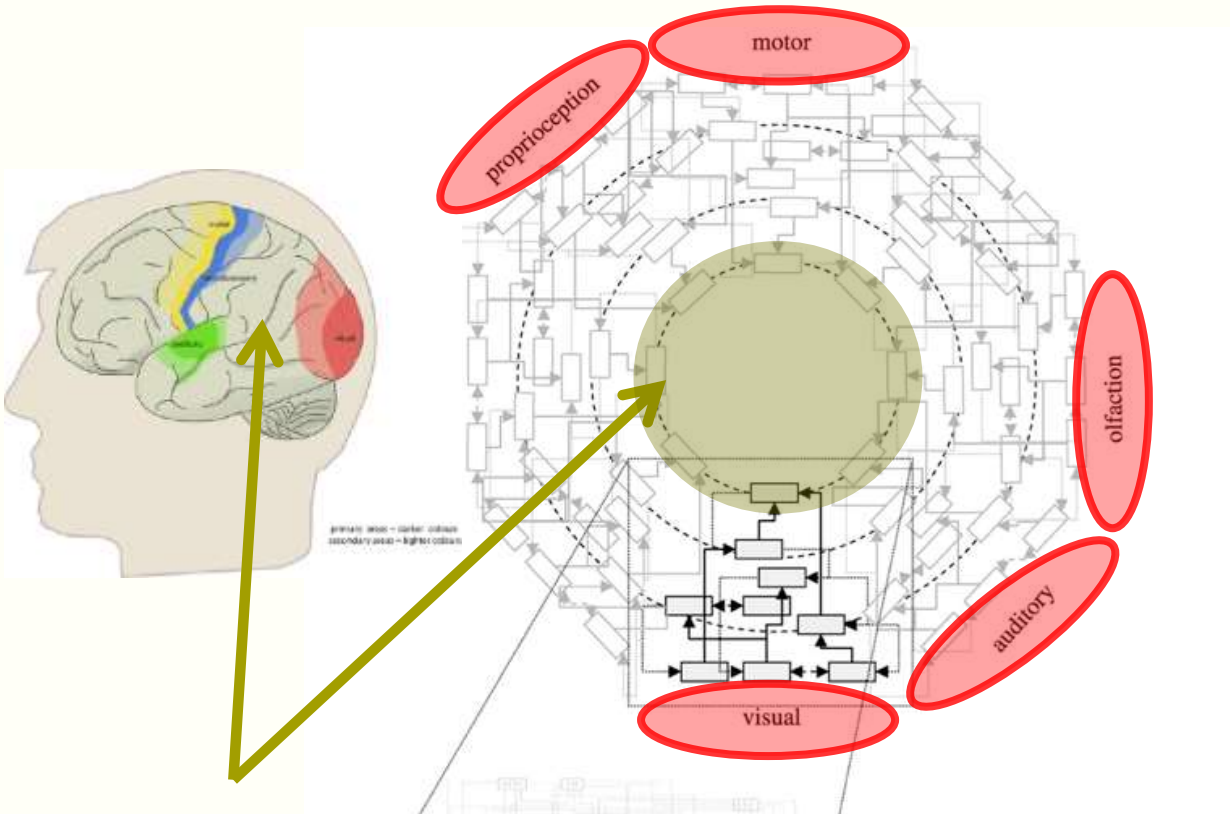
https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2014.0165?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rfr_dat=cr_pub%3Dpubmed&#RSTB20140165F2

“Recent studies, in particular, have highlighted an inner core of the brain, namely a densely interconnected constellation of hub regions called the rich club in human, macaque and even the *Caenorhabditis elegans* brain.”

Plus grande **stabilité** :

« A rich-club member, for example, can remain in the same functional cluster for **several seconds.**”





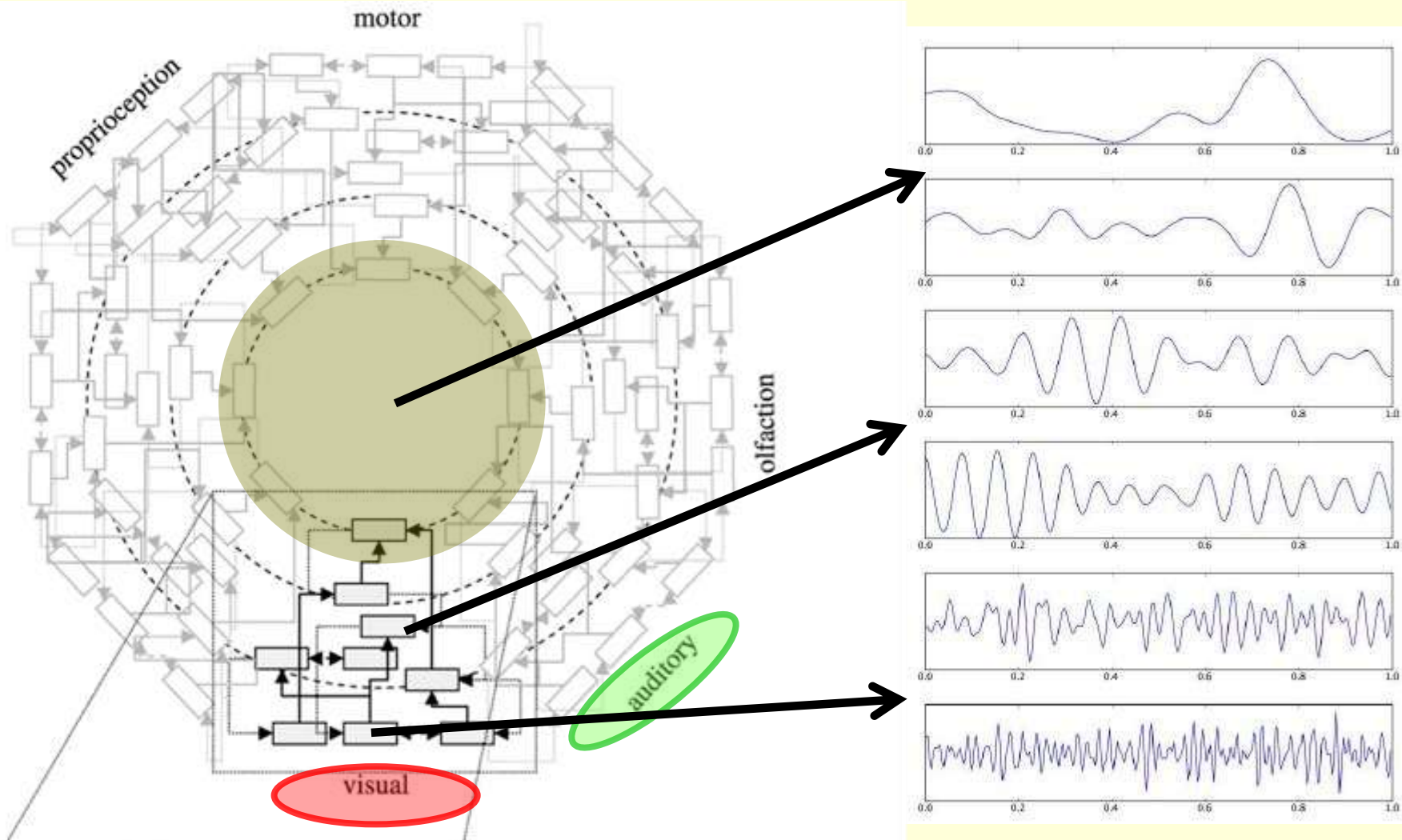
Perception et action devant des situations en temps réel

→ Rythmes **rapides**

Raisonnement, cognition sociale, affects, émotions, etc.

→ Rythmes plus **lents**

→ Épines dendritiques plus nombreuses qui ralentissent la propagation des signaux reçus vers le corps cellulaire ?



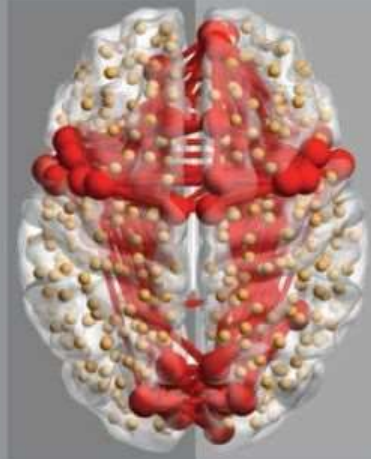
Différents mécanismes responsables de ces différents rythmes:
→ Type de canaux (fast AMPA, slower NMDA, slow kainate, etc.)

La semaine prochaine à la séance #6

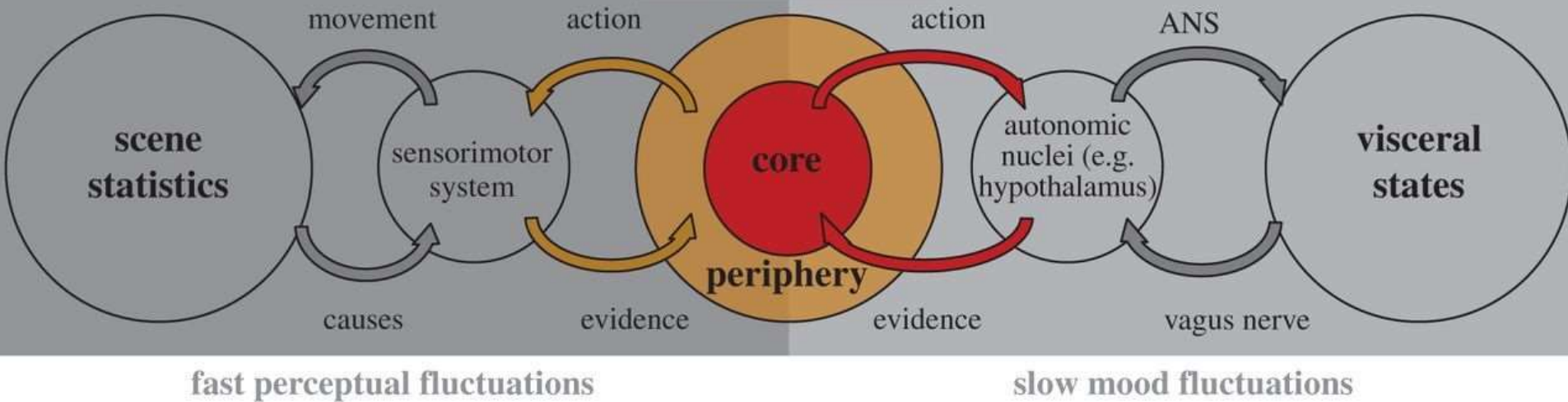
world



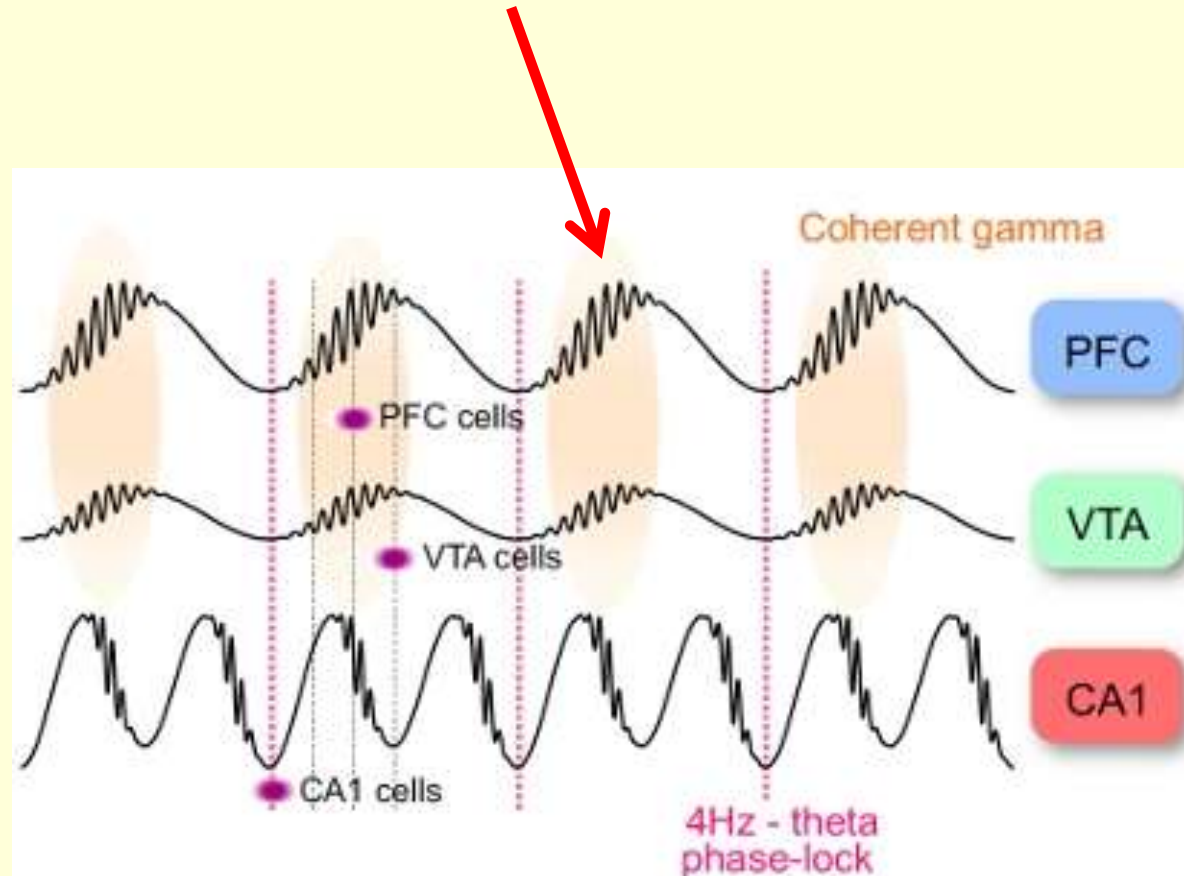
brain



body



Les **oscillations** dans les réseaux de neurones sont aussi capables de couvrir plusieurs bandes de fréquences en même temps, qui peuvent ainsi **se superposer**.



Communication between Brain Areas Based on Nested Oscillations

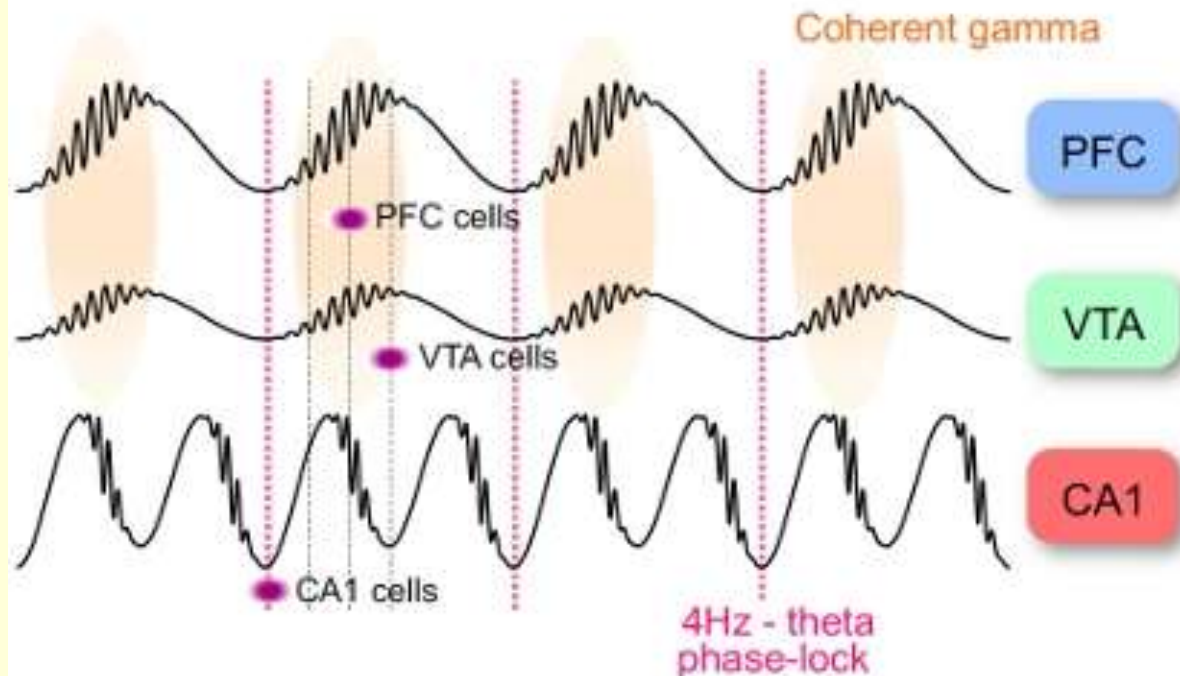
Mathilde Bonnefond, Sabine Kastner and Ole Jensen

eNeuro 10 March 2017, 4 (2)

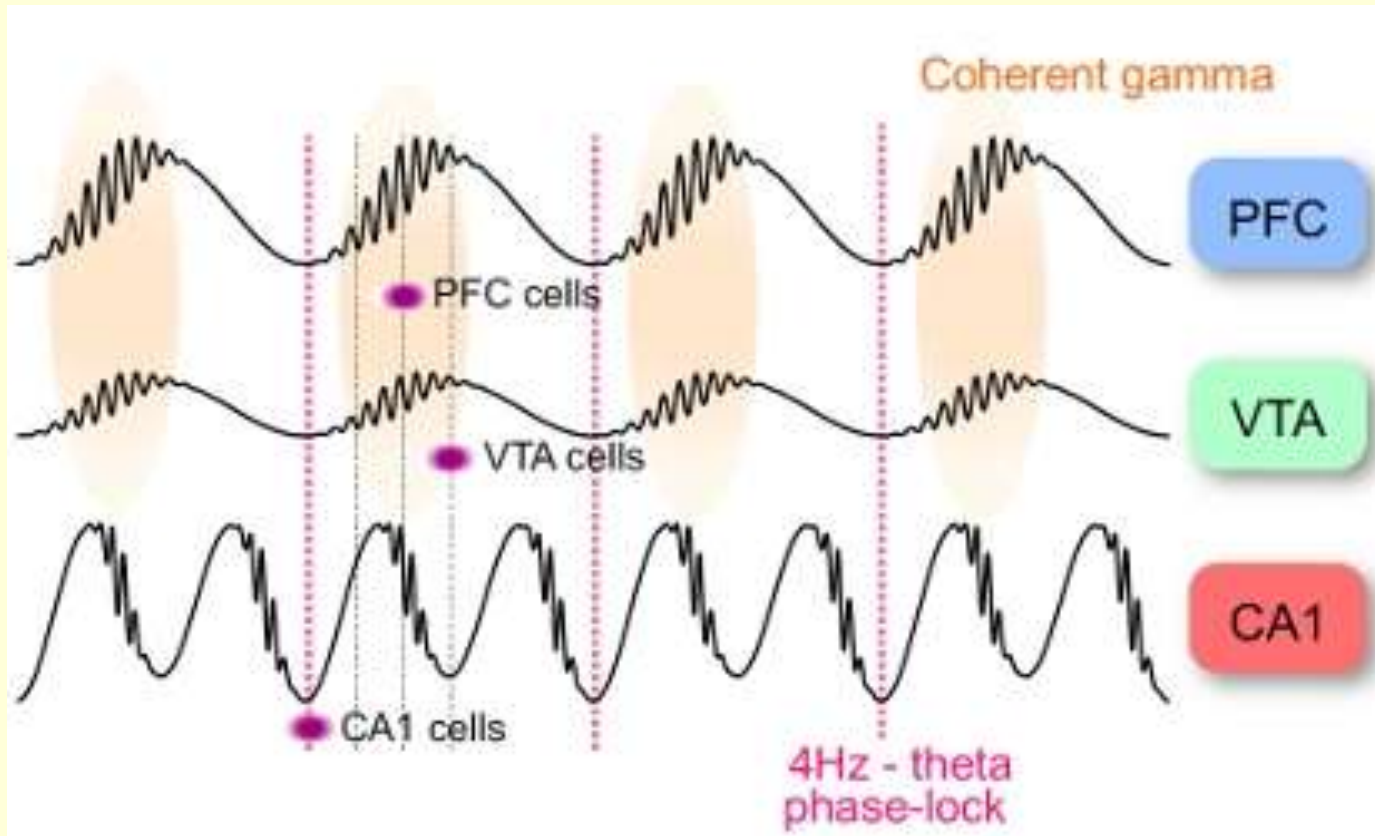
<http://www.eneuro.org/content/4/2/ENEURO.0153-16.2017>

[...] Nous discutons d'une théorie dans laquelle la communication entre deux régions est établie par la synchronisation de phase d'oscillations à **basses fréquences** (<25 Hz), qui servent de cadre de référence temporel pour l'information transporté par l'activité **haute fréquence** (> 40 Hz).

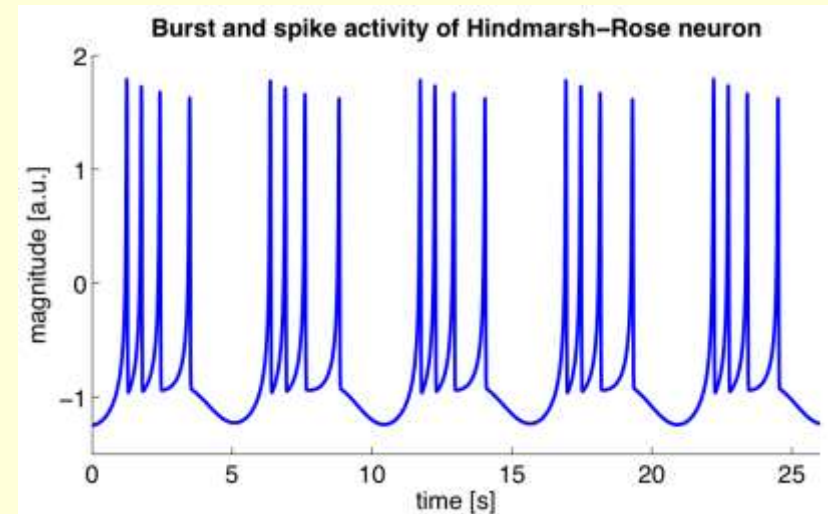
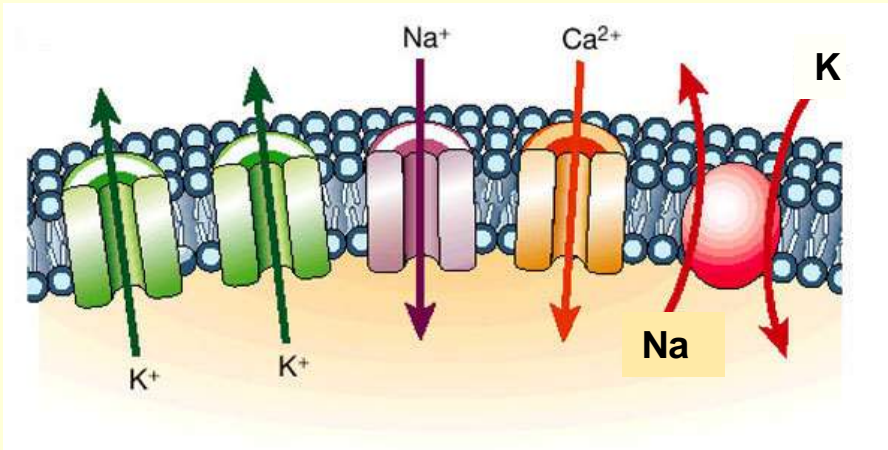
Notre approche, en accord avec de nombreuses découvertes empiriques récentes, postule que les interactions entre fréquences sont essentielles pour comprendre le fonctionnement des réseaux cognitifs et perceptuels à grande échelle.



D'où viennent toutes ces oscillations ?



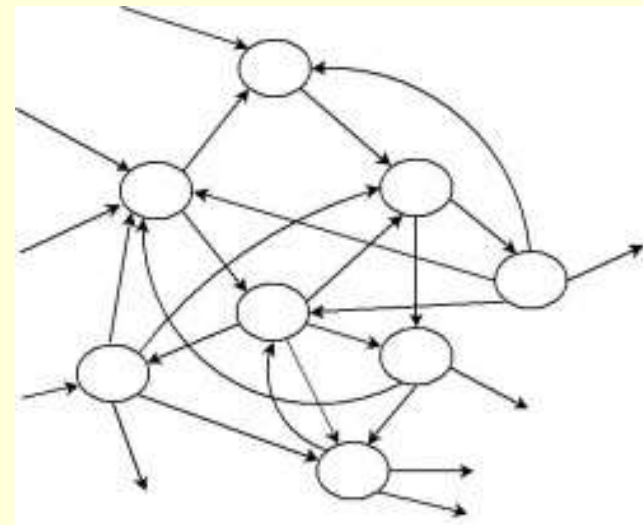
On a vu qu'une première façon de générer des rythmes était par les **propriétés intrinsèque de la membrane** du neurone (« endogenous bursting cells »)



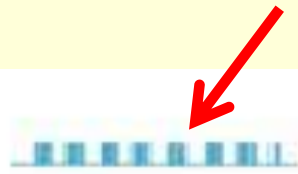
Des rythmes peuvent aussi être générés par les **propriétés du réseau**,

c'est-à-dire par des **boucles**

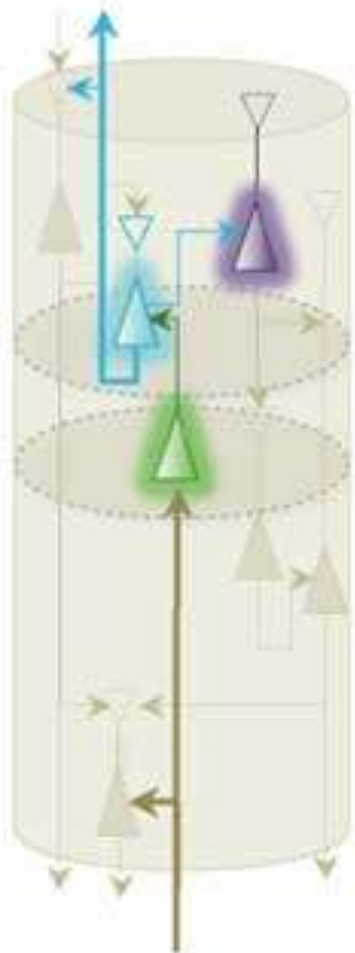
(excitation-inhibition
ou inhibition-inhibition)



b



Temporally organized spike trains

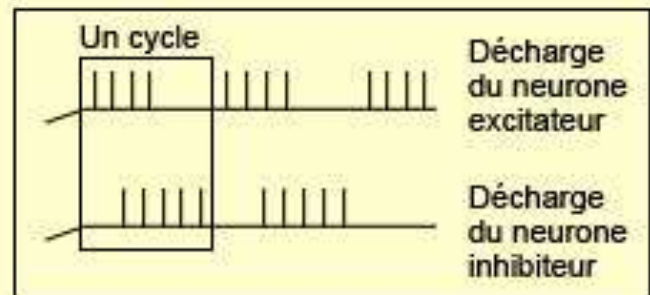
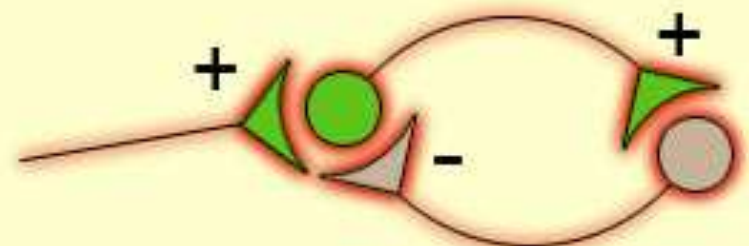
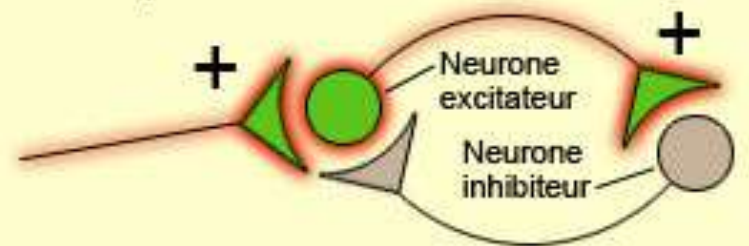


Theta (delta)

Layer IV

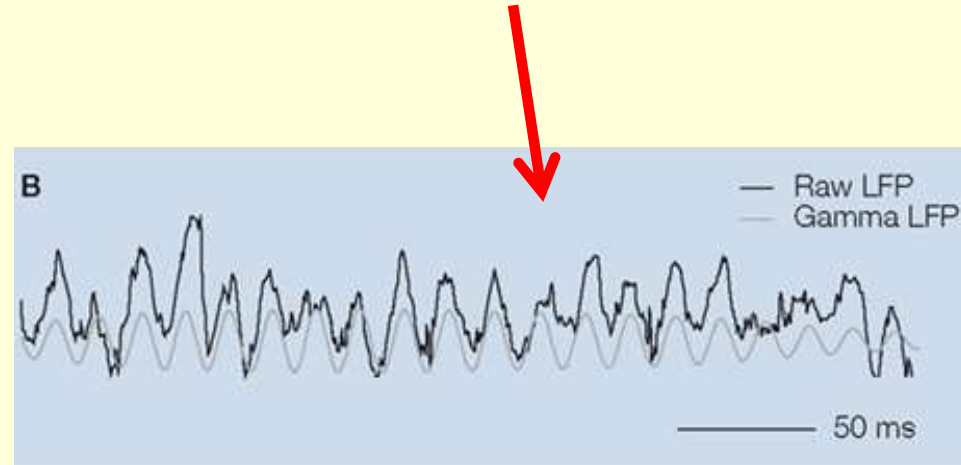
Continuous modulated stimulus-driven spike trains

Afférence excitatrice active en permanence

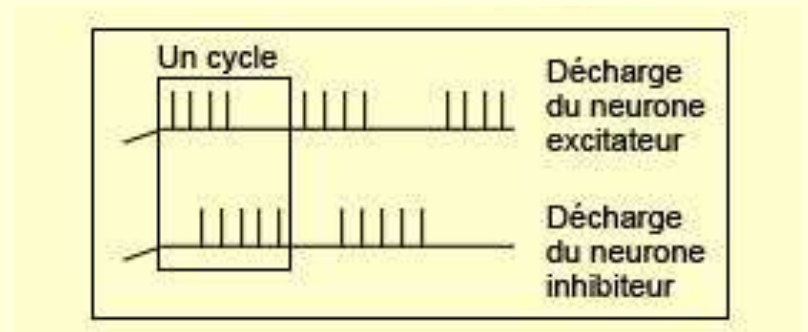


L'équilibre entre l'activité de neurones utilisant des neurotransmetteurs **excitateurs** et **inhibiteurs** est donc primordial pour nos fonctions cognitives car il permet de générer des **patterns d'activité complexes**.

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))



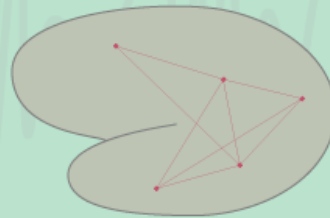
Like a sandpile, the **brain** is balanced at the edge of stability.



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

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

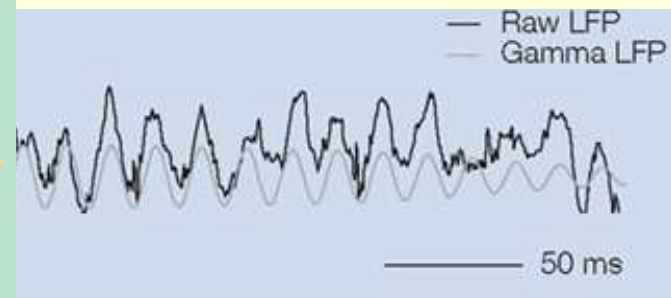
In the critical state, the brain can generate complex **activity** spanning many time scales.



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.

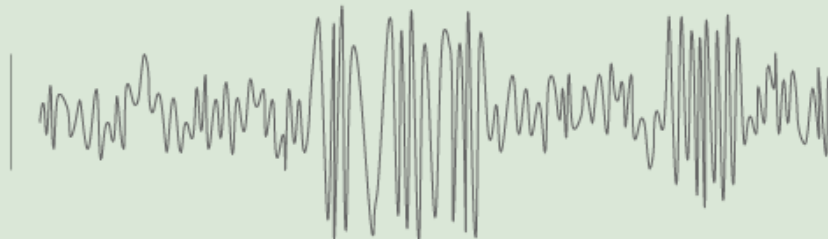


This is analogous to a state of excessive neural **excitation**:

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)

Une étude monitorant l'activité cérébrale de sujets pendant 25 minutes dans une chambre anéchoïque a démontré que ceux qui rapportaient le plus d'hallucinations auditives étaient ceux qui avaient le moins d'activité inhibitrice dans l'ensemble de leur cerveau.

On pense qu'une inhibition plus faible rendrait plus probable l'incorporation de signaux externes dans des images mentales qui peuvent alors prendre une signification.

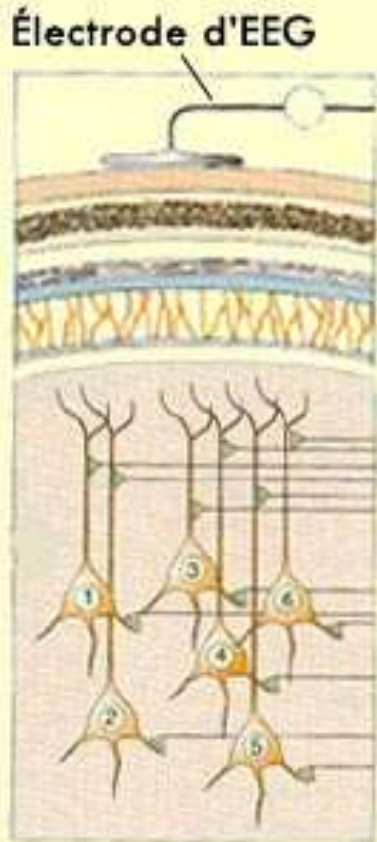


You are hallucinating right now to make sense of the world

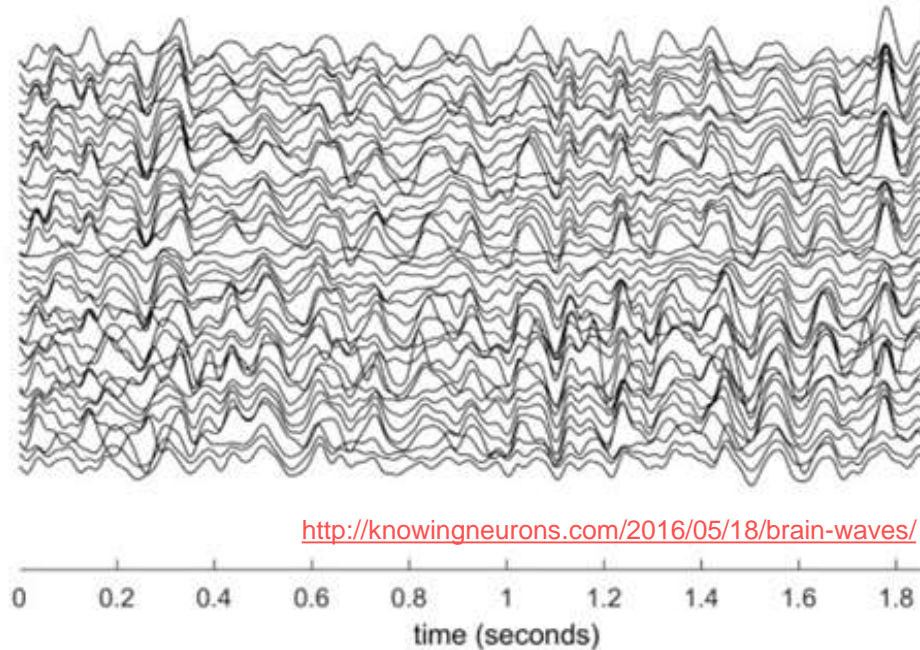
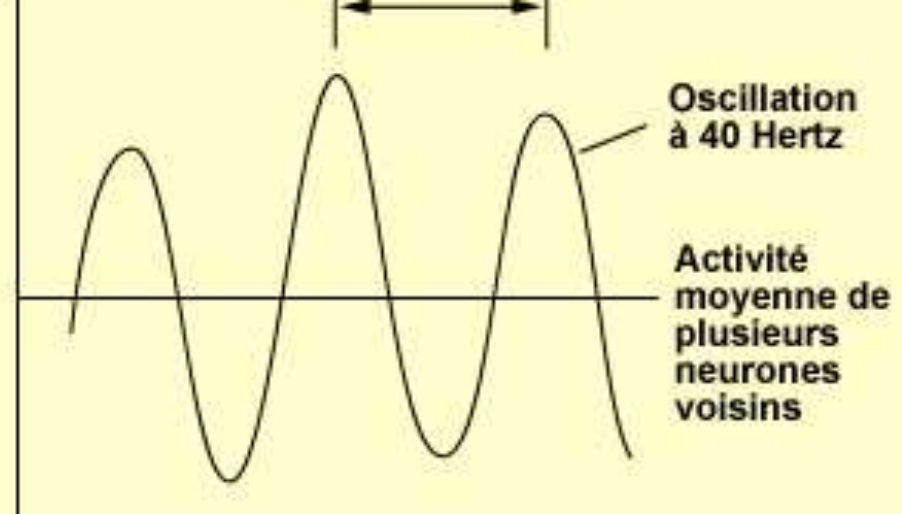
<http://www.proxywhore.com/invboard/index.php?/topic/331678-you-are-hallucinating-right-now-to-make-sense-of-the-world/>

[New Scientist, 2 November 2016]

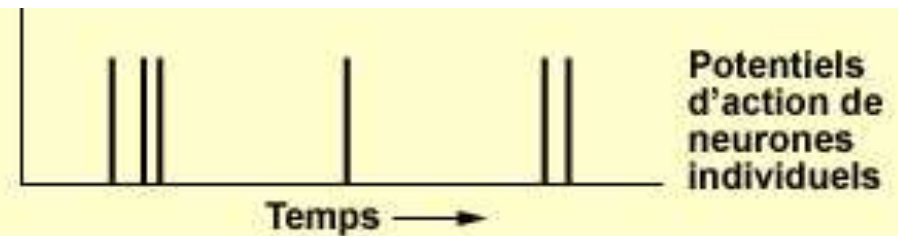
EEG :
niveau « macro »



“Local field potentials” :
niveau « meso »



Potentiels d'action :
niveau « micro »

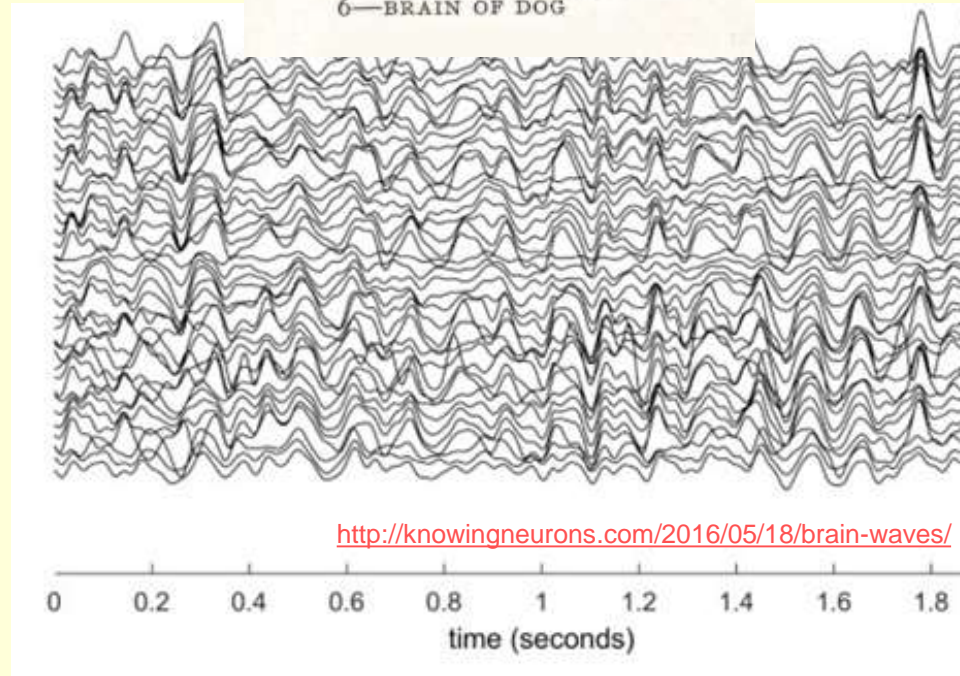
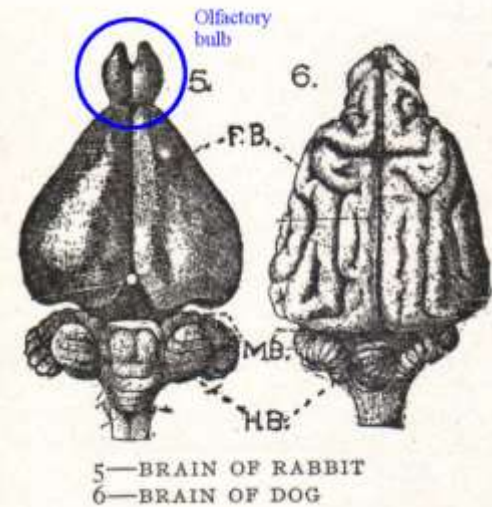
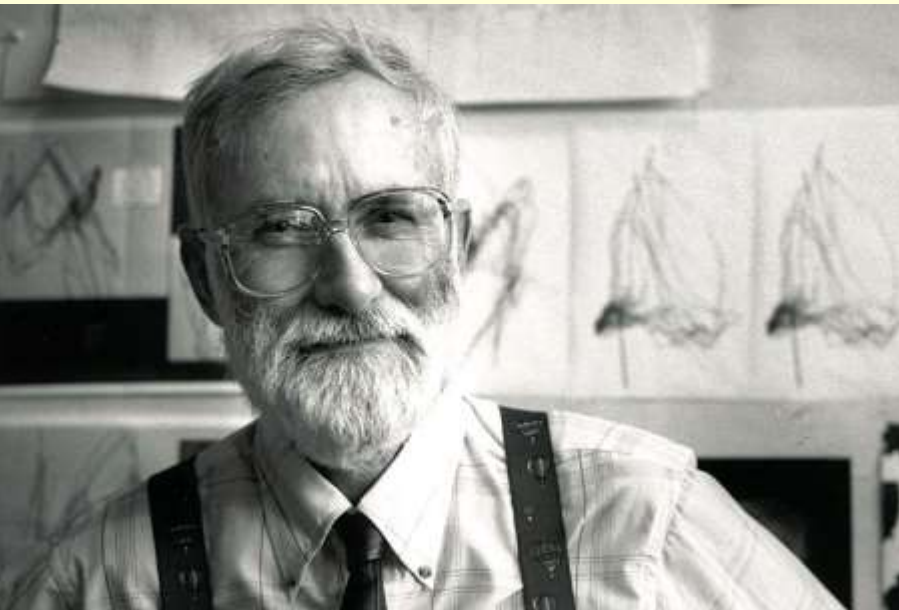


Chaos, Meaning, and Rabbits: Remembering Walter J. Freeman III

15 June 2016

Joel Frohlich

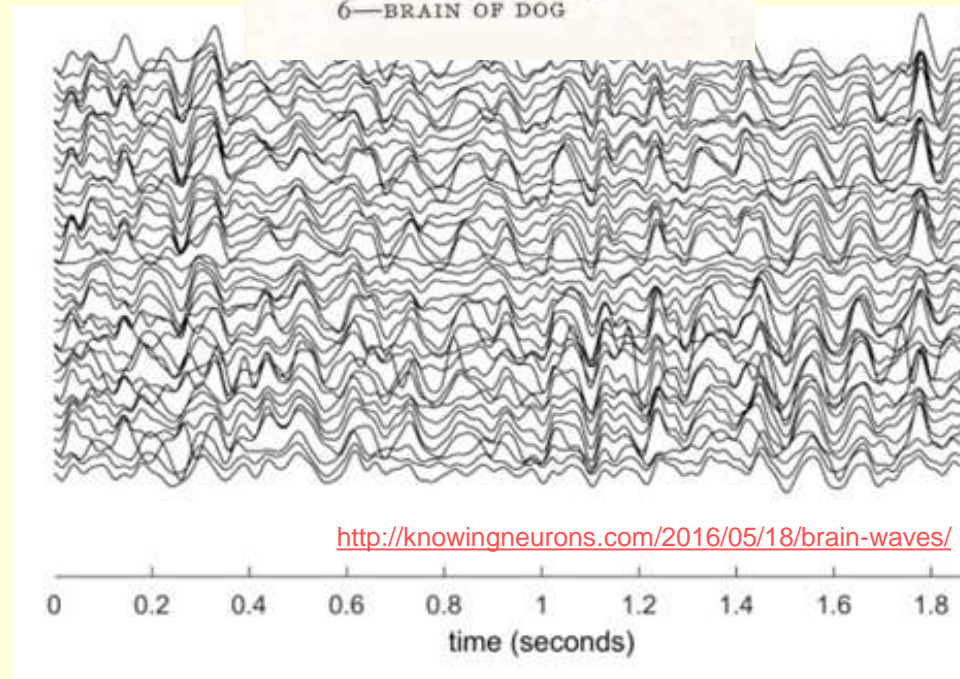
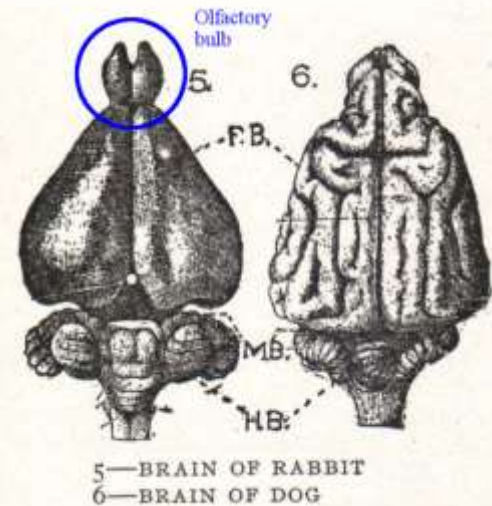
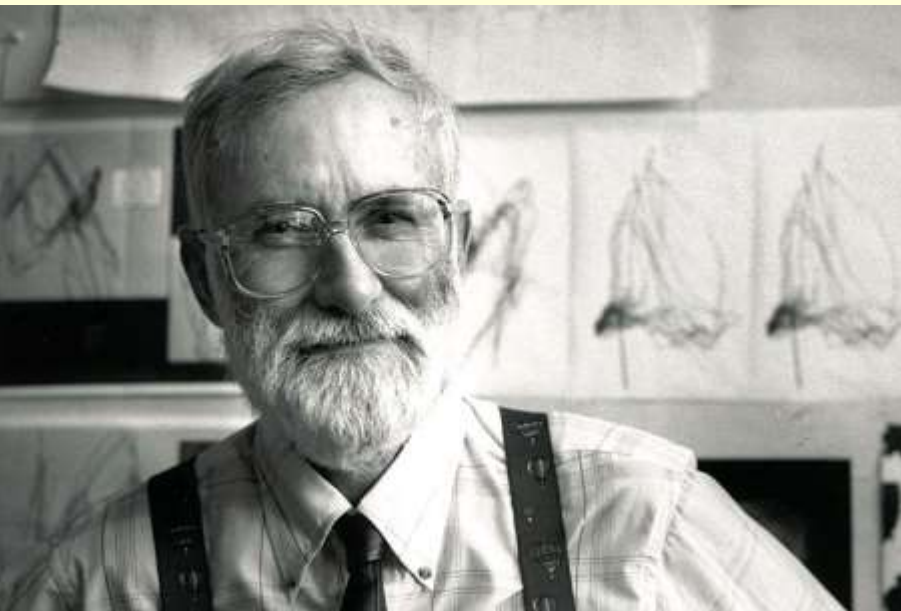
<http://knowingneurons.com/2016/06/15/chaos-meaning-rabbits/>



<http://knowingneurons.com/2016/05/18/brain-waves/>

Pour essayer de comprendre comment le cerveau donne du sens à un stimulus, Freeman a entraîné des **lapins** à répondre à des **odeurs** pendant qu'il enregistrait les patterns d'activité électrique dans le bulbe olfactif.

Parce que la distribution spatiale des patterns d'activité électrique était importante pour la perception des odeurs, Freeman a été l'un des premiers à réaliser que **la perception requiert la "mass action" de milliers ou de millions de neurones.**



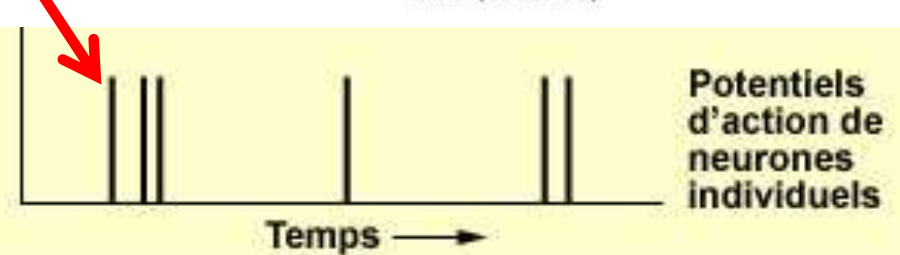
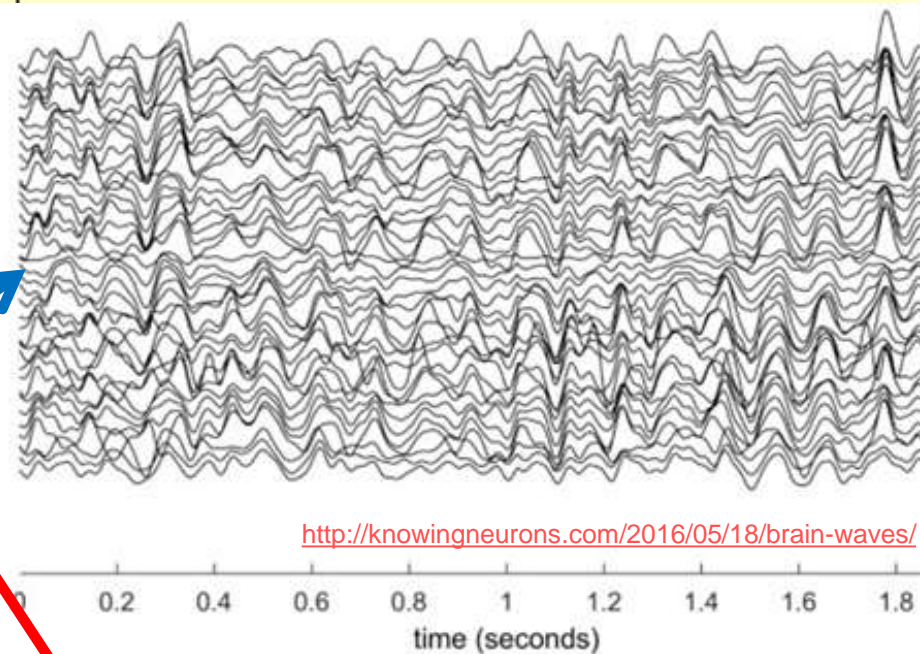
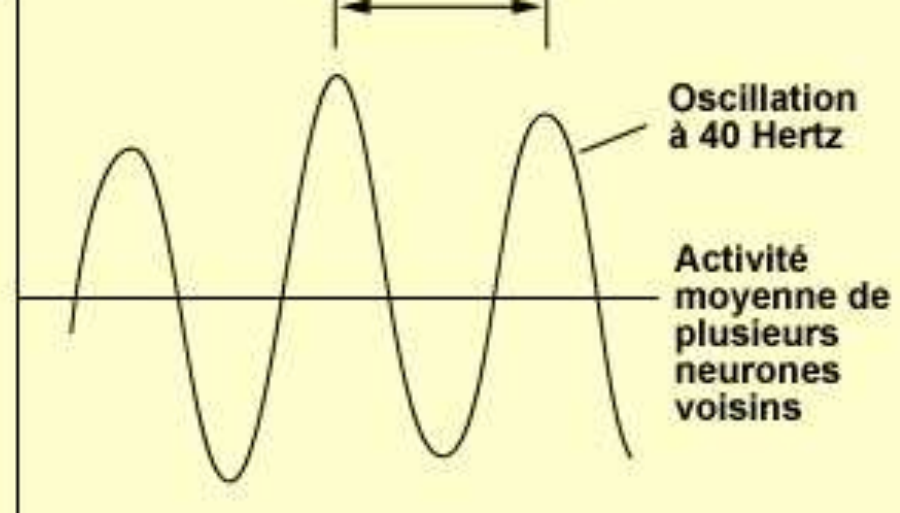
<http://knowingneurons.com/2016/05/18/brain-waves/>

Pour essayer de comprendre comment le cerveau donne du sens à un stimulus, Freeman a entraîné des **lapins** à répondre à des **odeurs** pendant qu'il enregistrait les patterns d'activité électrique dans le bulbe olfactif.

Quand il a commencé sa carrière dans les années 1960, les gens s'intéressaient soit à l'activité globale du cerveau avec l'**EEG**,

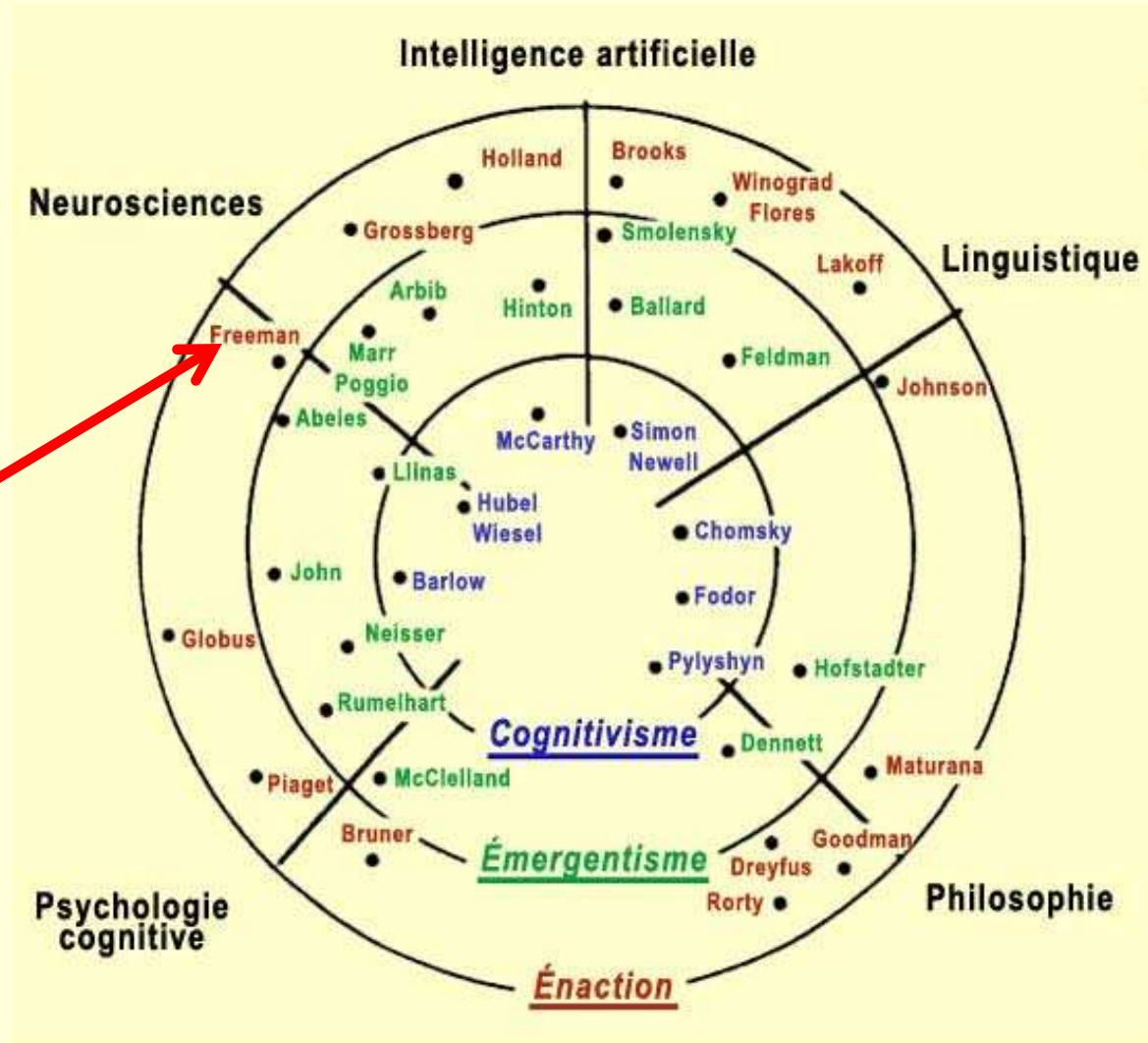
soit aux **potentiels d'action** de neurones isolés.

Freeman va faire le pont entre ces deux extrême en étudiant le cerveau à **l'échelle mésoscopique** avec de multiples petites électrodes.



Pour comprendre la dynamique complexe observée dans le bulbe olfactif, Freeman fonde la “**neurodynamics**”,

un nouveau champ d'étude des **neurosciences computationnelles** qui va faire appel à la physique du chaos et les mathématiques non linéaires pour étudier le cerveau.



Quelques mots sur la physique du chaos...

Freeman's Nonlinear Brain Dynamics and Consciousness

[http://www.ingentaconnect.com/content/imp/jcs/
2018/00000025/f0020001/art00007](http://www.ingentaconnect.com/content/imp/jcs/2018/00000025/f0020001/art00007)

Journal of Consciousness Studies,
Volume 25, Numbers 1-2, **2018**

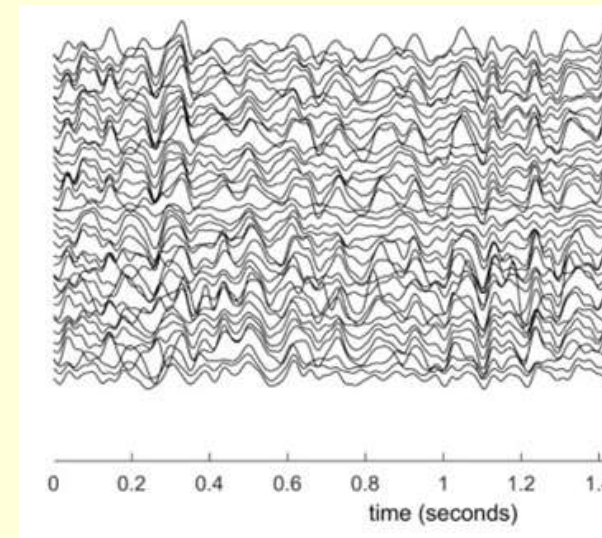
Freeman's Nonlinear **Walter Freeman's** theory of nonlinear neurodynamics has had a **major impact** on brain dynamics in modern cognitive neuroscience. [...]

[Video : Chaos Theory](https://www.youtube.com/watch?v=eJAs9Qr359o)

<https://www.youtube.com/watch?v=eJAs9Qr359o>

Jusqu'au milieu du XXe siècle, on distinguait deux types de phénomènes naturels : les phénomènes aléatoires, qui sont par conséquent imprévisibles, et les phénomènes obéissant à une loi déterministe, qui de ce fait sont prévisibles. Autrement dit, connaissant leurs conditions initiales, on pouvait prédire leur comportement futur.

Or on s'est aperçu que certains systèmes déterministes étaient constitués d'un très grand nombre d'entités en interaction locale et simultanée, ce qui **empêchait** l'observateur de prévoir son comportement ou son évolution par le calcul **linéaire**.

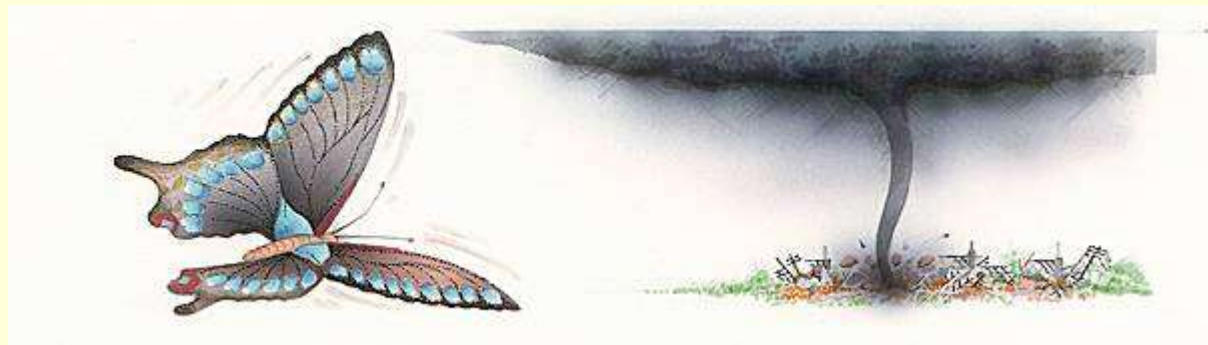


Jusqu'au milieu du XXe siècle, on distinguait deux types de phénomènes naturels : les phénomènes aléatoires, qui sont par conséquent imprévisibles, et les phénomènes obéissant à une loi déterministe, qui de ce fait sont prévisibles. Autrement dit, connaissant leurs conditions initiales, on pouvait prédire leur comportement futur.

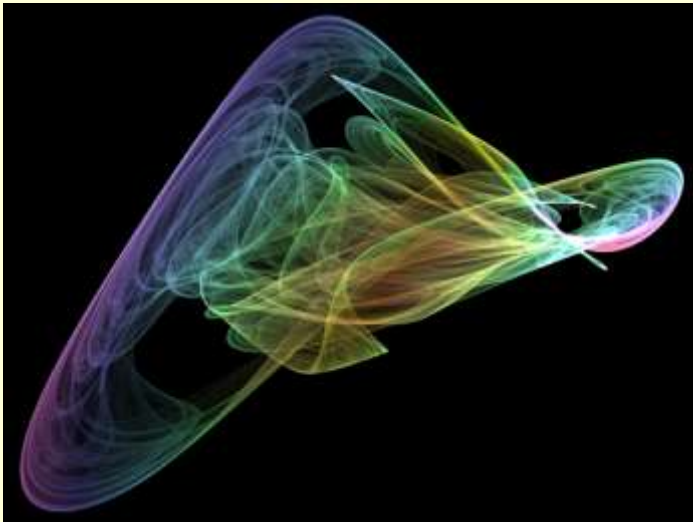
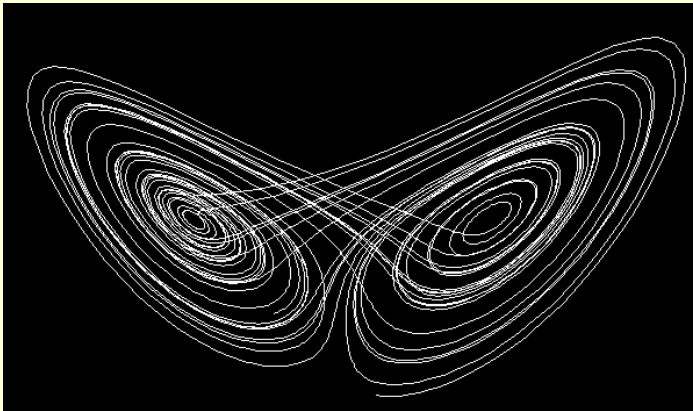
Or on s'est aperçu que certains systèmes déterministes étaient constitués d'un très grand nombre d'entités en interaction locale et simultanée, ce qui **empêchait** l'observateur de prévoir son comportement ou son évolution par le calcul **linéaire**.

Dans ce type de système, une légère modification des conditions initiales de l'état du système décrit pourtant par des lois déterministes peut suffire à rendre imprévisible son comportement. On dit de ces systèmes **sensibles aux conditions initiales** qu'ils sont "**chaotiques**".

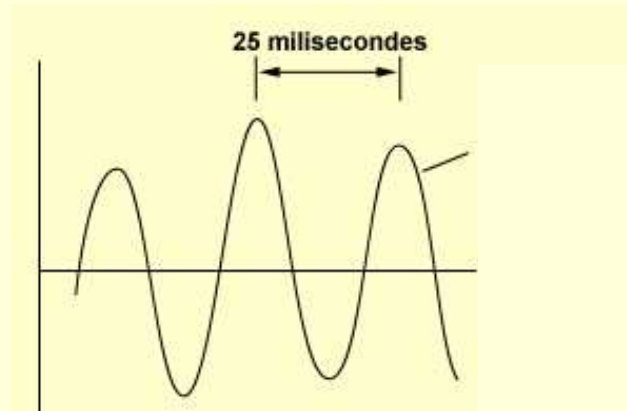
« **L'effet papillon** »



Les grandeurs qui définissent ces systèmes chaotiques, loin de varier dans le temps de manière absolument aléatoire et illimitée, apparaissent confinées, ou si l'on veut «tenues en laisse», par un élément d'ordre appelé **«attracteur étrange»**.



Attention : quand les neurobiologistes parlent d'oscillations cérébrales, on peut être porté à croire qu'il s'agit d'ondes **sinusoïdales parfaites** (ce qui n'est pas le cas évidemment).



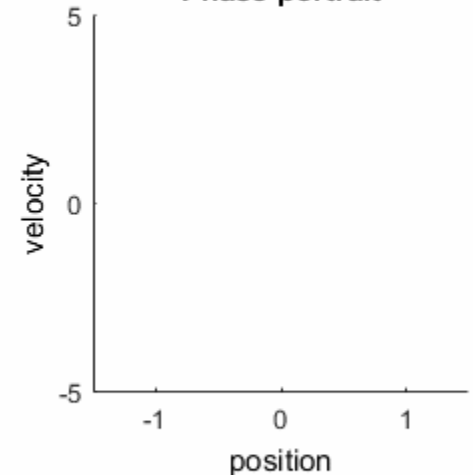
Une telle onde sinusoïdale découle d'un cercle parfait, comme le démontre l'exemple ci-dessous où l'on observe l'évolution cyclique d'un pendule selon sa **position** et sa **vélocité**.

On appelle ce genre de graphe un "**phase portrait**" qui décrit un attracteur, ici toujours l'orbite du cercle.

Simple pendulum



Phase portrait



Si l'on ajoute maintenant simplement un second pendule au premier, sa trajectoire est beaucoup plus complexe. Même si elle répond toujours à de simples équations, son comportement, lui, est difficile à prédire.

C'est un exemple de chaos déterministe.

Si l'on regarde le “**phase portrait**” correspondant, on voit que les lignes ne passent jamais au même endroit tout en traçant un pattern reconnaissable.

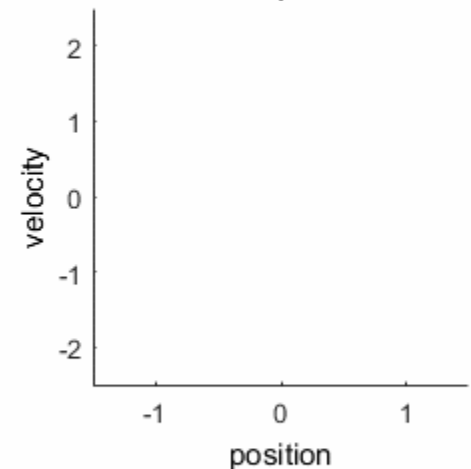
Il s'agit donc d'un attracteur étrange.

Et contrairement au pendule simple, le double pendule va démontrer **différents comportements** selon l'endroit où on commence à le faire osciller, une propriété du chaos déterministe.

Double pendulum



Phase portrait



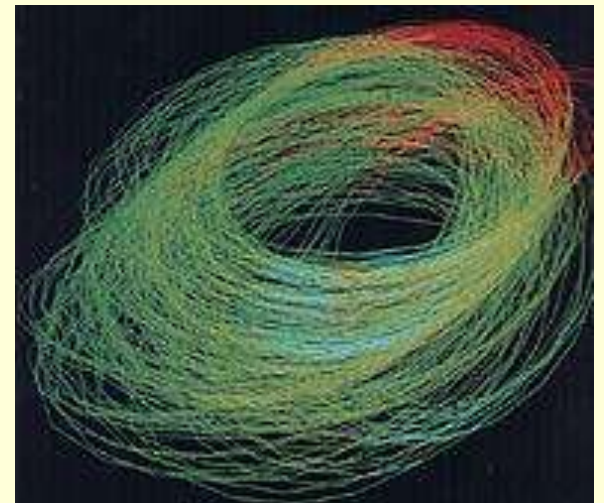
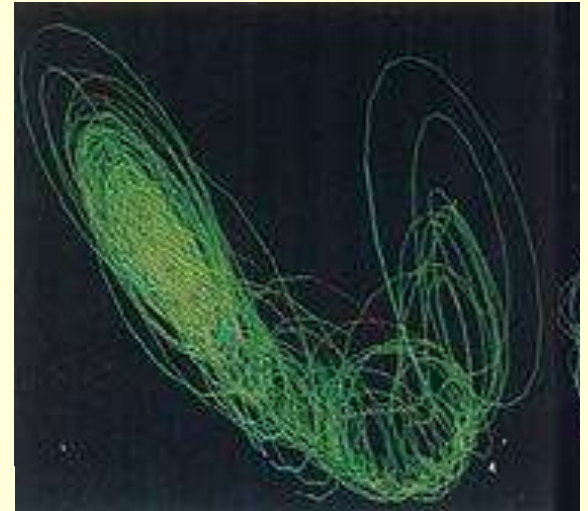
De la même manière, et c'est ce que Freeman a démontré, on peut faire un "**phase portrait**" pour visualiser l'activité simultanée de deux enregistrements électrophysiologiques.

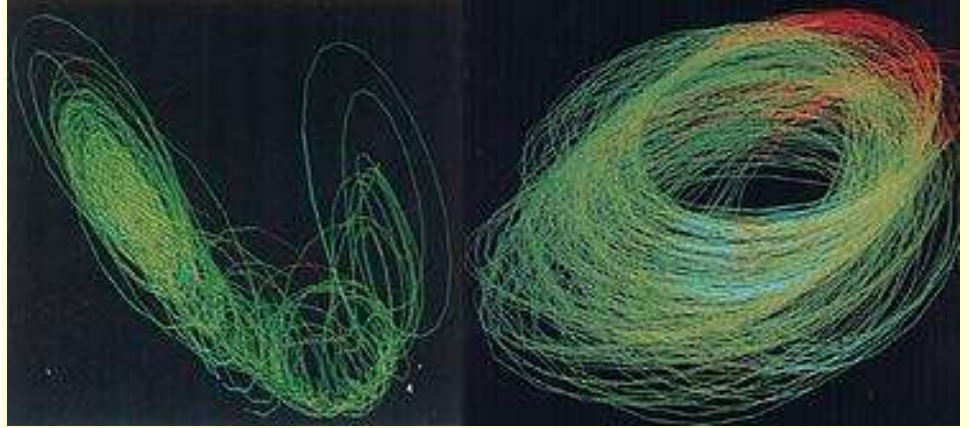
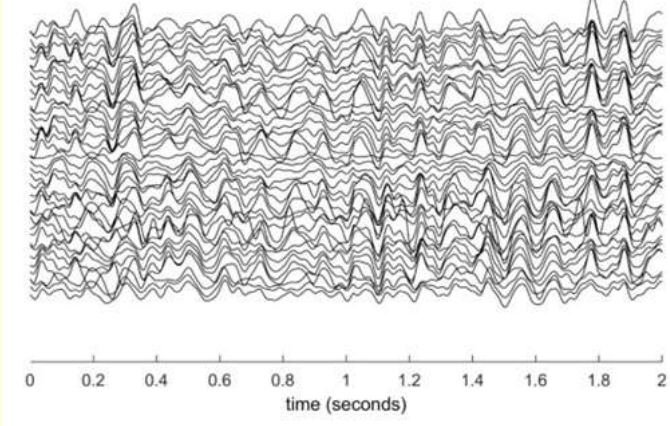
De la même manière, et c'est ce que Freeman a démontré, on peut faire un "**phase portrait**" pour visualiser l'activité simultanée de deux enregistrements électrophysiologiques.

En faisant cela, Freeman a découvert qu'en l'absence d'une odeur familière, **le système olfactif du lapin se comporte selon un attracteur chaotique** (et donc pas du tout comme une oscillations sinusoïdale parfaite).

Si l'on présente une odeur familière à l'animal, le "**phase portrait**" devient plus ordonné, un peu comme l'orbite du pendule simple.

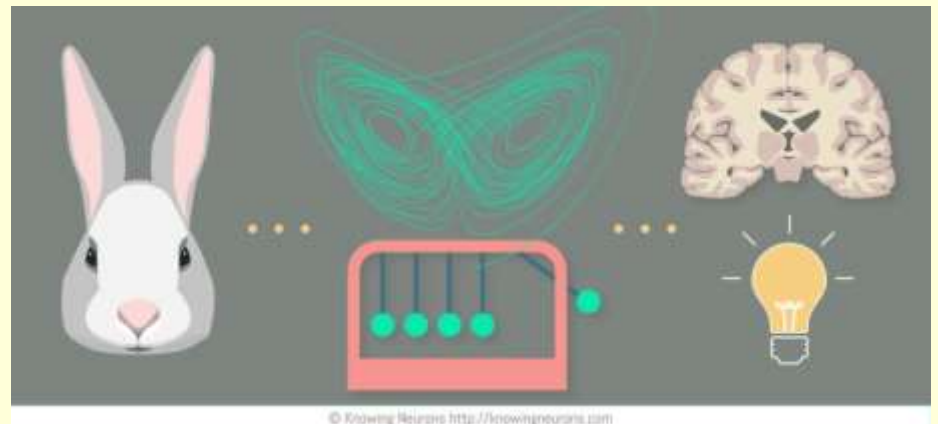
Des odeurs apprises peuvent donc faire **basculer le système d'un attracteur à un autre.**





Derrière ce qui ne semble être que du « bruit », ces **fluctuations** chaotiques révèlent des régularités et des propriétés, comme par exemple une capacité de changements rapides et étendus, qui sont **compatibles avec celles de la pensée humaine**.

Car pour Freeman, ce sont ces patterns (au niveau **meso**) qui constituent la signification construite par le cerveau à partir des stimuli.



Pour lui, notre expérience du monde réside au niveau de ces patterns alors que les propriétés physiques brutes des stimuli sont rapidement écartées par le cerveau.

Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

Électroencéphalogramme;

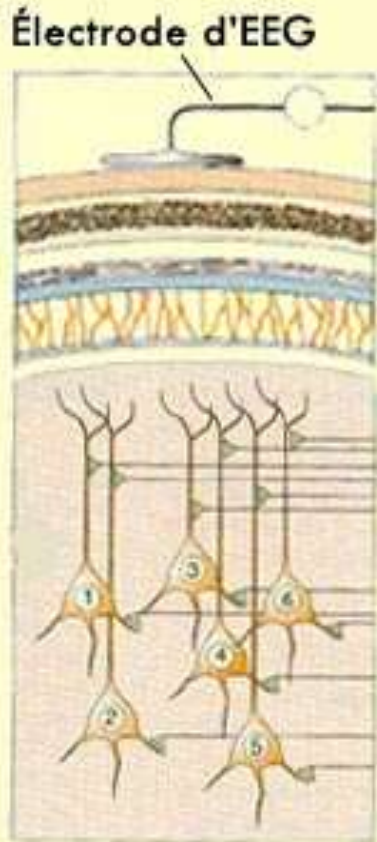
Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique

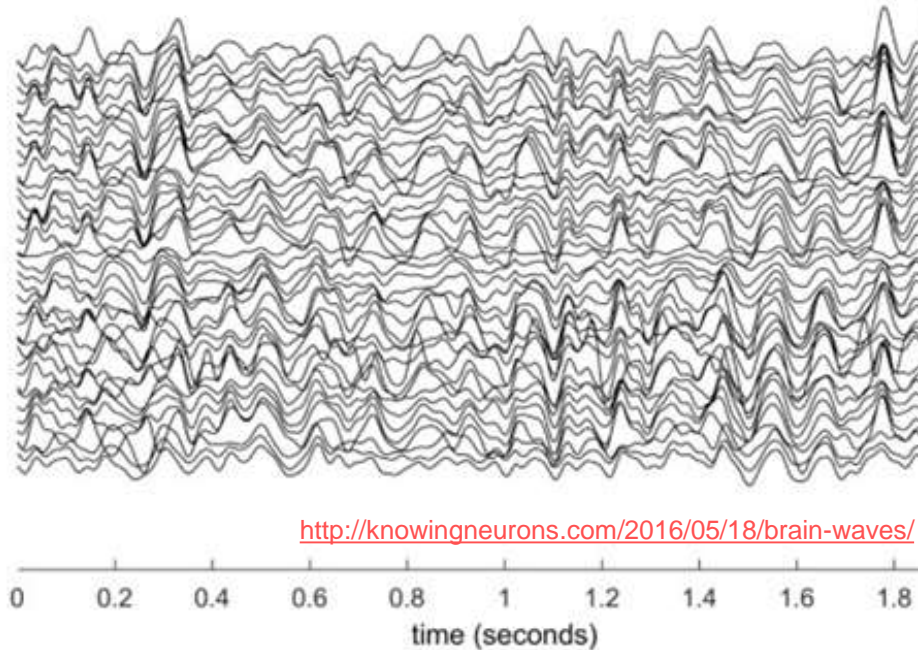
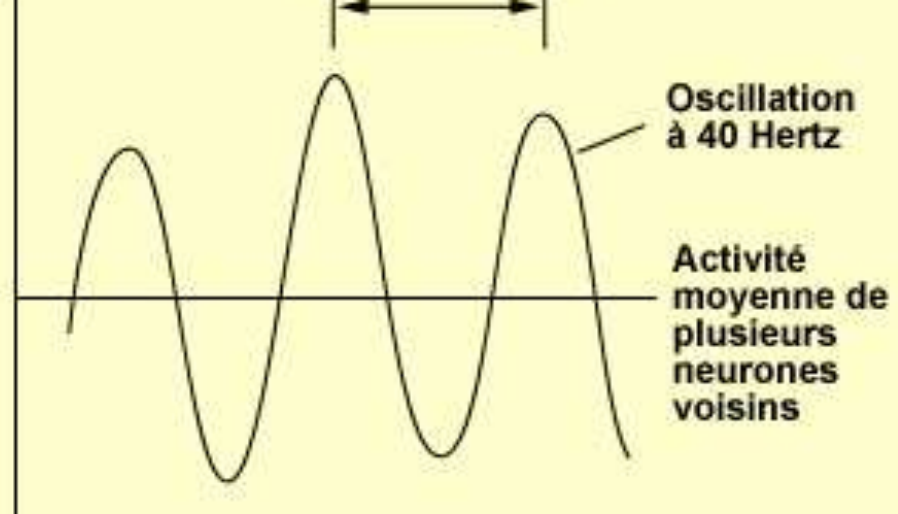
B- Éveil, sommeil et rêve



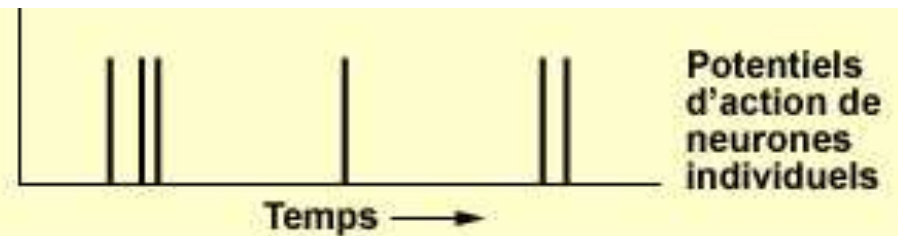
EEG :
niveau « macro »



“Local field potentials” :
niveau « meso »



Potentiels d'action :
niveau « micro »

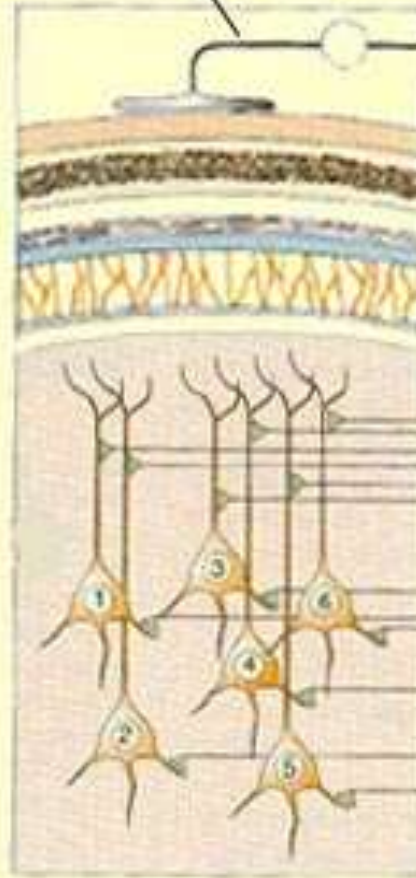




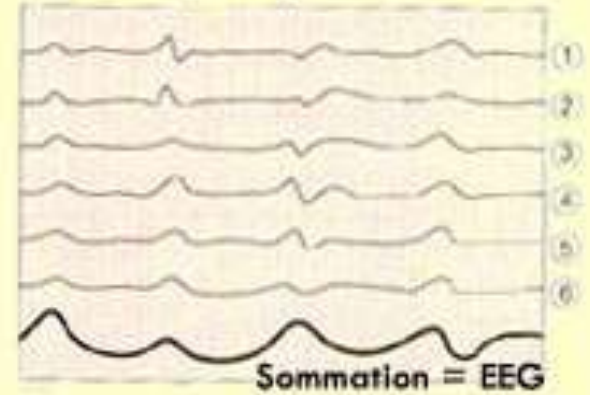
L'EEG fournit une mesure encore plus générale de l'activité des populations de neurones corticaux

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

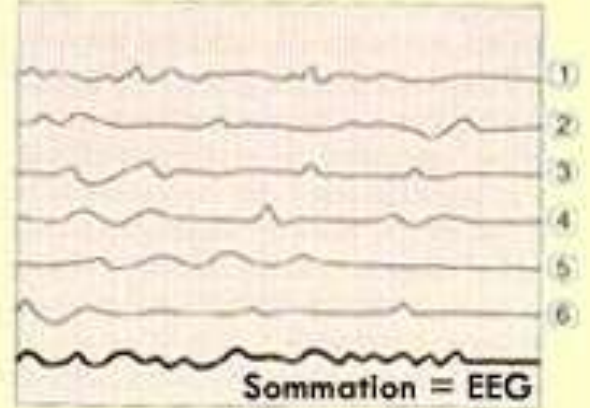
Électrode d'EEG



Décharges synchronisées



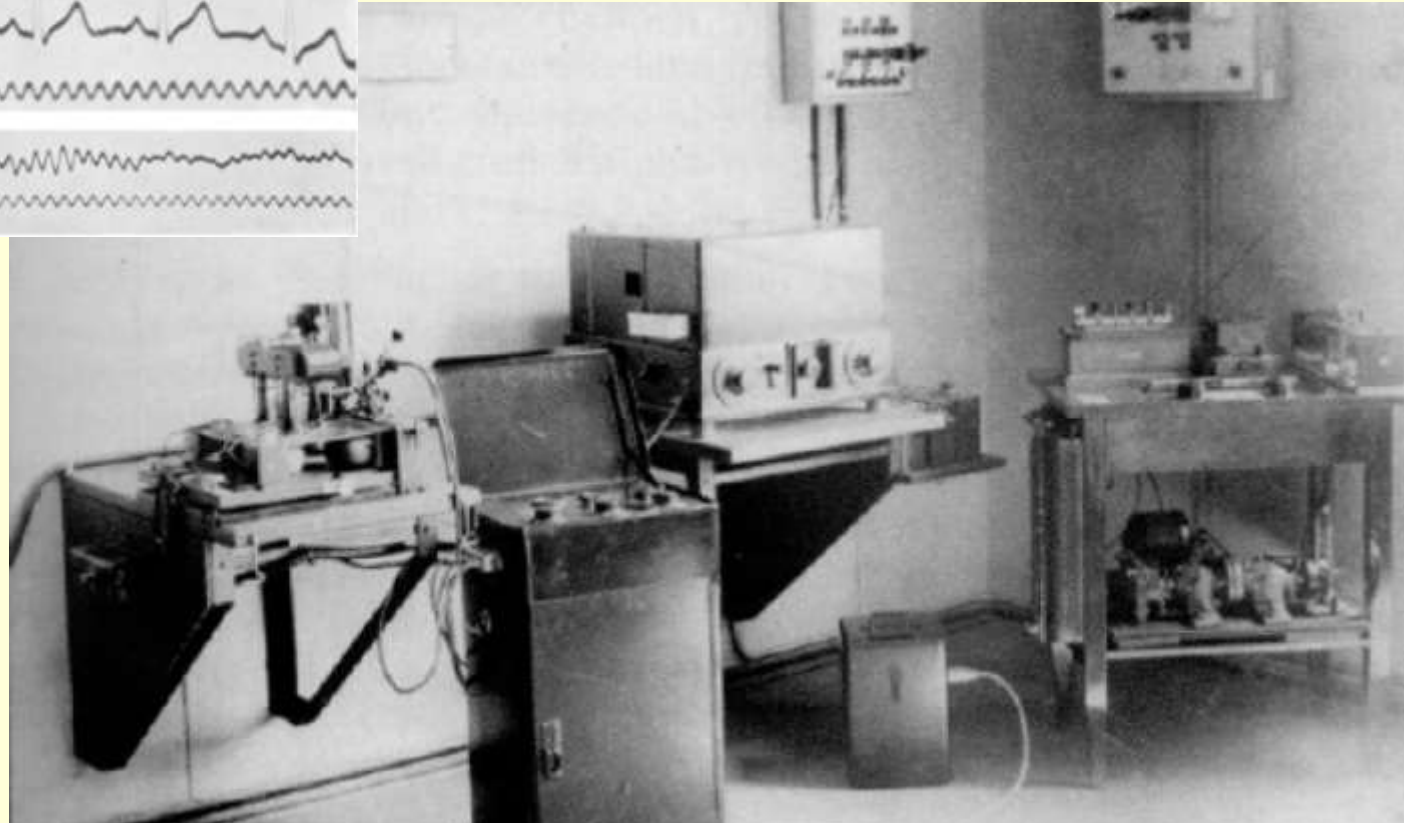
Décharges irrégulières



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

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

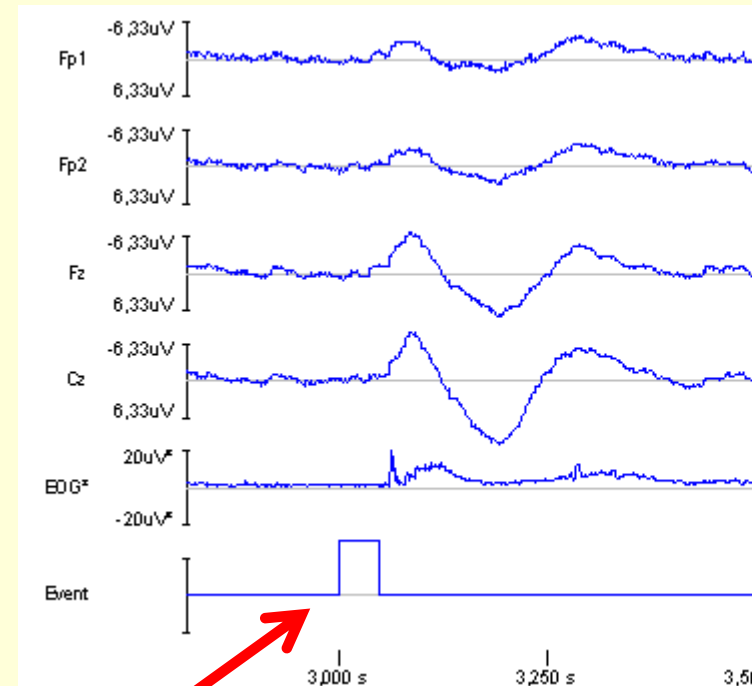
- Premier enregistrement d'un EEG chez l'humain : Hans Berger, en **1924**



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 déflection négative environ 400 millisecondes après.



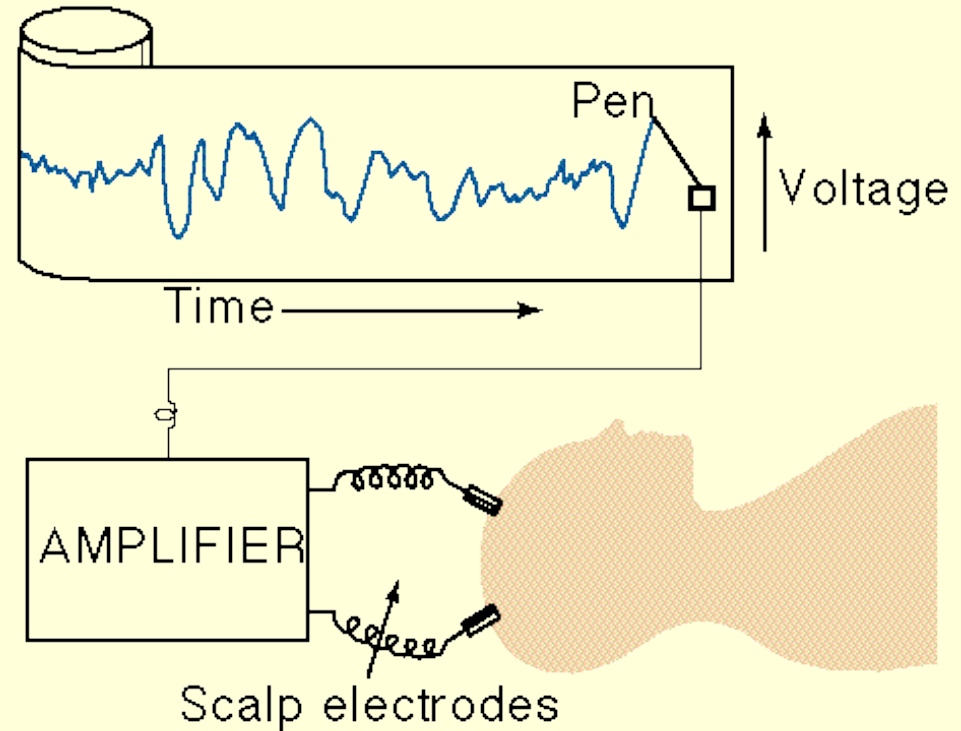
L'électroencéphalographie (EEG) est donc une technique **non invasive** pour enregistrer l'activité du cerveau.

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

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

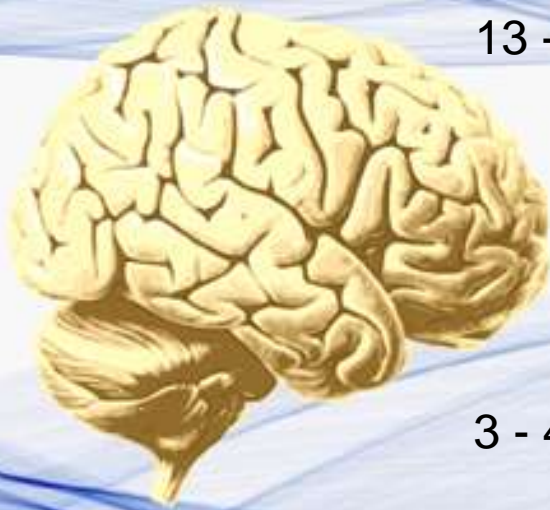
mais **bonne résolution temporelle** (millisecondes)

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



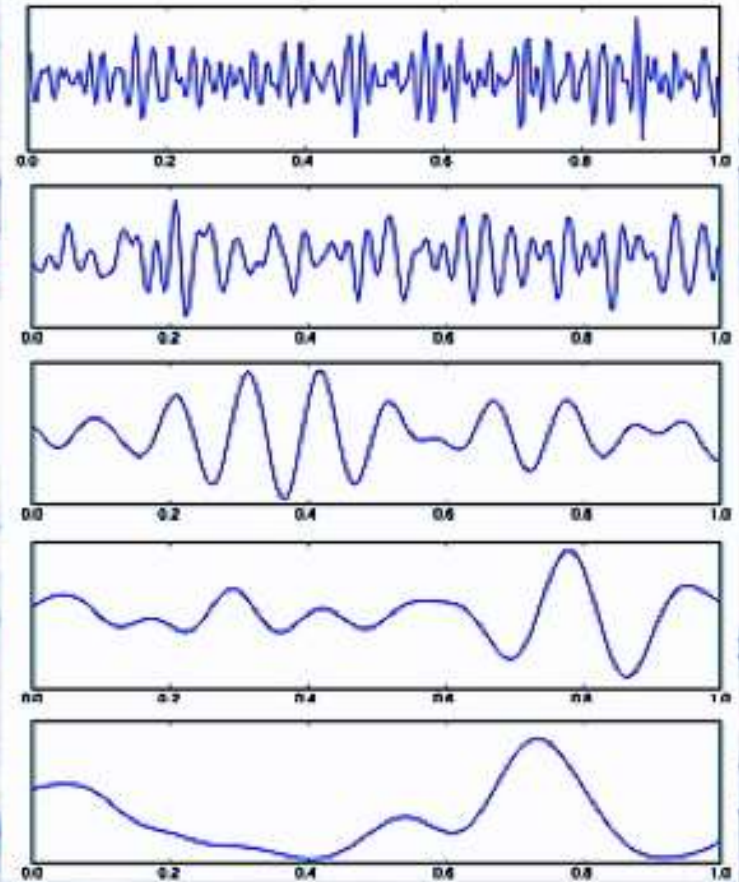
> 30 - 35 Hz **Gamma**
Problem solving,
concentration

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

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

3 - 4 à 7- 8 Hz **Theta**
Drowsiness

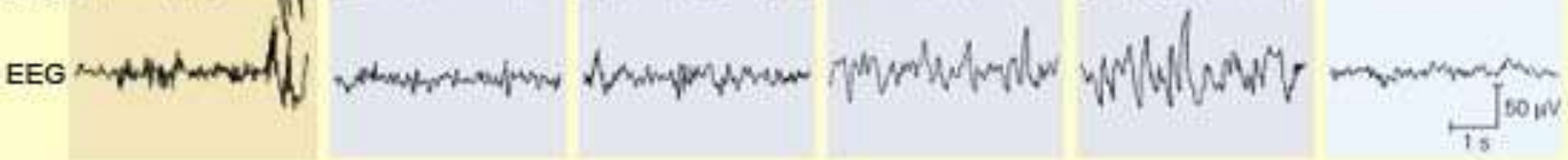
0,5 à 3 -4 Hz **Delta**
Sleep, dreaming





- Utilisation fréquente en neurologie : détection de foyers **épileptiques**
- Aussi : diagnostic de coma, de mort cérébrale





ÉVEIL

I

II

III

IV

REM



SOMMEIL PROFOND



RÊVE

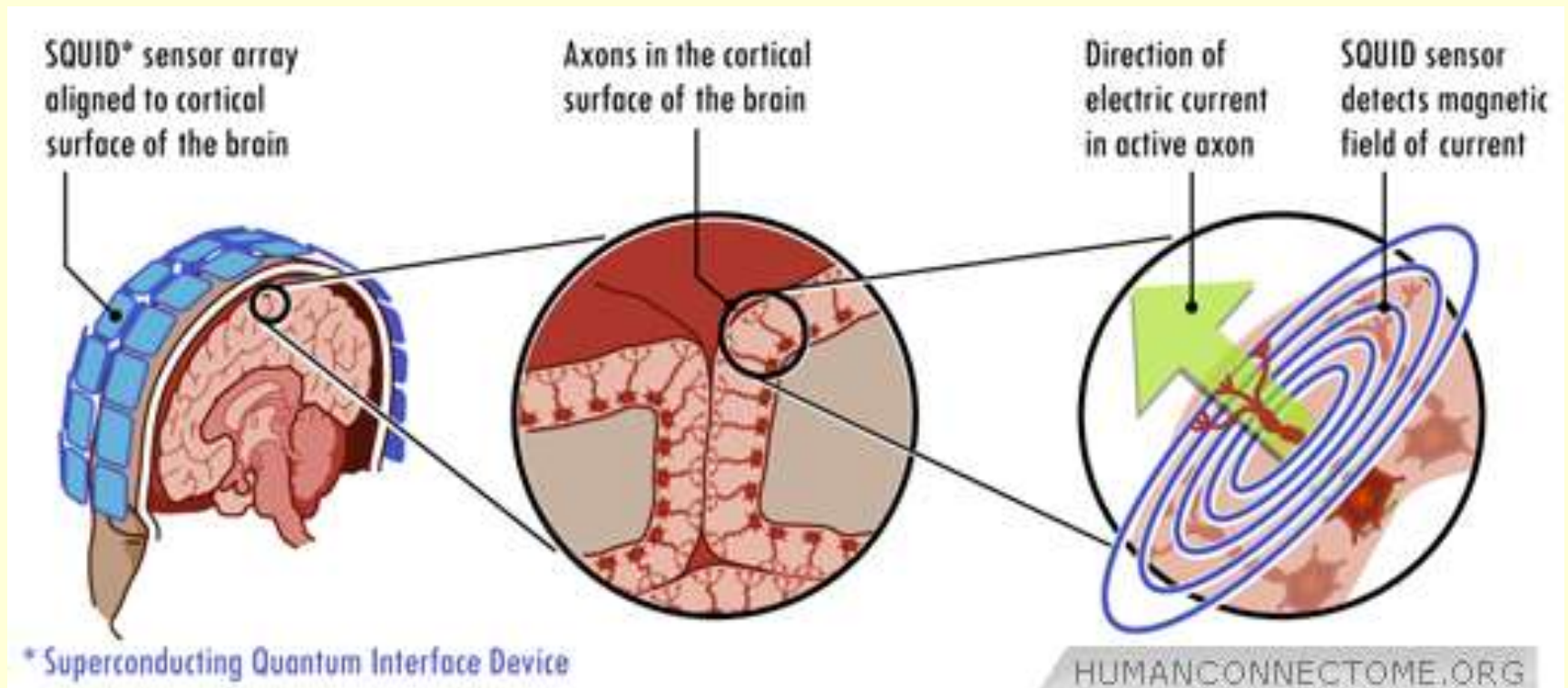


Étude sur le sommeil (que nous aborderons dans la 2^e heure)

Autre technique assez proche :

la magnétoencéphalographie (MEG)

Alors que l'**EEG** enregistre l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes appliquées sur le scalp, la **MEG** mesure le champ magnétique associé à ce courant électrique grâce à des détecteurs sensibles aux champs magnétiques alignés sur le crâne.

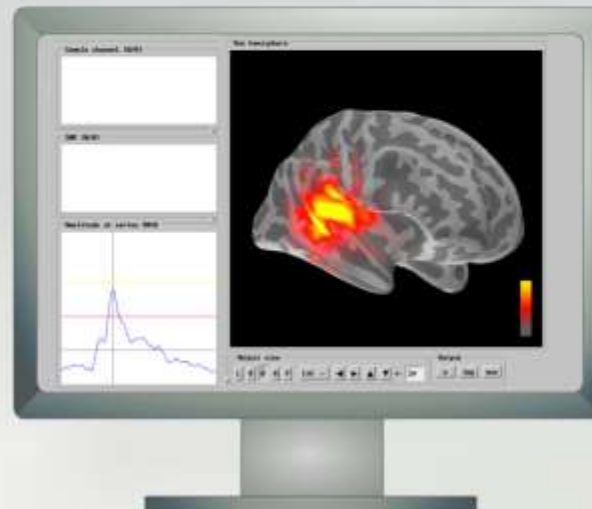
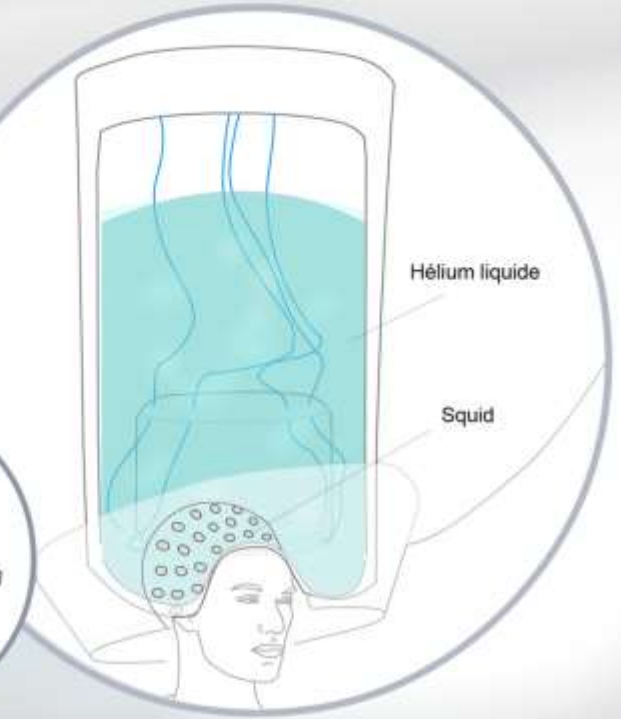
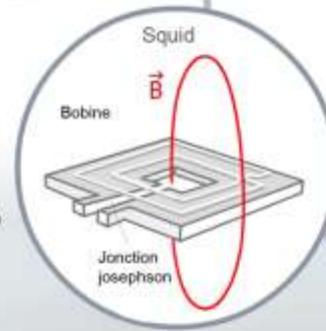
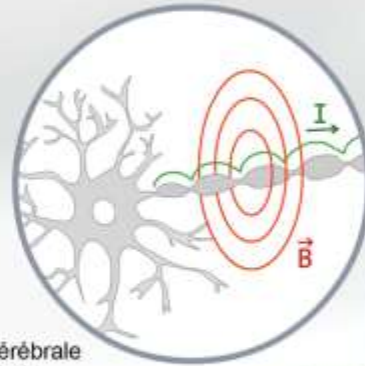


La magnétoencéphalographie

Les **squids (magnétomètres)** sont des capteurs extrêmement sensibles refroidis à l'hélium liquide (-260°C)



- 1 L'activité cérébrale produit de très faibles champs magnétiques induits par la circulation du courant le long des axones.
- 2 Les squids (magnétomètre) placés sur le cuir chevelu, captent à travers leurs bobines ces champs magnétiques.



Effet Josephson : La bobine supraconductrice est séparée au niveau de la jonction de Josephson. Les matériaux supraconducteurs ont la caractéristique de permettre à une paire d'électrons de traverser cette jonction et de créer ainsi un courant électrique. C'est ce qu'on appelle l'effet tunnel.

- 3 C'est le courant/signal généré par les squids qui sera traité en informatique.



L'avantage de mesurer les champs magnétiques c'est qu'ils passent à travers le crâne et autres tissus **sans distorsion** (contrairement à l'EEG, où le signal est plus brouillé).

Le taux d'échantillonnage temporel de la MEG est élevé – e.g. 1000 échantillons par seconde (hertz, Hz), ou plus.

La MEG a aussi une résolution spatiales assez fines (de l'ordre de quelques millimètres).

La MEG est aussi la plus sûre des diverses technologies d'imagerie cérébrale parce que le système ne dépose aucune énergie dans le cerveau. La machine ne touche même pas la tête.

Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique

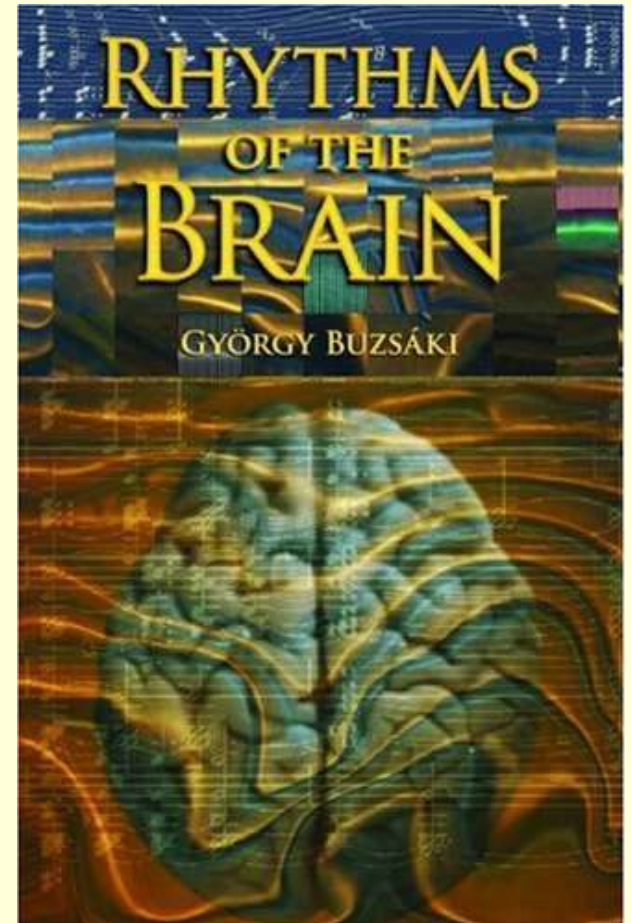
B- Éveil, sommeil et rêve



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

Cette époque est toutefois bien révolue.

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

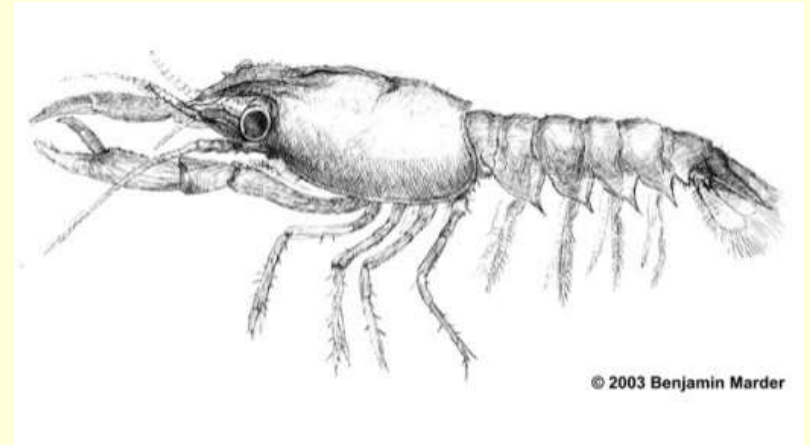


György Buzsáki - My work

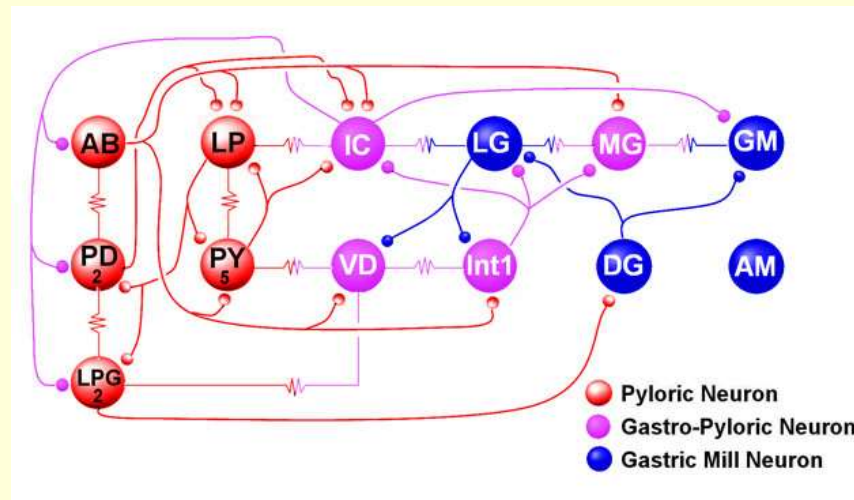
<https://www.youtube.com/watch?v=UOwCbtqVzNU>

(2:00 à 4:30)

Il faut d'abord noter que l'on observe de nombreux rythmes d'activité dans les systèmes nerveux autres que chez l'humain, en particulier chez les **invertébrés**.



C'est ainsi qu'on a pu identifier dans le système nerveux somatogastrique du homard un circuit nerveux reliant une trentaine de neurones capable de générer **deux rythmes d'activité différents et intrinsèques à ce circuit**.



Captivating Rhythm

<http://www.brainfacts.org/brain-basics/neural-network-function/articles/2009/captivating-rhythm/>

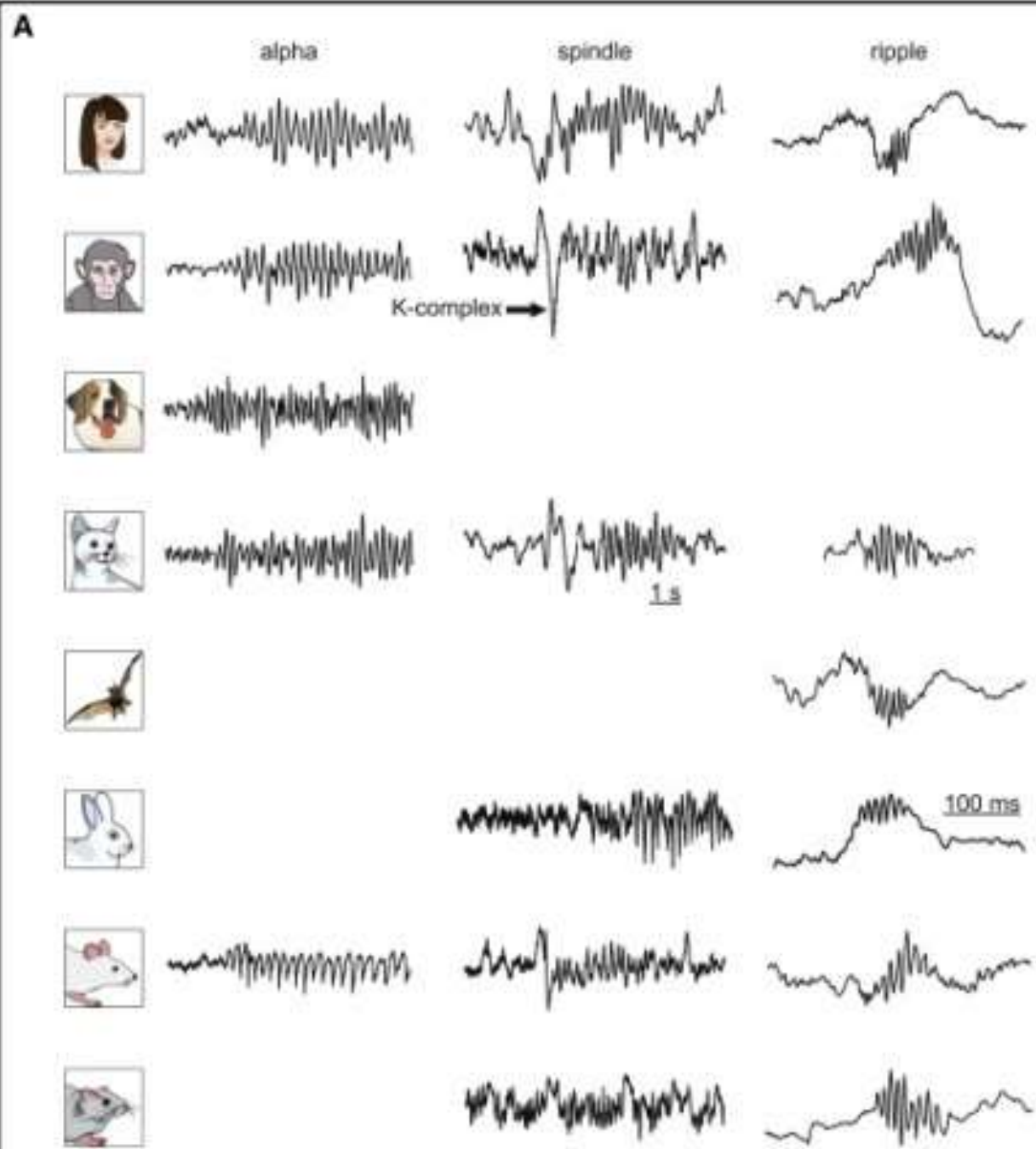
2013

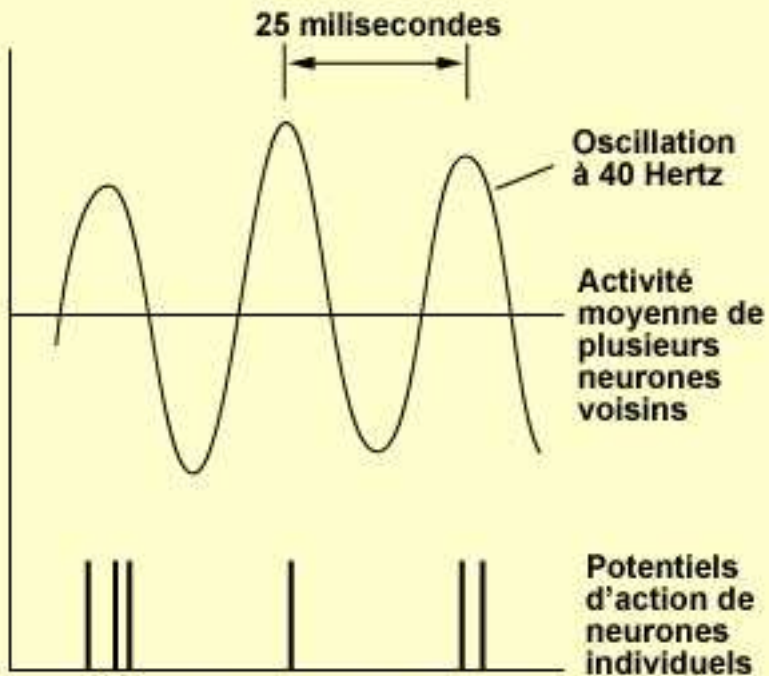
Scaling Brain Size,
Keeping Timing:

Evolutionary Preservation of Brain Rhythms

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

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





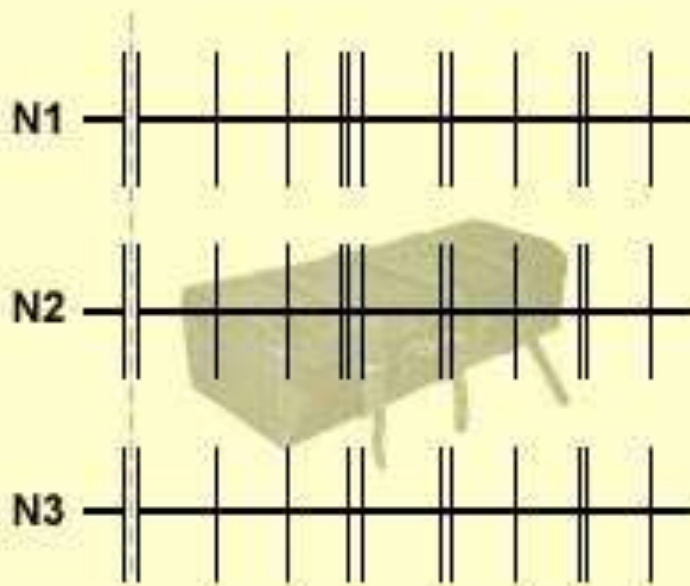
Oscillations

(selon un certain rythme
(en Hertz))

et

Synchronisation
(activité simultanée)

sont des phénomènes
différents mais souvent
liés !



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

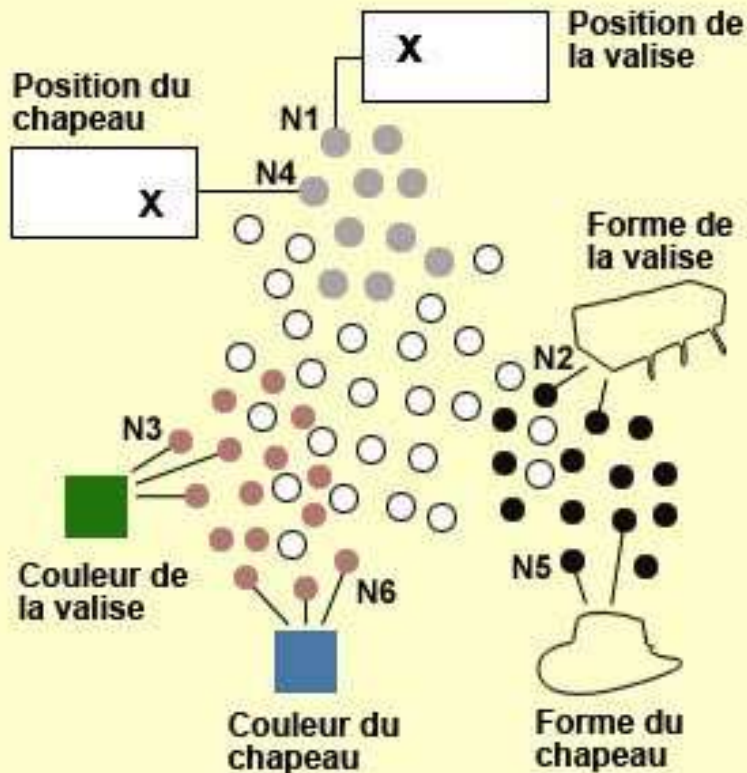
<http://brainsciencepodcast.com/bsp/brain-science-podcast-31-brain-rhythms-with-gyorgy-buzsaki.html>

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,

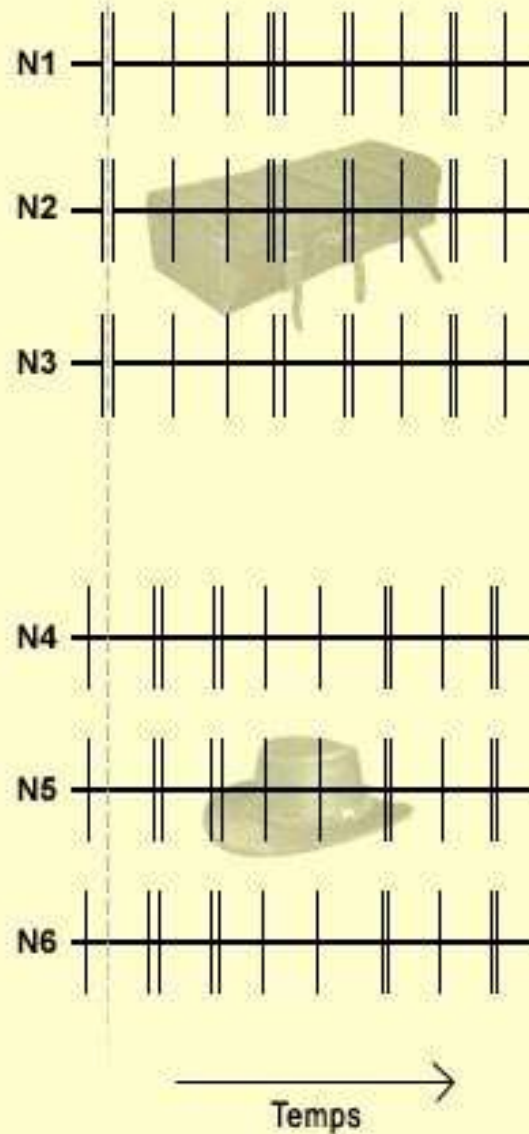
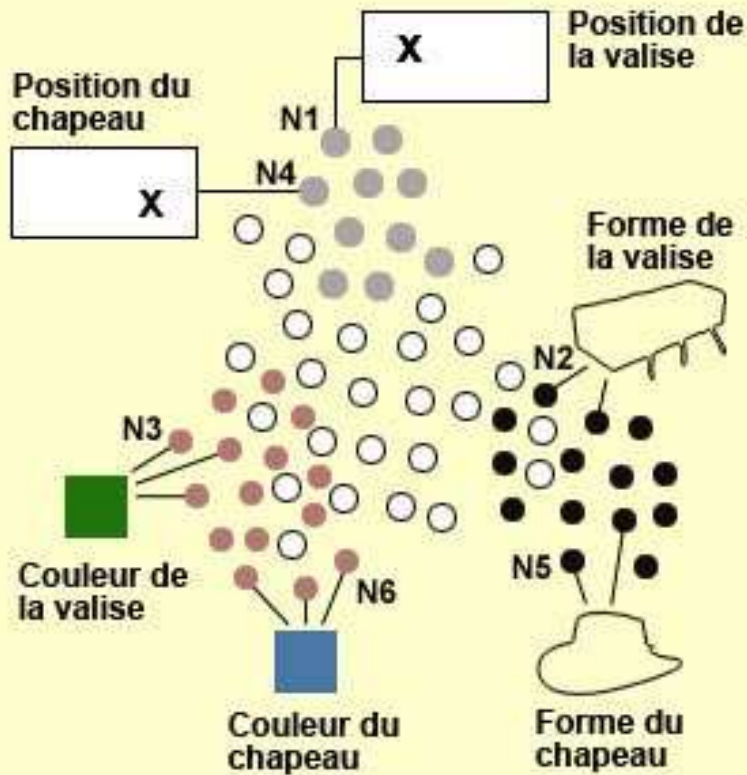
propriétés qui activent souvent des **régions distinctes et distantes**
dans le cerveau.

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



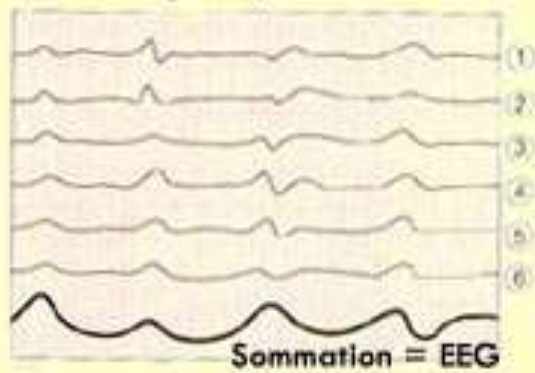
Alors on peut se demander **comment les caractéristiques d'un même objet sont-elles mises ensemble** pour former la perception consciente et distincte que l'on a de chacun des deux objets, sans en mélanger les caractéristiques ?

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

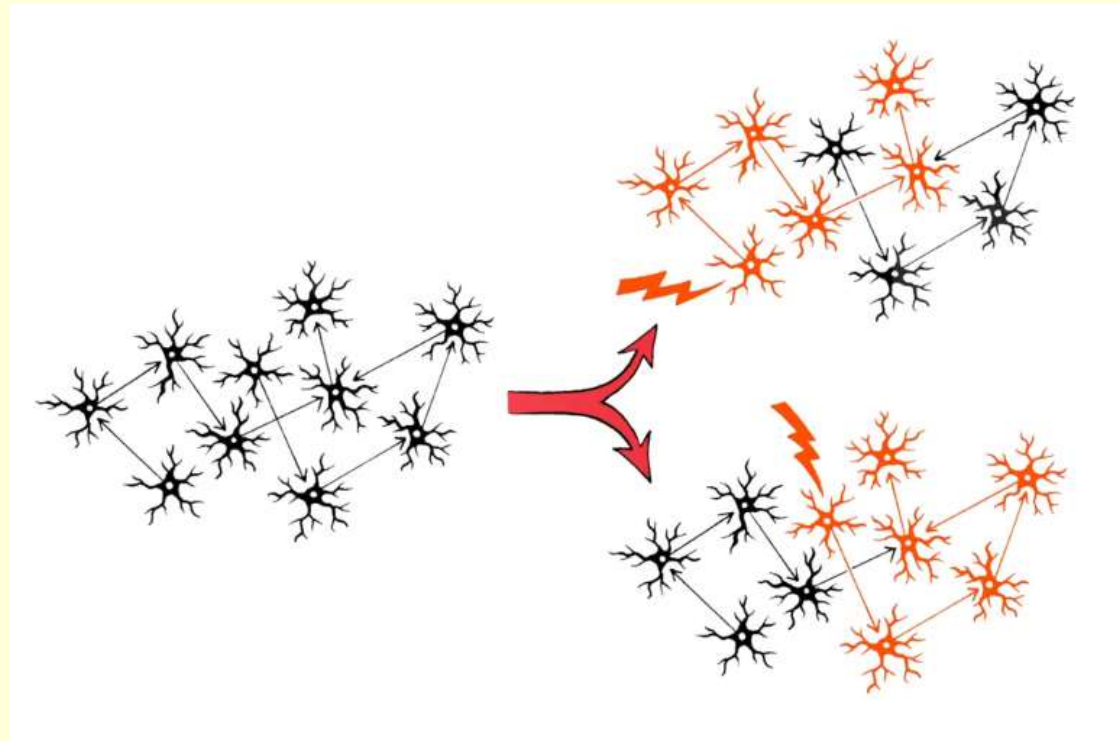
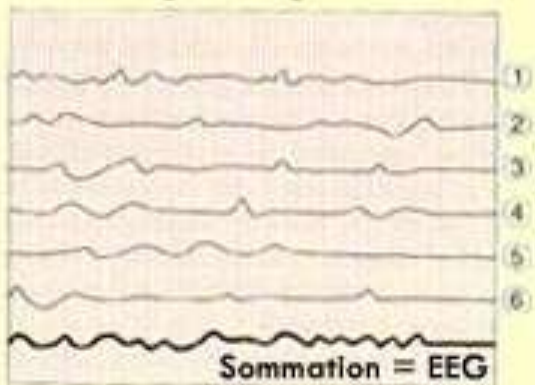


Car la synchronisation des oscillations rend possible la formation d'assemblées de neurones transitoires

Décharges synchronisées

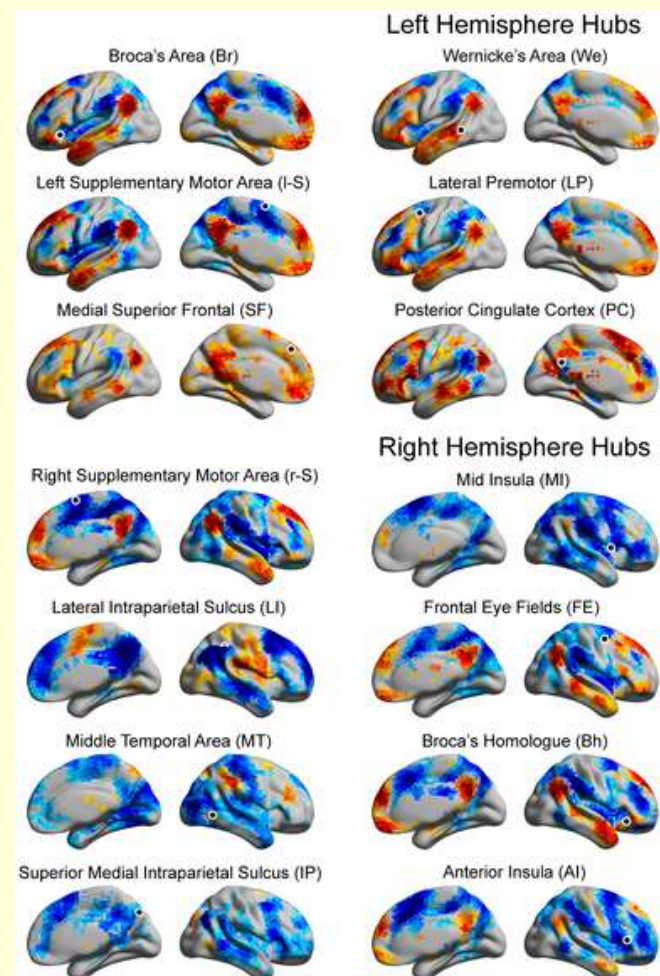
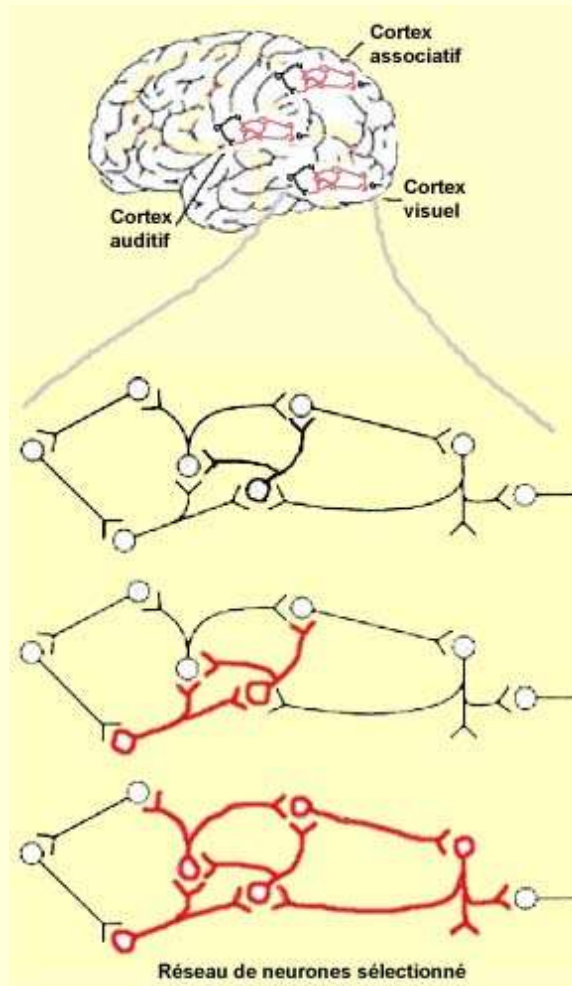
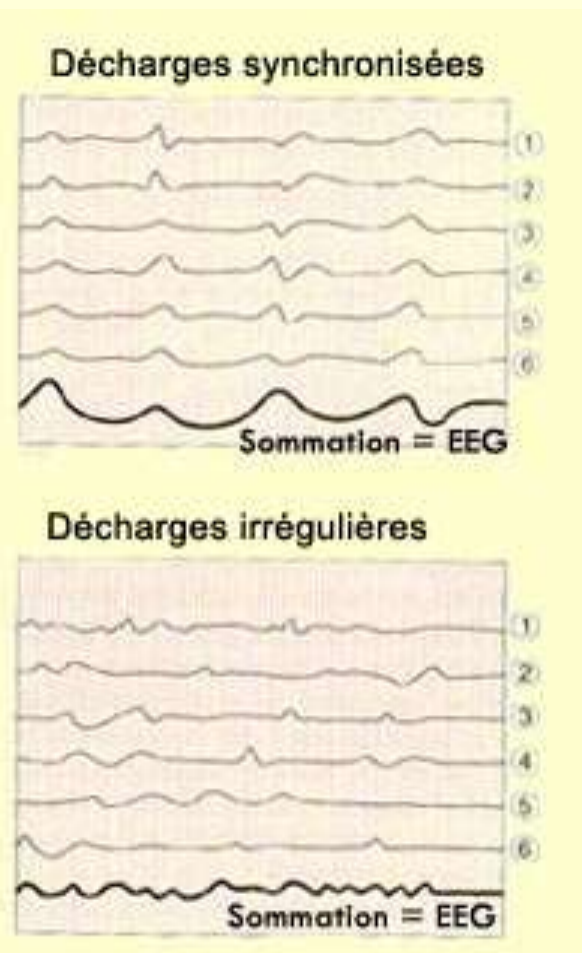


Décharges irrégulières



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.



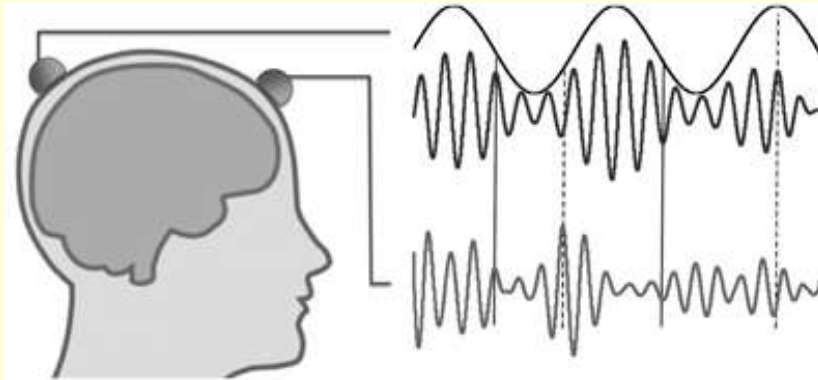
Car la synchronisation des oscillations rend possible la formation
d'assemblées de neurones transitoires

qui se produisent non seulement dans certaines structures cérébrales,
mais dans des réseaux largement distribués à l'échelle du cerveau entier.

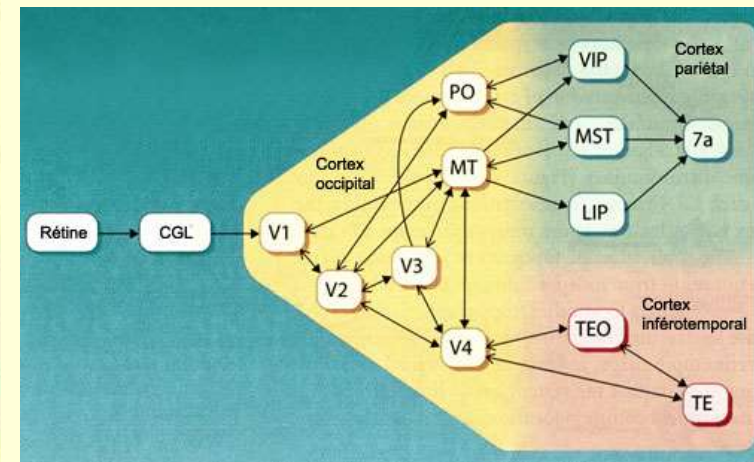
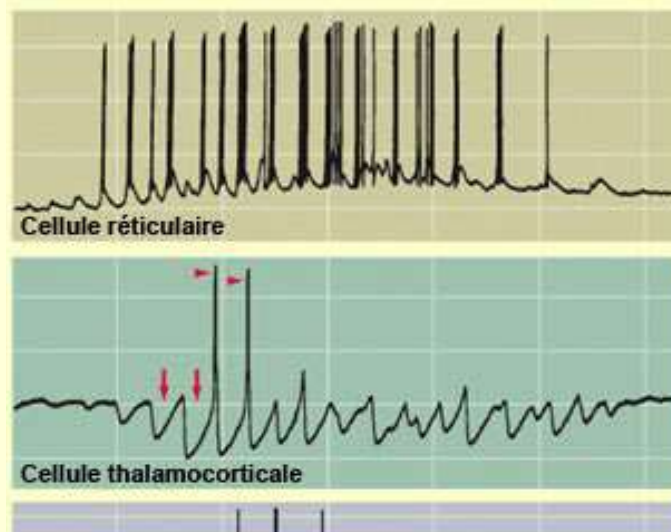
La synchronisation d'activités oscillatoires permettrait ainsi de **mettre en relation**, à un instant donné, diverses assemblées de neurones correspondant à diverses propriétés d'un objet pour nous en donner une **perception consciente unifiée**, par exemple.



Les oscillations apportent donc beaucoup d'autres **possibilité computationnelles**



par rapport aux approches non temporelles basée sur **les taux de décharge** des potentiels d'actions dans différentes structures organisées de façon hiérarchique pour les traiter.

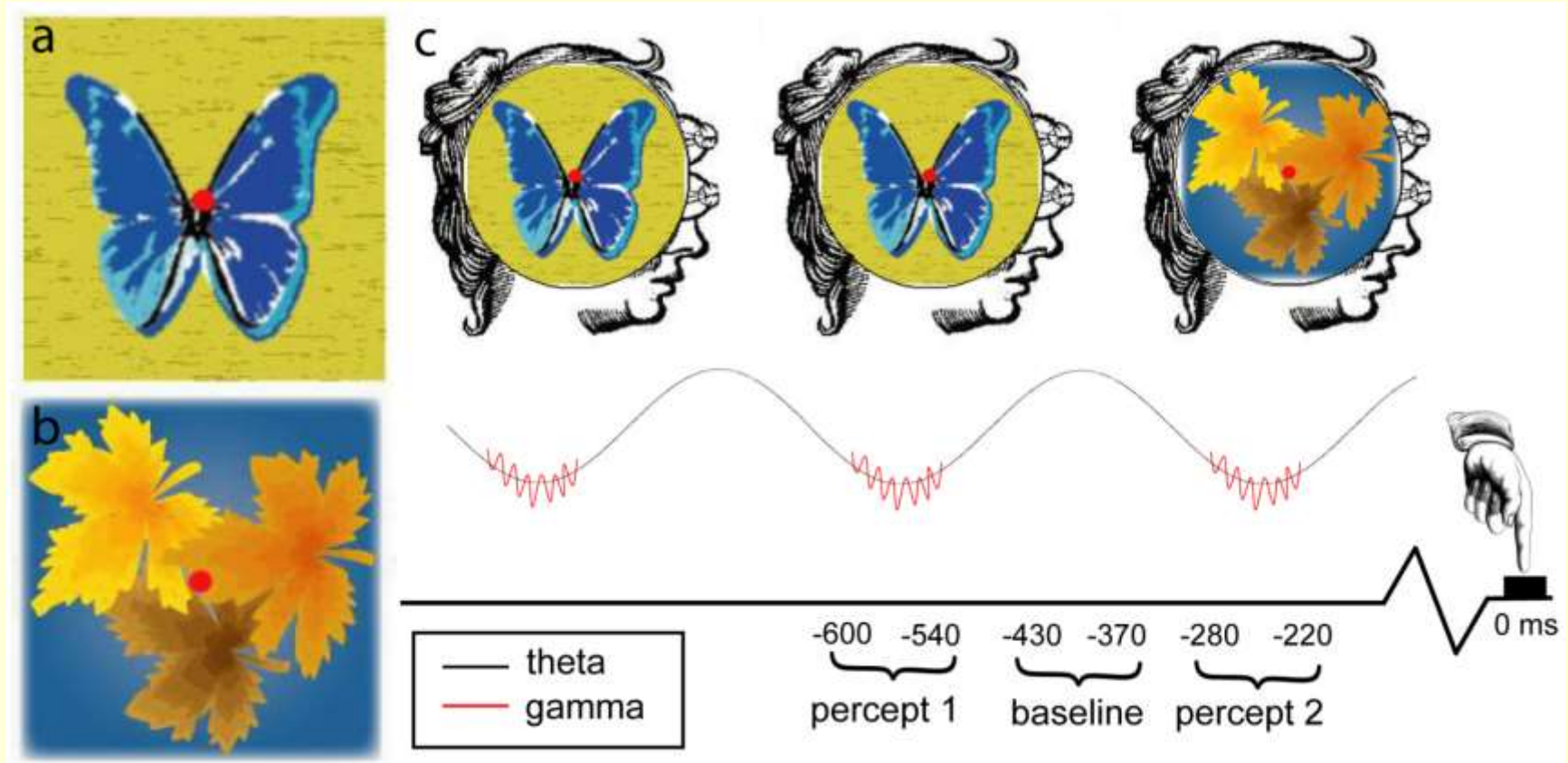


Rôles fonctionnels possibles des oscillations:

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



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

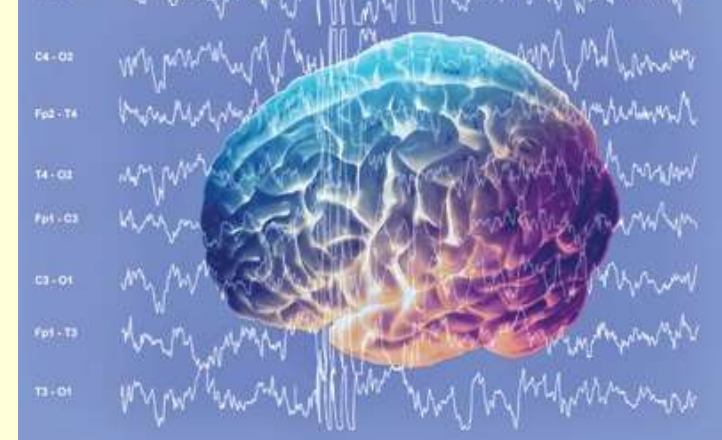


Si l'on fait cette expérience en enregistrant l'activité du cerveau des sujets auxquels on demande d'indiquer lequel des deux stimuli ils **perçoivent** à un moment donné, on observe une variation de l'activité de certaines régions du cerveau en fonction de l'expérience subjective.

Rôles fonctionnels possibles des oscillations:

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

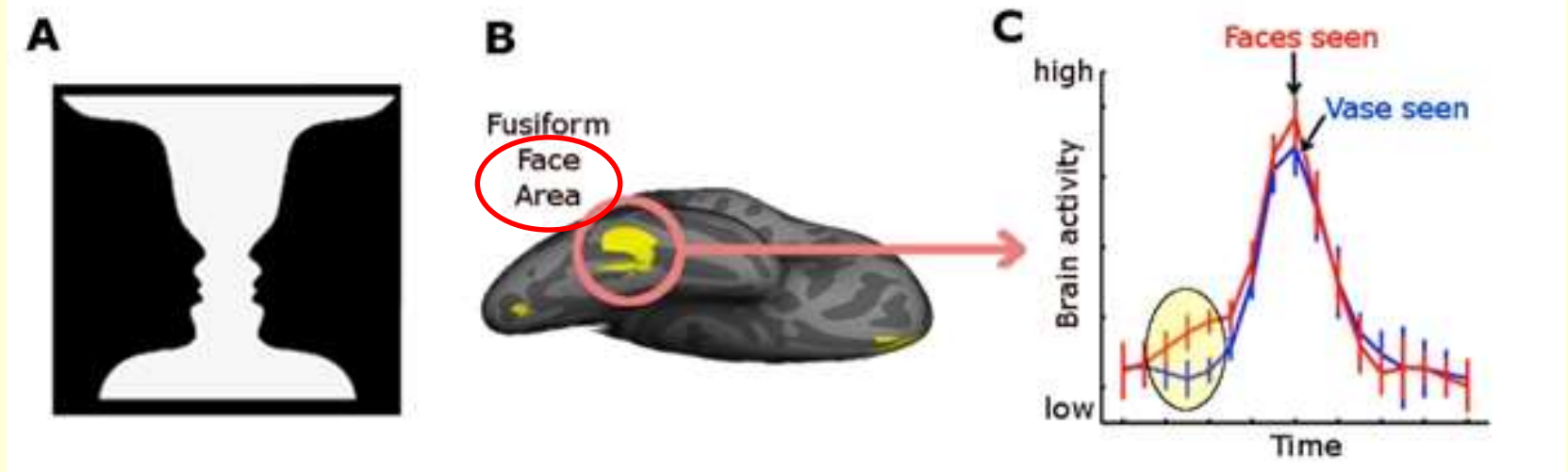
Également, si le potentiel de membrane d'un neurone oscille, il y aura des moments où c'est plus facile pour lui d'atteindre le seuil de déclenchement d'un potentiel d'action (dépoliarisation) et d'autres moins (hyperpolarisation) **favorisant par exemple certaines perceptions.**



A



Sur cette image, on peut voir
alternativement soit un **vase blanc** ou
les **profils de deux visages en noir**.



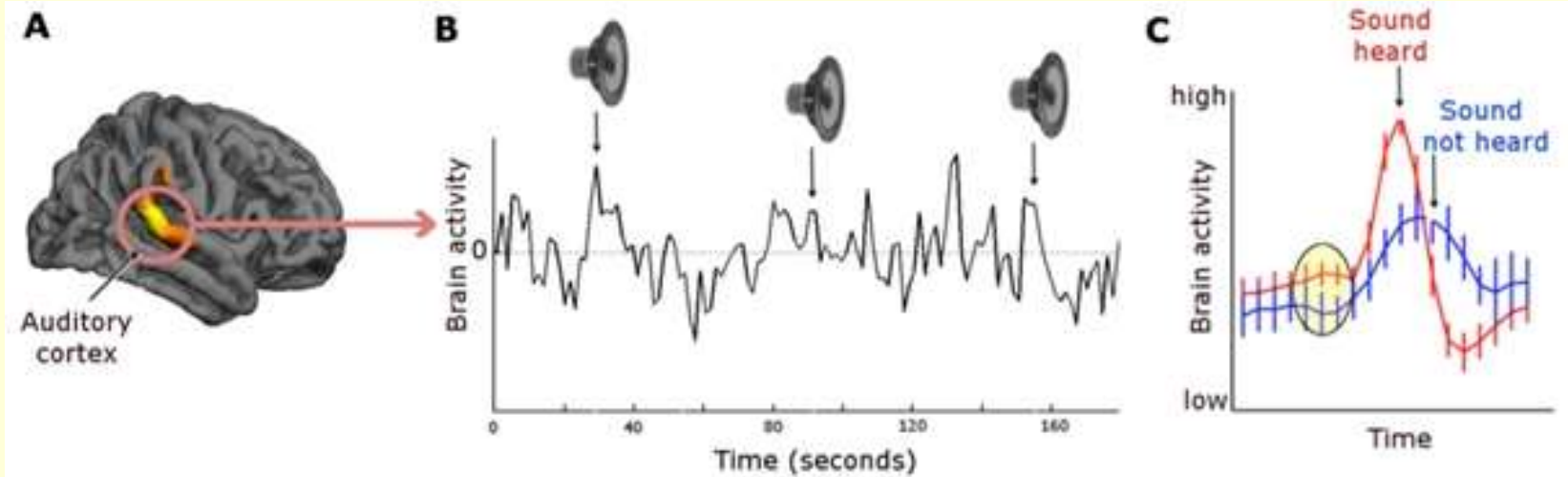
« Si l'activité dans cette **aire [fusiforme de reconnaissance des visages]** fait un grand pic, les participants rapportent voir un visage (courbe rouge). Si le pic d'activité est plus petit, ils rapportent voir le vase (courbe bleue).

L'ovale jaune et hachuré dans la figure 3C met en valeur l'activité cérébrale spontanée juste avant que l'image ne soit présentée. Étonnamment, l'activité cérébrale qui précède l'image détermine quelle figure (visage ou vase) la personne reconnaîtra quand elle regardera l'image.

En effet, comme les ondes sur le lac, **l'activité spontanée** est toujours en train de croître ou décroître légèrement dans toutes les régions cérébrales.

Si elle est légèrement plus élevée dans la région des visages au moment où l'image est présentée, elle va biaiser la perception de cette image ambiguë dans le sens des visages. »

« aider à passer le seuil de perception »
au niveau auditif maintenant...



« La courbe de la figure 4B illustre l'activité cérébrale du cortex auditif durant 180 secondes. Curieusement, il y a beaucoup de hauts et de bas dans cette courbe. Cela est dû à **l'activité cérébrale spontanée**.

Les hauts-parleurs et les flèches marquent l'activité cérébrale au moment où le son est présenté.

La figure 4C compare l'activité du cortex auditif en réponse aux sons quand les participants ont détecté le son (courbe rouge) et quand ils ne l'ont pas entendu (courbe bleue).

Bien évidemment, quand le cortex auditif répond avec un grand pic d'activité, le son est entendu mais regardez bien le niveau d'activité cérébrale avant que le son ne soit joué (ovale jaune hachuré). Elle est plus élevée quand la personne entend le son.

Là encore, cette activité précédente va aider l'activité neurale engendrée par le son à **passer le seuil de perception**. »

The Rhythm of Perception

Entrainment to Acoustic Rhythms Induces Subsequent Perceptual Oscillation

<http://pss.sagepub.com/content/early/2015/05/11/0956797615576533.abstract>

Gregory Hickok, Haleh Farahbod, Kourosh Saberi

February 17, **2015**

Ici, on **induit un rythme oscillatoire** dans l'activité cérébrale des aires auditives, et l'on observe que la perception auditive est ensuite modulée par ce rythme.

« They presented listeners with a **three-beat-per-second rhythm** (a pulsing “whoosh” sound) for only a few seconds and then asked the listeners to **try to detect a faint tone** immediately afterward. [...]

Not only did we find that **the ability to detect the tone varied over time by up to 25 percent** — that's a lot —

but it did so precisely in sync with the previously heard three-beat-per-second rhythm. »

It's Not a 'Stream' of Consciousness

MAY 8, 2015

<http://www.nytimes.com/2015/05/10/opinion/sunday/its-not-a-stream-of-consciousness.html>

It's not a stream of consciousness, its a rhythm.

June 04, 2015

<http://mindblog.dericbownds.net/2015/06/its-not-stream-of-consciousness-its.html>

Selon ces autres expériences, ce serait ainsi que nos systèmes perceptuels échantillonnent le monde :

« **Les rythmes de l'environnement**, tels que ceux de la **musique** ou de la **parole**, peuvent initier des oscillations neuronales dans leur tempo, synchronisant alors les rythmes du cerveau avec ceux du monde qui nous entoure. »

Pourquoi notre cerveau ferait cela ? L'une des explications possibles serait de **faciliter ainsi le focus de notre attention** :

« Imaginez un **café bruyant** rempli de voix, de bruits de plats assourdissants et de musique de fond. Lorsque vous portez attention à un flux acoustique particulier - par exemple, la voix de votre compagnon de déjeuner - **votre cerveau synchronise son rythme sur celui de la voix et améliore la perceptibilité de ce flux**, tout en supprimant les autres flux, qui ont leurs propres rythmes différents. »

Astrocytes contribute to gamma oscillations and recognition memory

Hosuk Sean Lee et al.



Contributed by Stephen F. Heinemann, June 15, 2014 (sent for review March 10, **2014**)

<http://www.pnas.org/content/early/2014/07/23/1410893111.short>

“By creating a transgenic mouse in which **vesicular release from astrocytes can be reversibly blocked**, we found that astrocytes are necessary for novel object recognition behavior and to maintain functional gamma oscillations both in vitro and in awake-behaving animals. Our findings reveal an unexpected role for astrocytes in neural information processing and cognition. “

Evan Thompson :

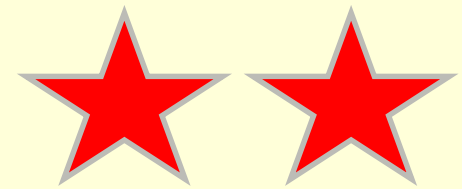
« It's not all about the neurons: astrocytes (a kind of glial cell) are crucial for the gamma oscillations necessary for recognition memory.

This study is also one of the first to show a causal relationship between gamma oscillations and cognition, not just a correlational one. »

Taking Control of a Rat's Sense of Familiarity and Novelty

Neuroscience News, September 30, **2015**

<http://neurosciencenews.com/optogenetics-novelty-familiarity-rat-2779/>



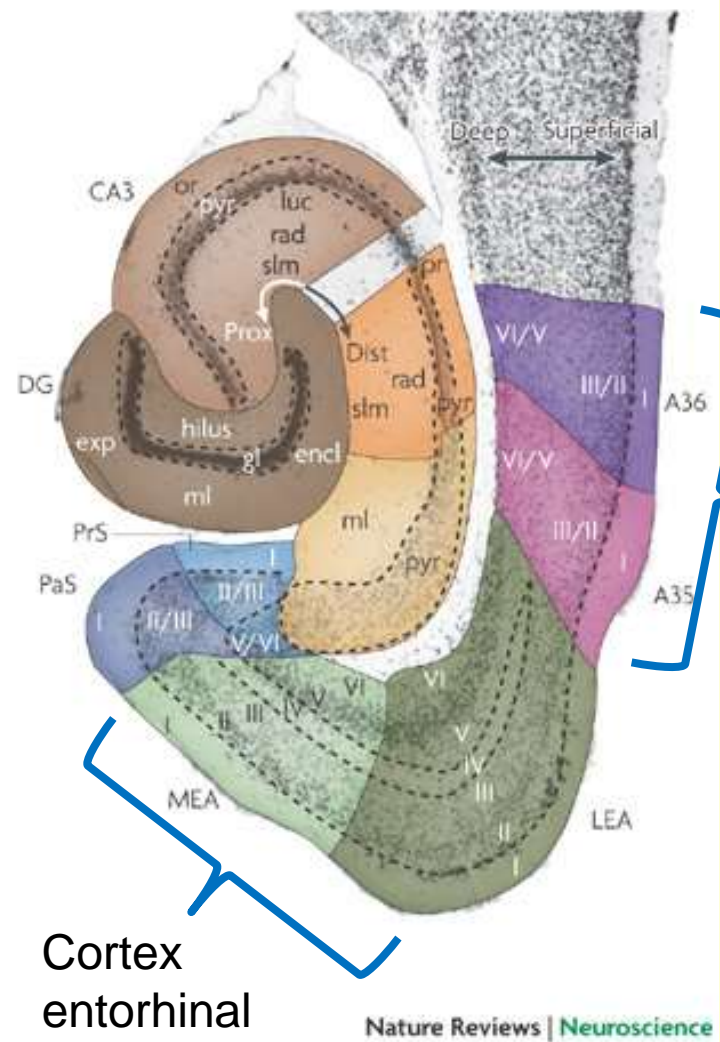
Brown University brain scientists didn't just study how recognition of familiarity and novelty arise in the mammalian brain, they actually took control, inducing rats to behave as if images they'd seen before were new, and images they had never seen were old.

Bidirectional Modulation of Recognition Memory

Jonathan W. Ho et al.

The Journal of Neuroscience, 30 September **2015**, 35(39): 13323-13335

<http://www.jneurosci.org/content/35/39/13323>



Le cortex périrhinal joue un rôle bien établi dans la reconnaissance d'objets basée sur leur familiarité.

Dans le cerveau normal, les neurones du cortex périrhinal répondent à la nouveauté en augmentant leur taux de décharge et à la familiarité en le diminuant.

Les animaux ou les humains ayant subi des dommages au cortex périrhinal sont incapables de distinguer des objets familiers de nouveaux objets lors d'une tâche de mémorisation.

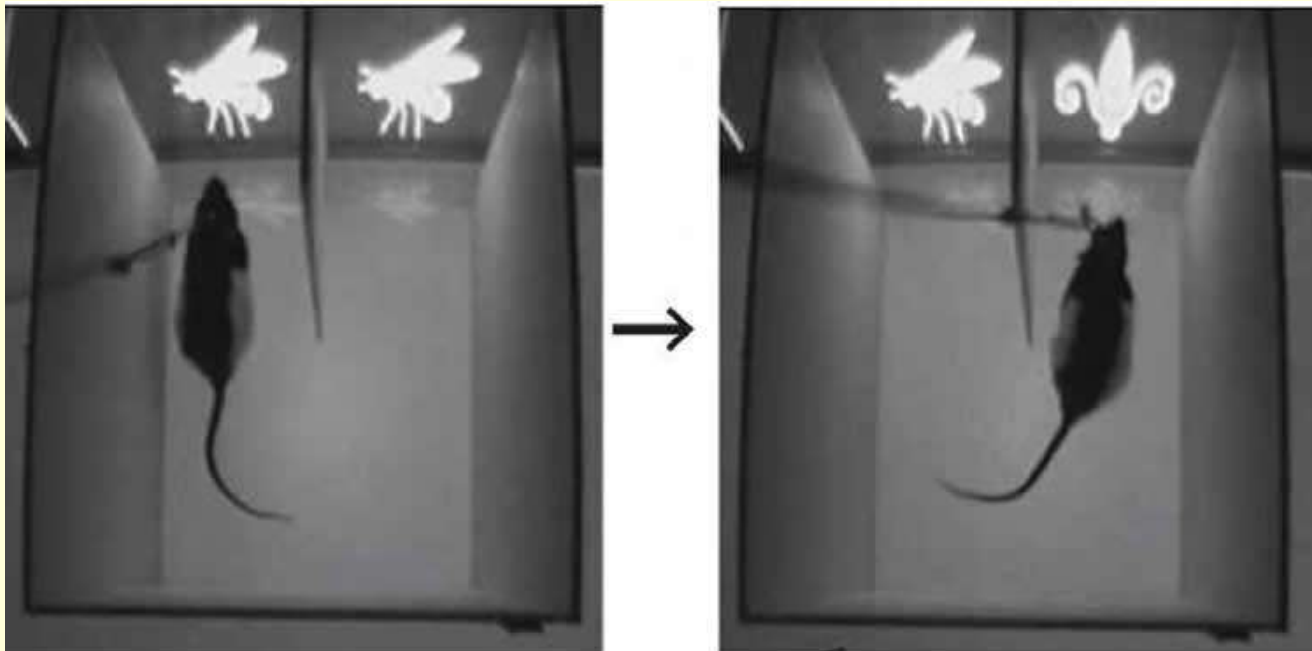
FIGURE 1 | Representations of the hippocampal formation and the parahippocampal region in the rat brain.

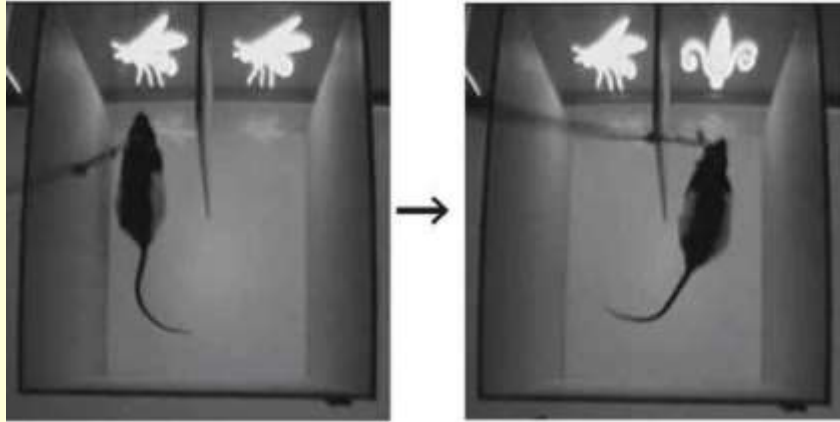
http://www.nature.com/nrn/journal/v10/n4/fig_tab/nrn2614_F1.html

En utilisant la technique de **l'optogénétique** lors d'une tâche d'exploration spontanée d'un objet, on a pu altérer la performance de reconnaissance des objets par les rats.

Normalement, les rats explorent plus longtemps les nouvelles images que celles qui leur sont familières.

Cette étude a démontré qu'on pouvait modifier ce comportement en stimulant avec de la lumière (grâce à l'optogénétique) les neurones du cortex périrhinal à différentes fréquences pendant que les rats regardaient des images familières ou nouvelles.





Pendant que les rats regardaient une image :

- **des stimulations à 30-40 Hz** leur faisaient considérer une image familière comme si c'était une nouvelle image en augmentant le temps passé à la regarder; (et ces stimulations à 30-40 Hz n'augmentaient pas leur temps d'exploration d'une nouvelle image)
- **des stimulations à 10-15 Hz** leur faisaient considérer une image nouvelle comme si c'était une image familière en diminuant le temps passé à la regarder; (et ces stimulations à 10-15 Hz n'affectaient pas leur temps d'exploration d'une image familière)

Ces différentes fréquences de stimulation du cortex périrhinal pouvaient donc altérer la mémoire de la reconnaissance visuelle des objets de façon **bidirectionnelle**.

Cours 5: 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

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

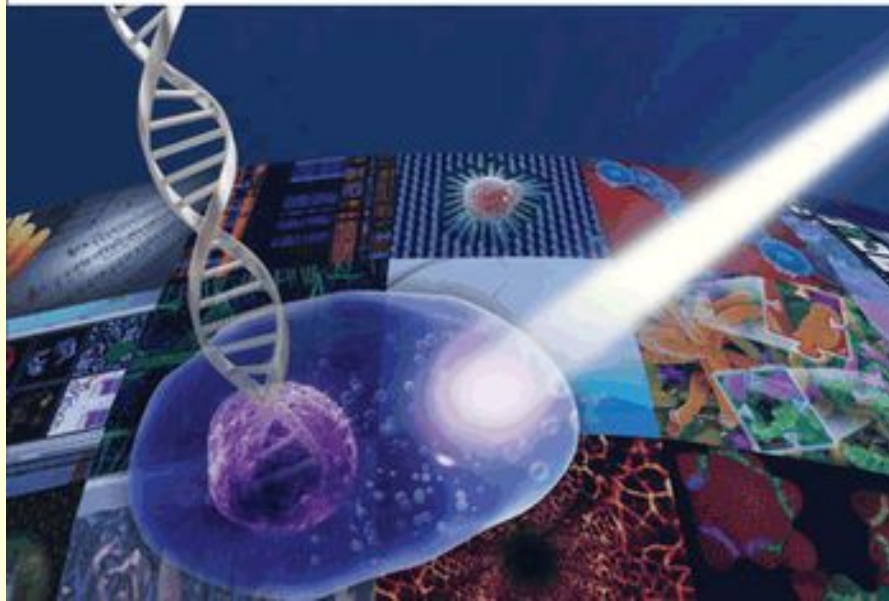
Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique

B- Éveil, sommeil et rêve

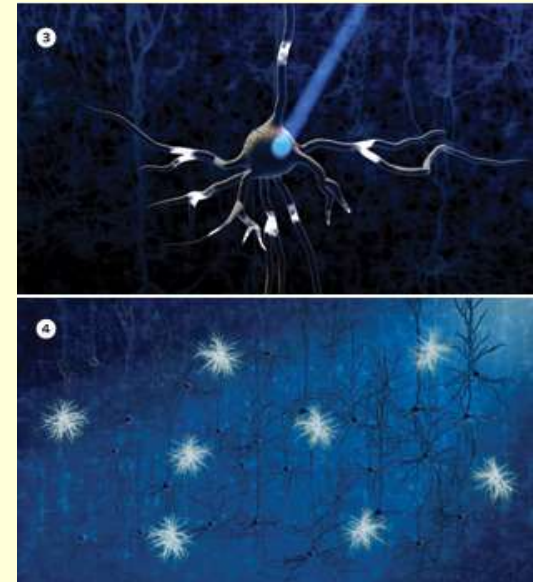




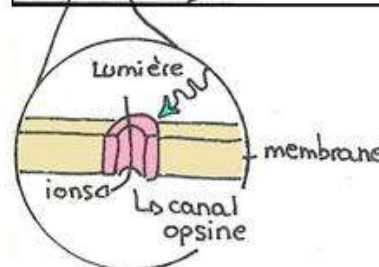
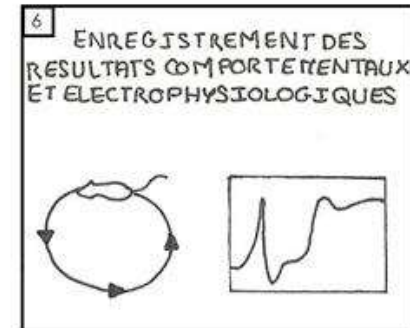
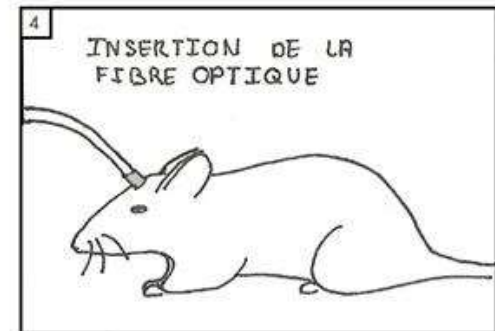
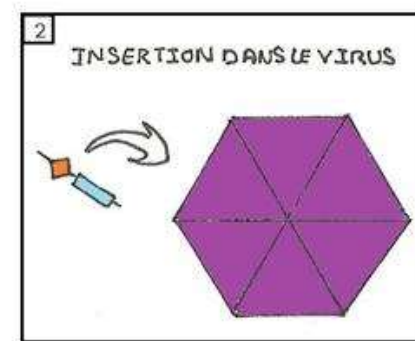
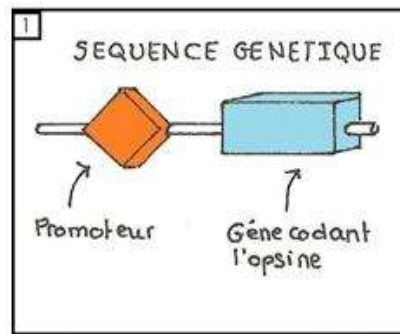
Un mélange de génétique, de virologie et d'optique permettant d'activer ou d'inactiver instantanément des groupes spécifiques de neurones dans le cerveau d'animaux vivants.

"This is God's gift to neurophysiologists"

En **2006**, une trentaine de laboratoires commencent à utiliser une technique nouvelle, l'**optogénétique**, mises au point par Karl Deisseroth et Ed Boyden l'année précédente.



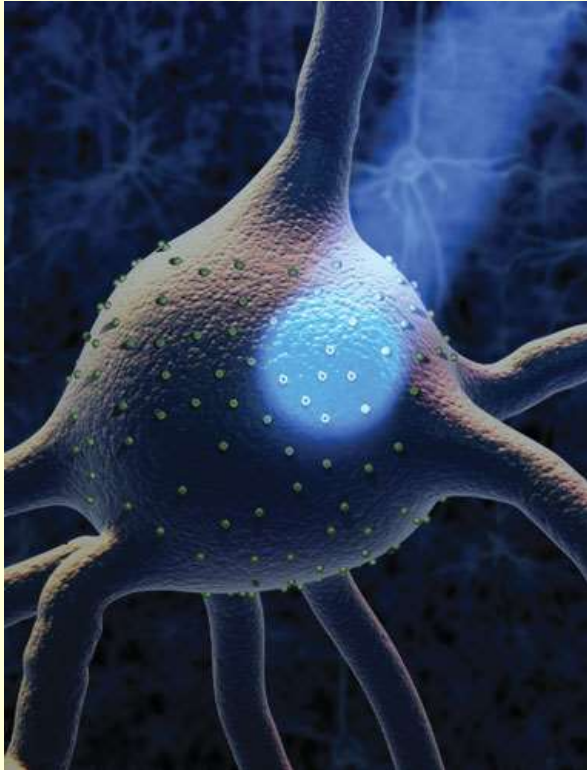
On peut utiliser des **promoteurs spécifiques** à un type cellulaire donné. Par exemple pour stimuler des neurones excitateurs du noyau subthalamique d'animaux modèles de la maladie de Parkinson, c'est le promoteur CamKIIa.



Et comme on peut faire
s'exprimer dans une même
population de neurones
des **canaux à rhodopsine**
excitateurs et inhibiteurs,

on peut, avec **différentes**
longueurs d'onde, exciter
ou inhiber sur demande
cette population de
neurones !





Comme le dit Gero Miesenböck, l'un des artisans principaux de l'optogénétique, « **pour briser un code, il faut pouvoir jouer avec**, n'importe quel « hacker » vous le dira. »

Et c'est exactement ce qu'apporte l'optogénétique :

la possibilité de « jouer avec » l'activité neuronale à une échelle temporelle (millisecondes) et spatiale (populations neuronales spécifiques) encore inégalée, et d'en observer l'effet sur le comportement.

A fait rentrer beaucoup de bouquins de biologie moléculaire et de virologie dans les labos d'électrophysiologie et occasionne encore bien des maux de tête techniques mais...

"Soon enough, this is going to be standard technology," says Philip Sabes.

Deux références :

The Birth of Optogenetics

An account of the path to realizing tools for controlling brain circuits with light.

By Edward S. Boyden | **July 1, 2011**

<http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/30756/title/The-Birth-of-Optogenetics/>

Optogenetics As Good As Electrical Stimulation

Neuroscience News

December 12, 2013

Optogenetics had been used in small rodent models. Research reported in *Current Biology* has shown that **optogenetics works effectively in larger, more complex brains.**

http://neurosciencenews.com/optogenetics-electrical-stimulation-neuroscience-research-675/?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+neuroscience-rss-feeds-neuroscience-news+%28Neuroscience+News+Updates%29

Cours 5: 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**

Activité cérébrale endogène;

Connexions réciproques dans les réseaux;

Oscillations et activité dynamique chaotique;

Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels possible de la synchronisation des rythmes cérébraux;

L'optogénétique



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

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

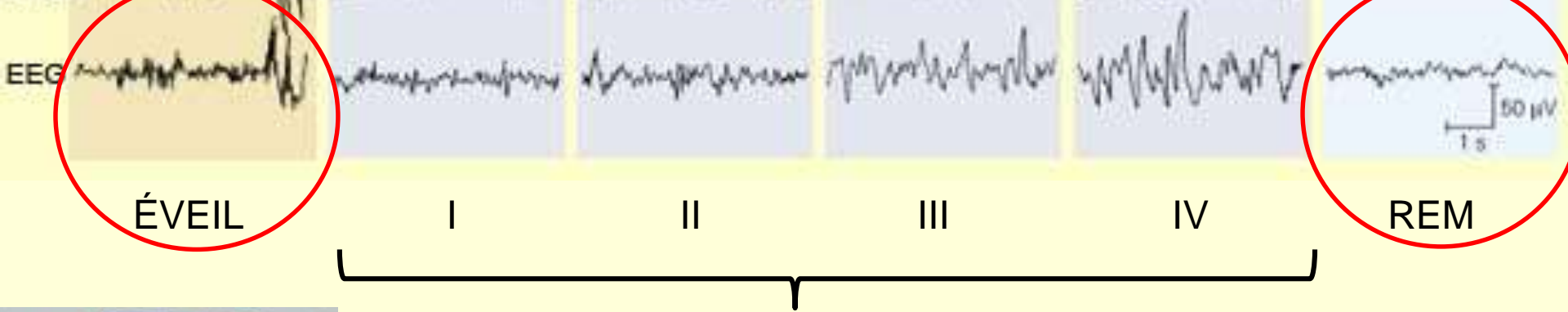


La pensée devient répétitive avec l'apparition du sommeil lent.

RÊVE



Elle est carrément illogique et étrange durant les rêves.



SOMMEIL PROFOND



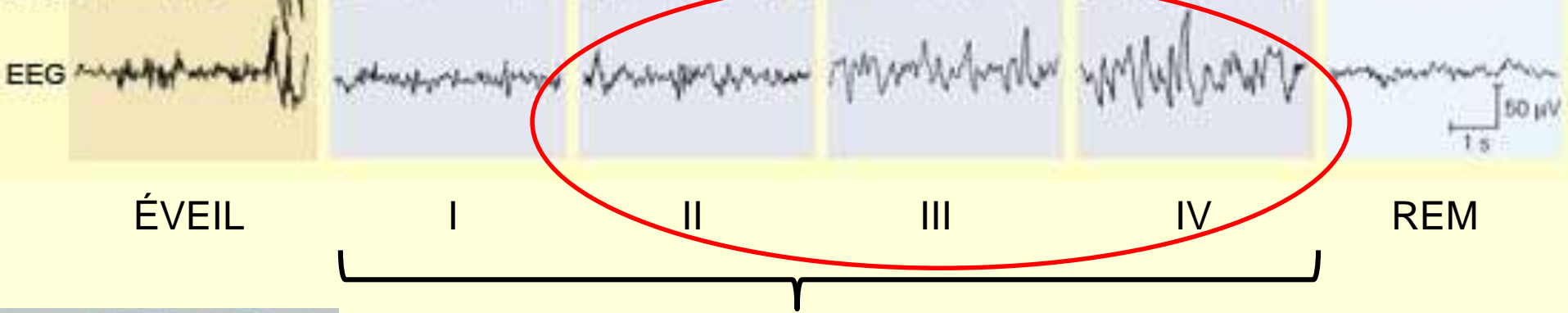
RÊVE



- 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

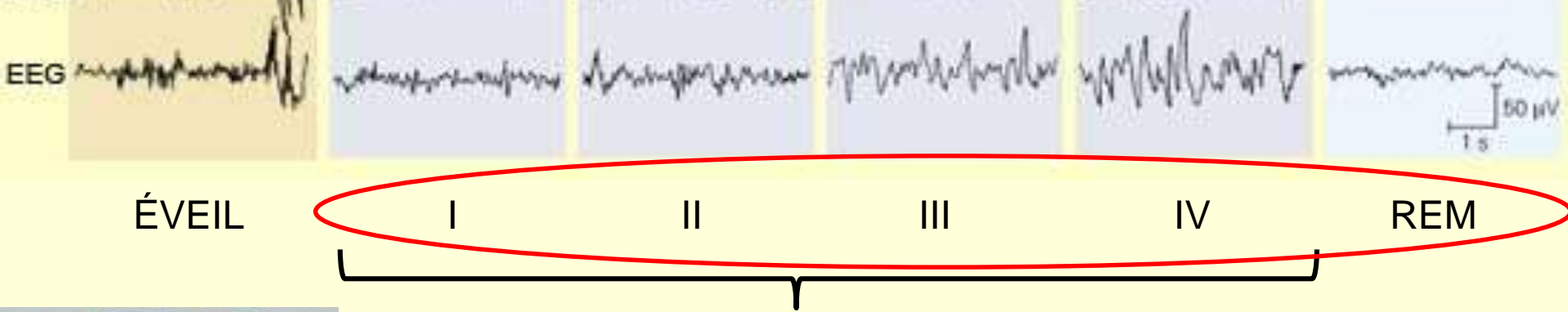


RÊVE



- 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**.



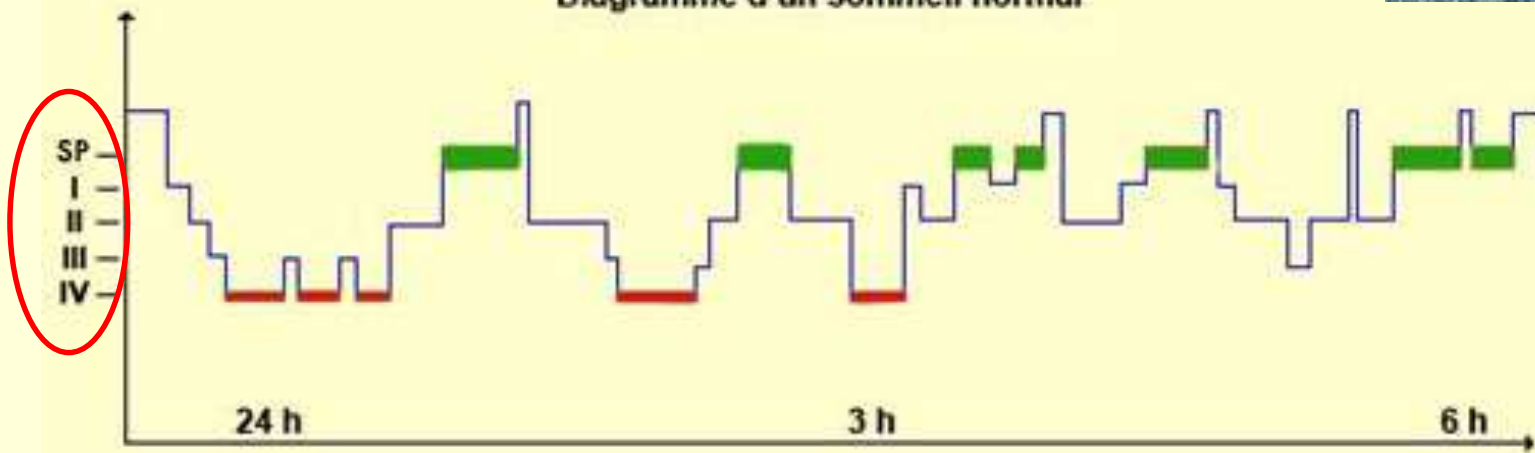
SOMMEIL PROFOND



RÊVE



Diagramme d'un sommeil normal

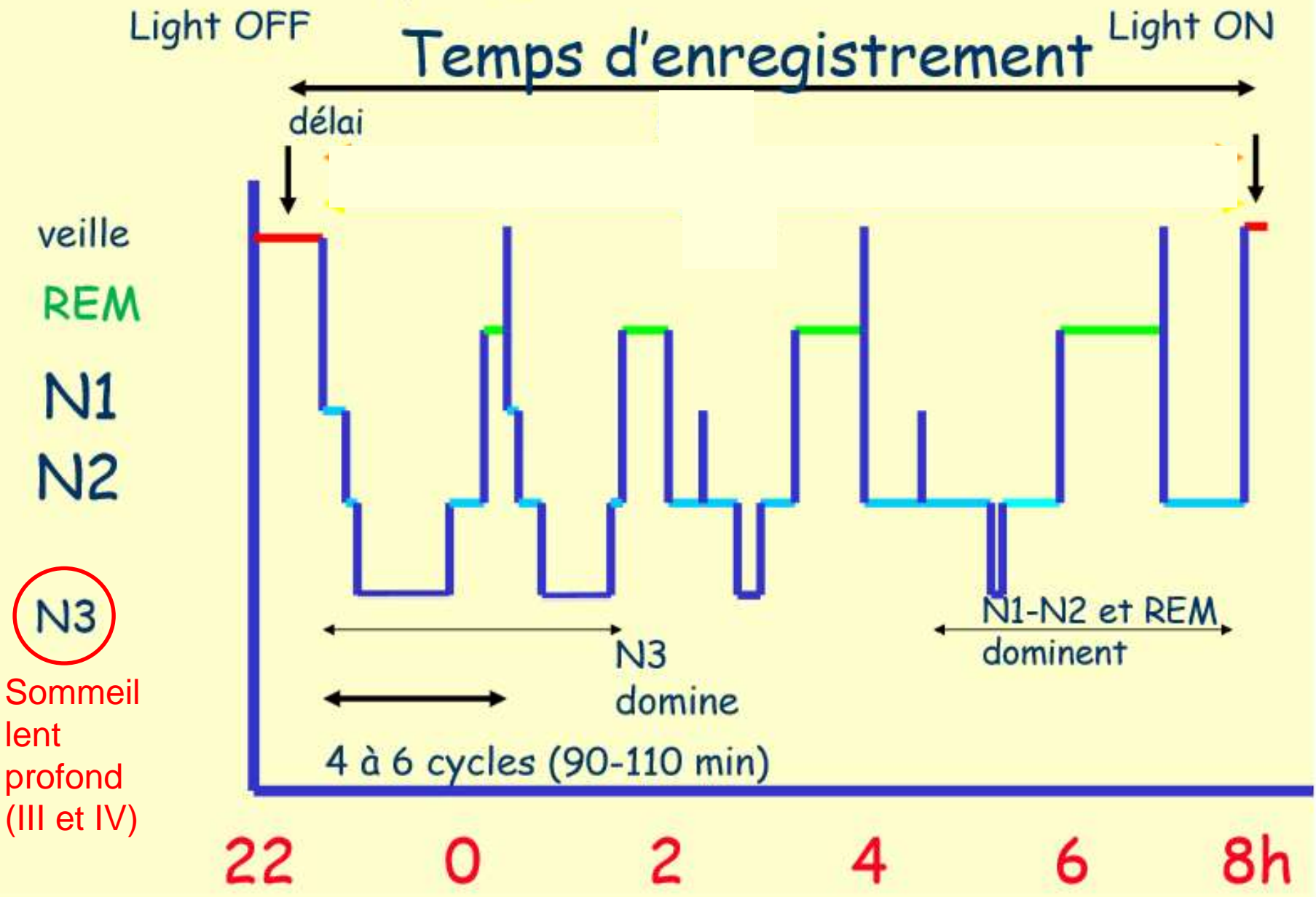


Sommeil lent : I à IV —

Sommeil paradoxal : V ■

Sommeil profond : IV ■

Hypnogramme Normal



N3
Sommeil
lent
profond
(III et IV)

Pourcentages et durées des stades

REM: 20-25%

Veille: < 5%

Stade N1: 2-5 %

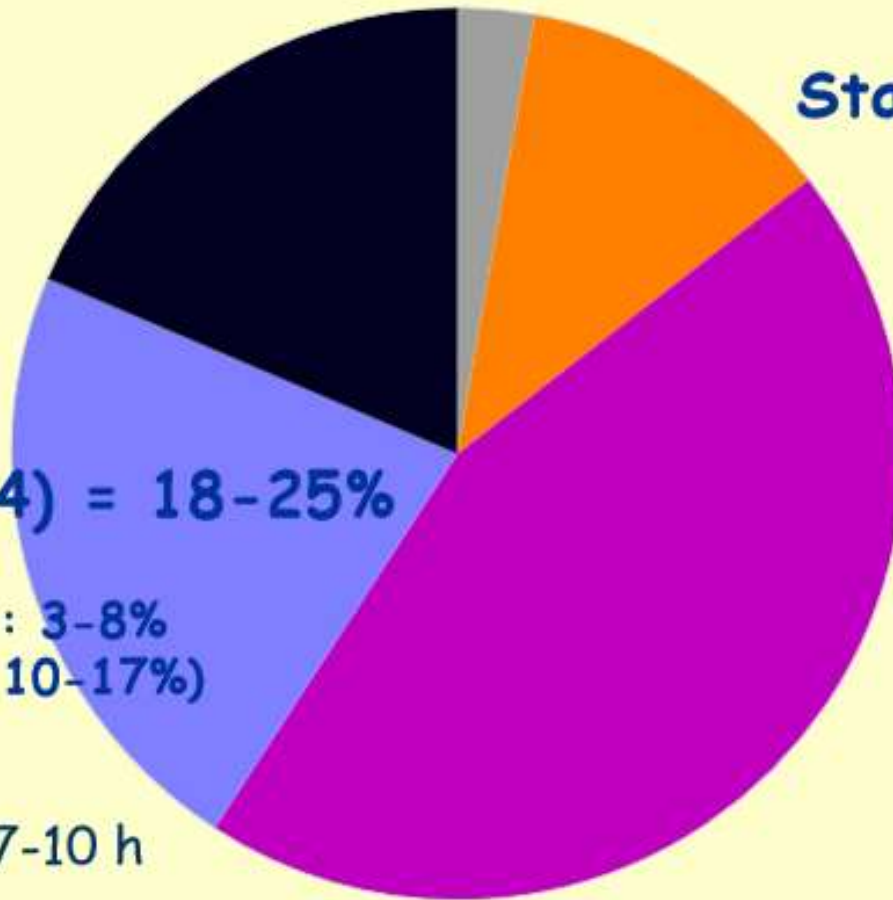
Stade N2: 45%-55%

N3 (3+4) = 18-25%

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

NREM : 75-80%

PTS = 7-10 h

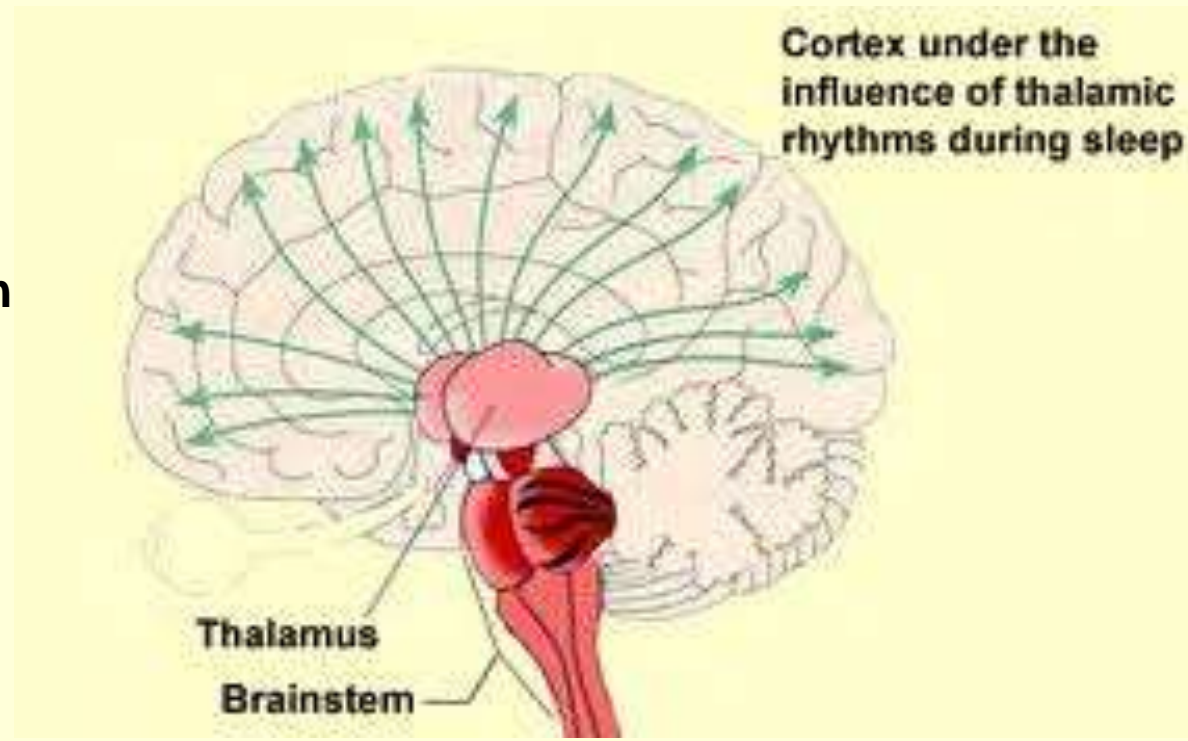


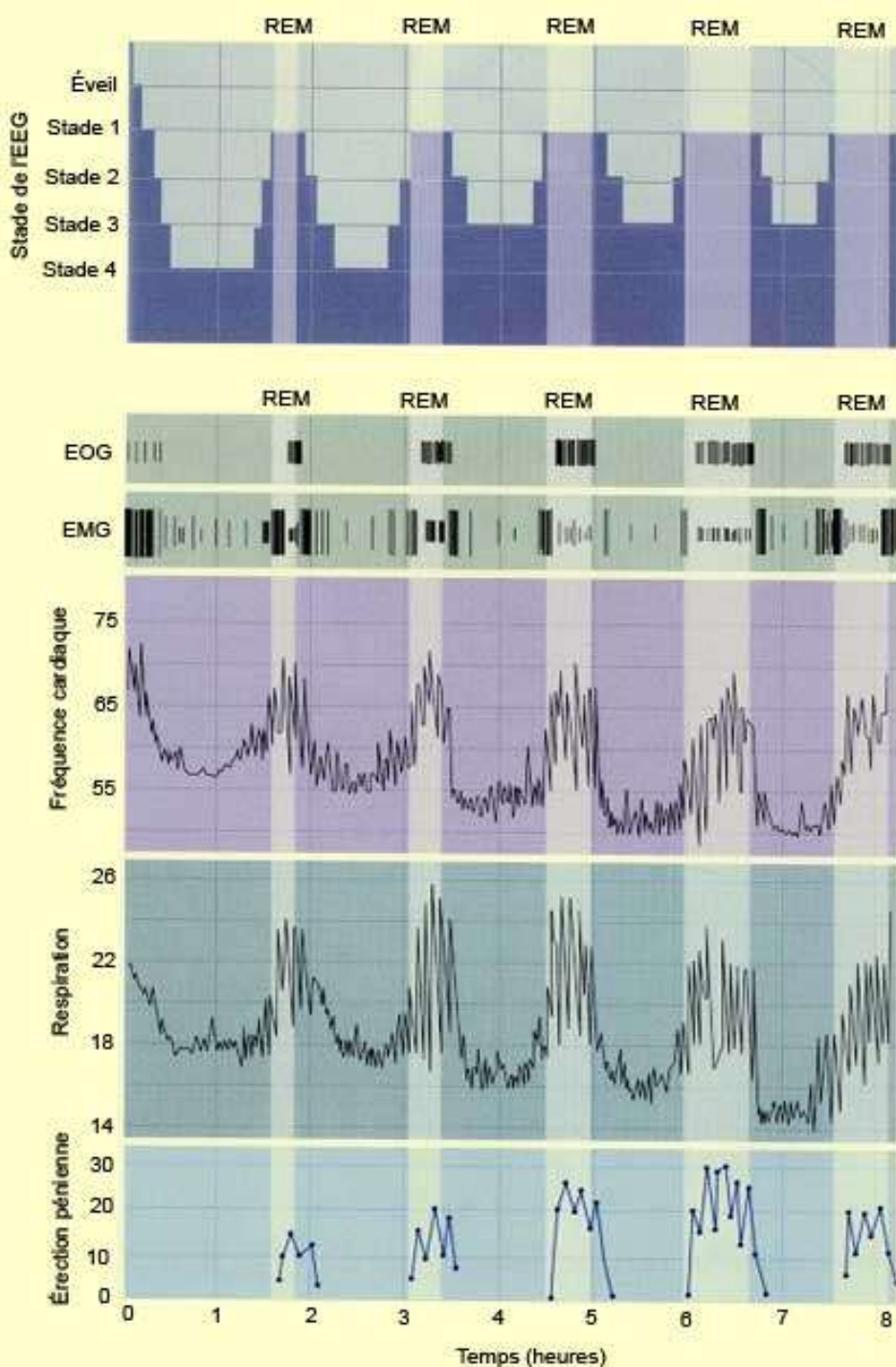
Le sommeil lent semble correspondre à un état fait pour le **repos**.

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.



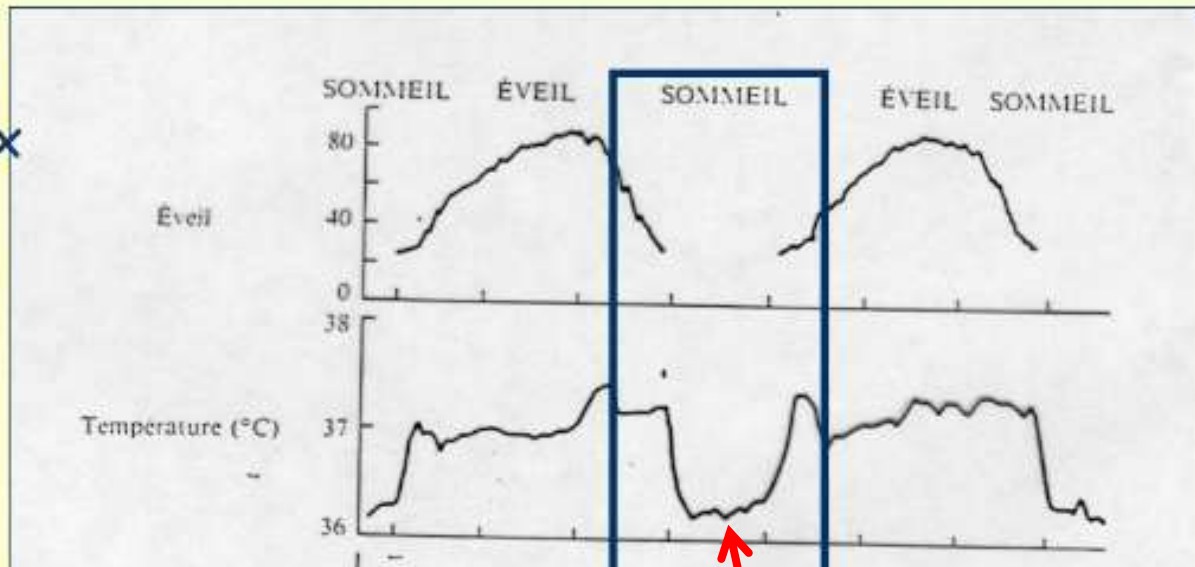


L'alternance du sommeil lent et paradoxal est aussi une alternance entre un état **économe** et un état **énergivore** du cerveau.

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.

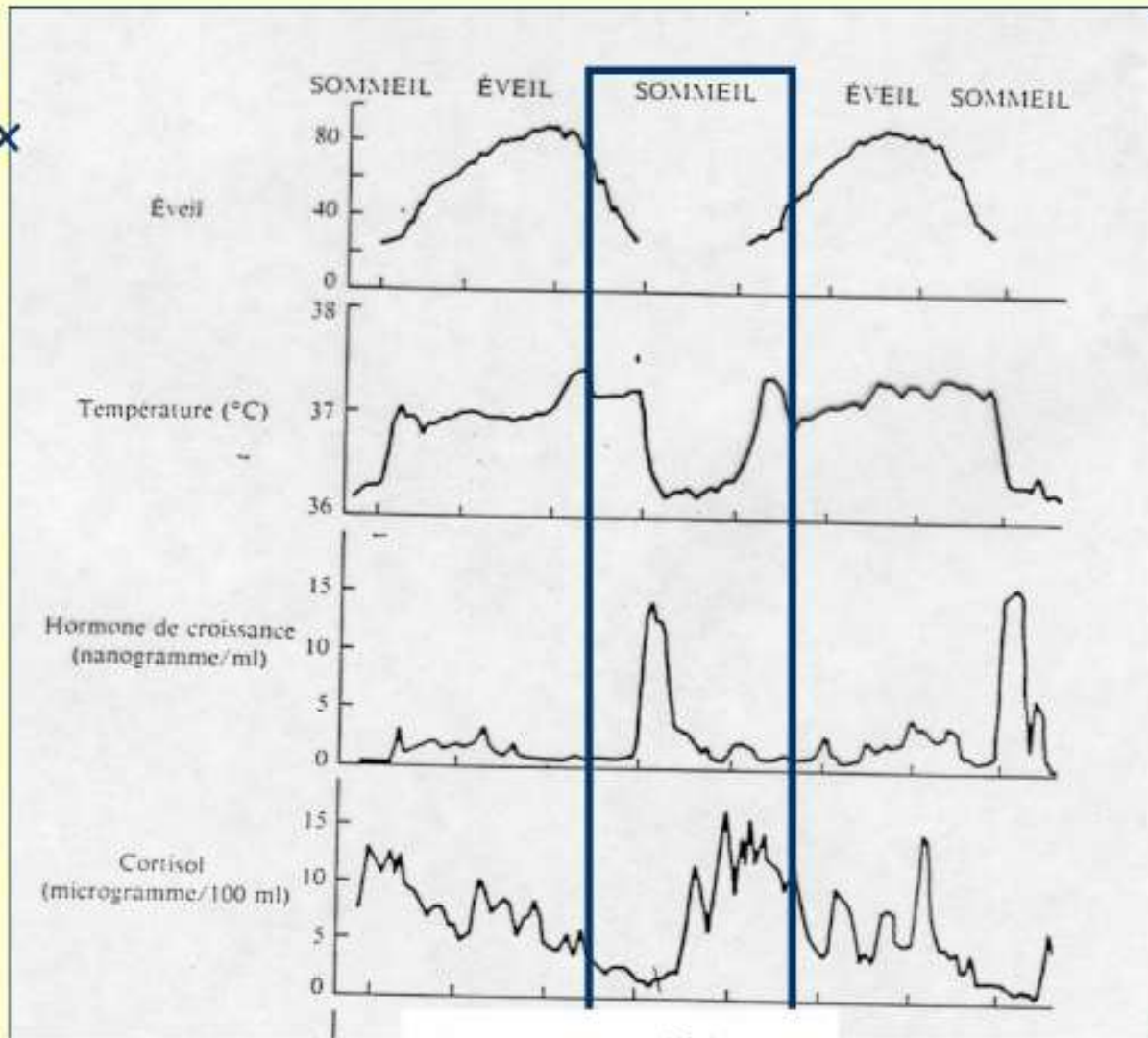
Rythmes hormonaux



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

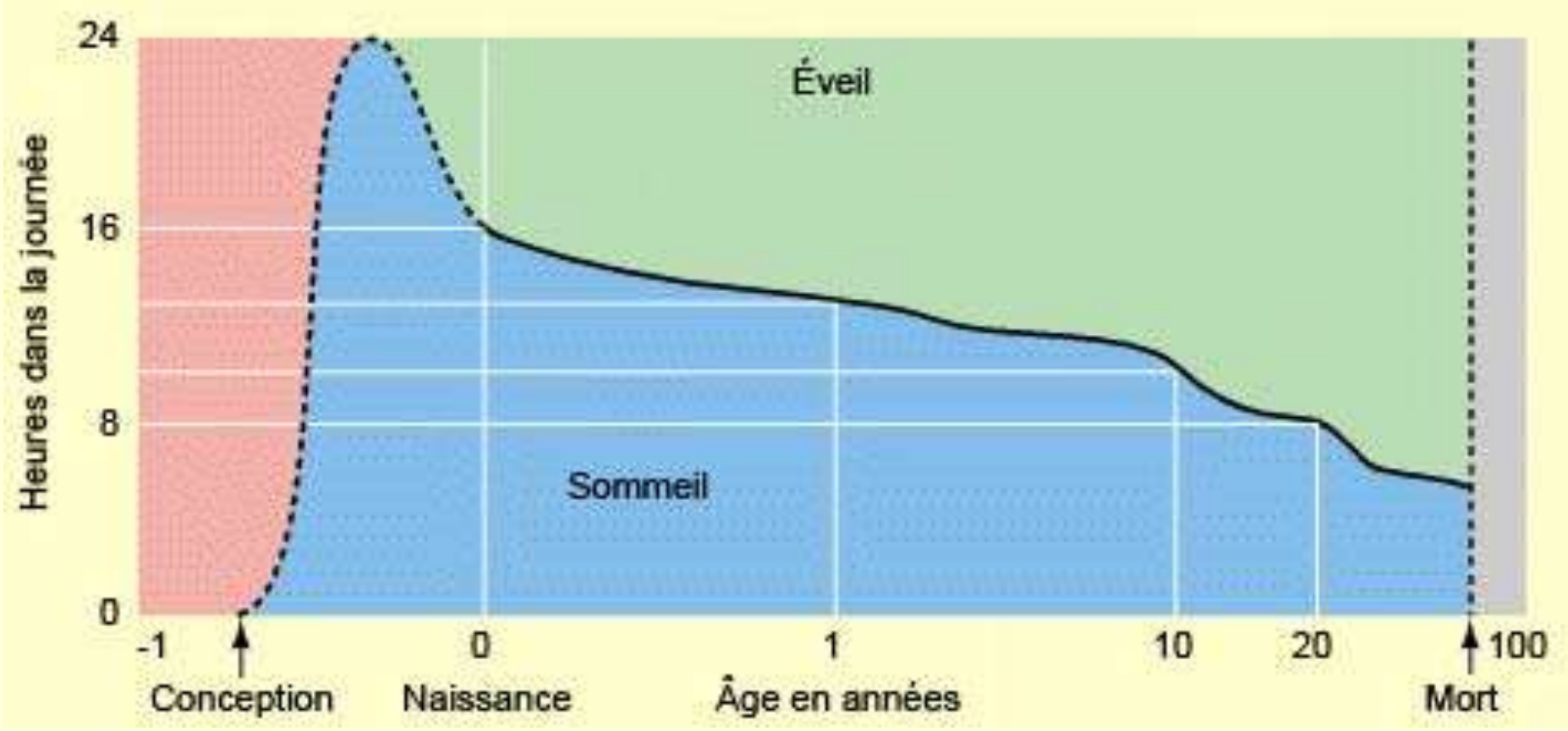


C'est durant le **sommeil profond** qu'ont lieu les divisions cellulaires et la production de l'hormone de croissance, d'où l'importance du sommeil chez l'enfant.

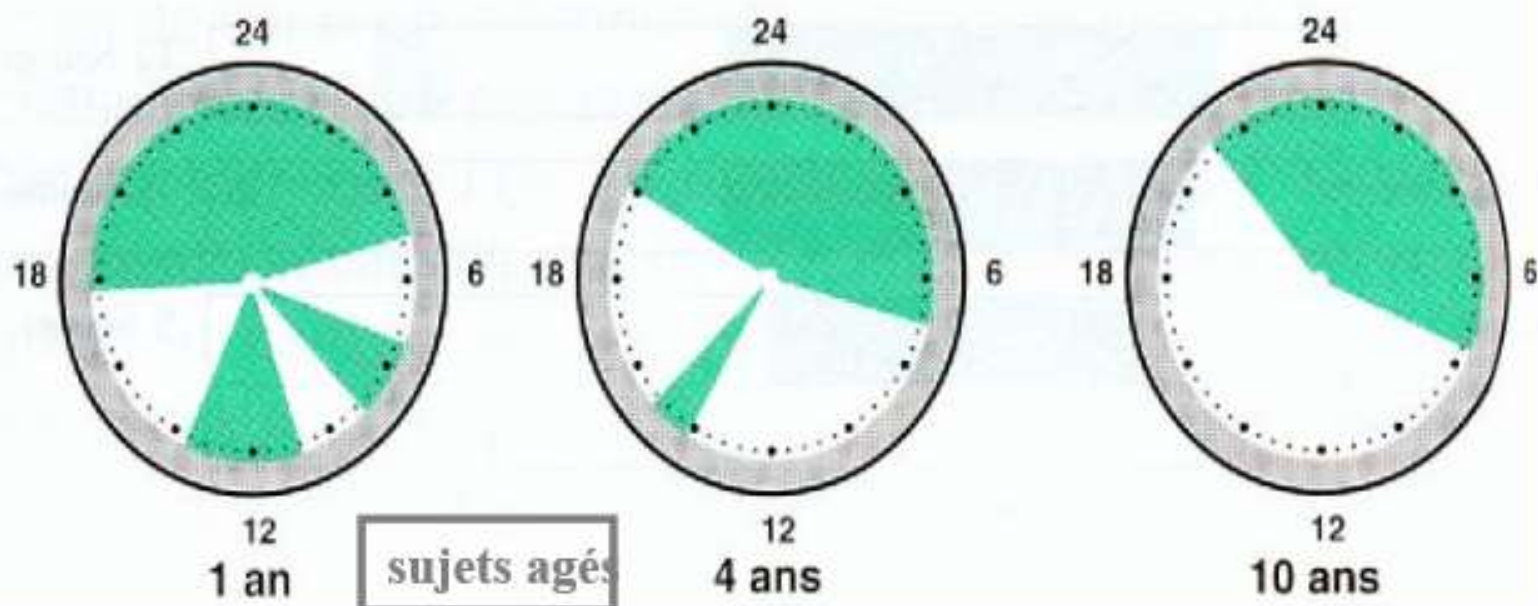
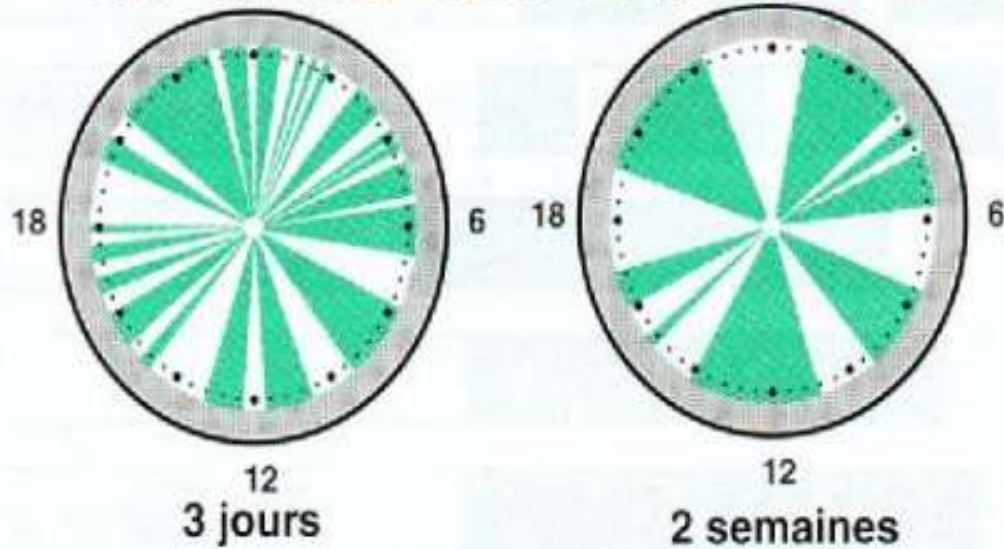
D'autres hormones ont aussi des pics de sécrétion durant la nuit.

mélatonine





Répartition des épisodes de sommeil au cours des 24h



sujets âgés

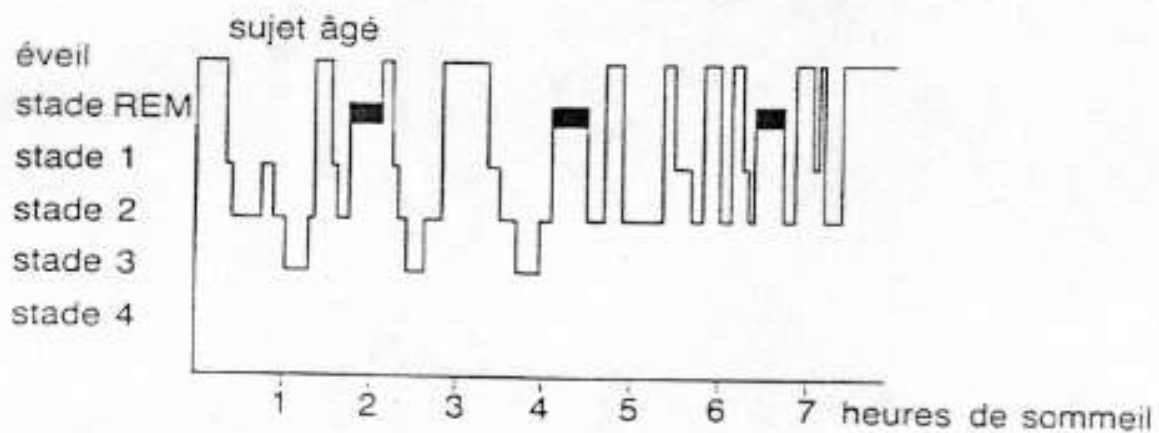
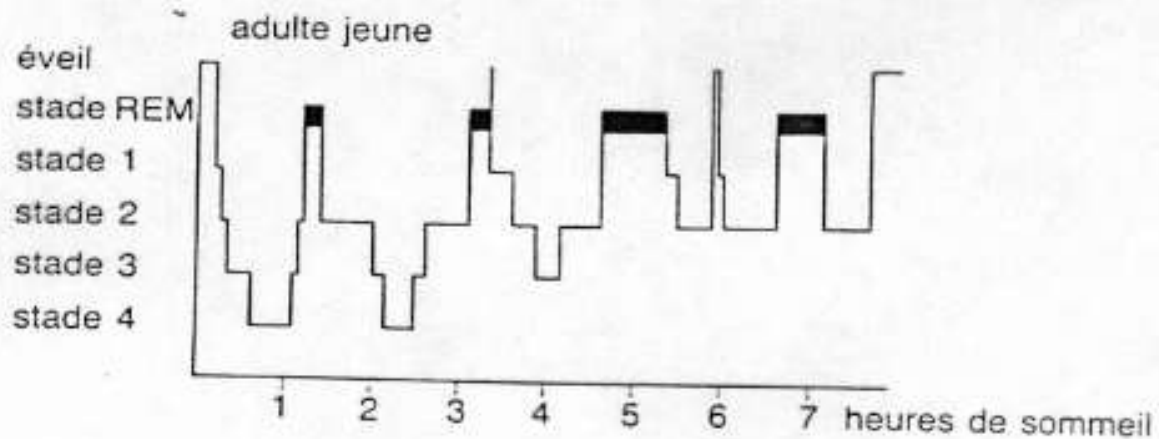
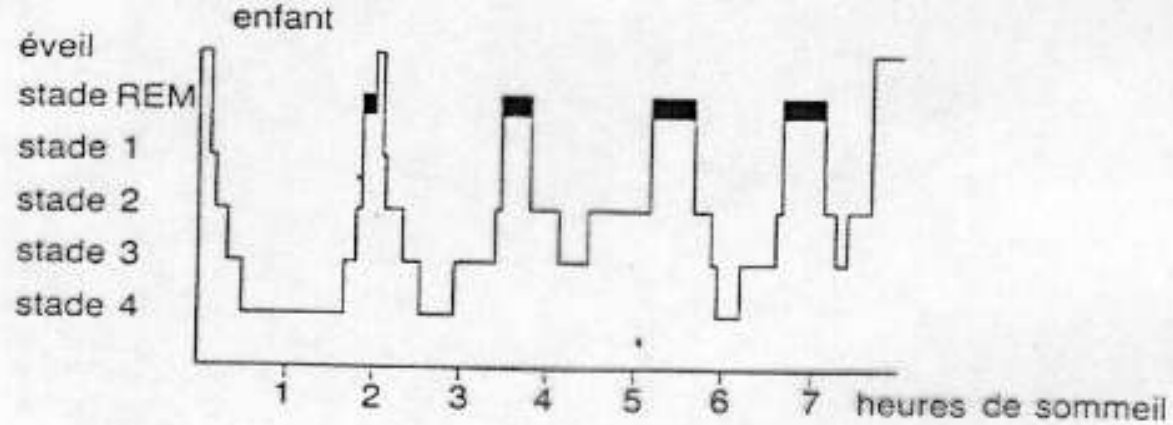
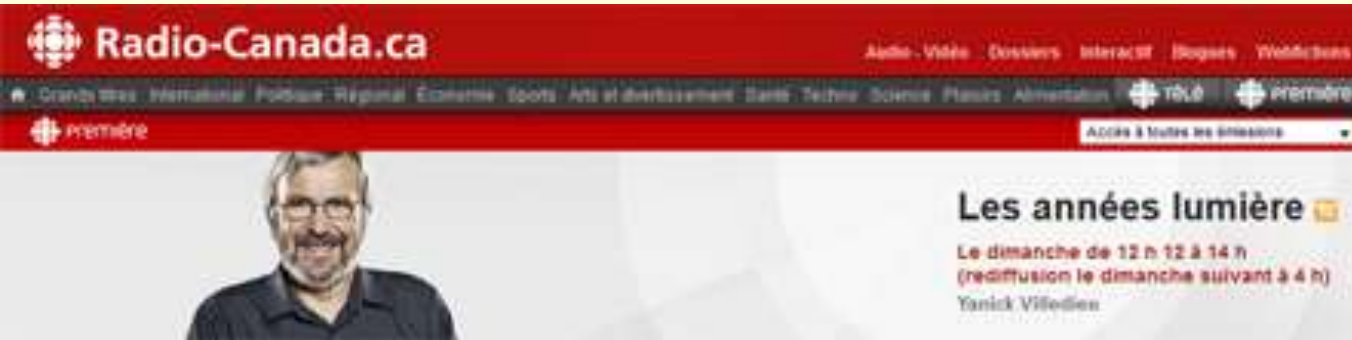


Fig. 6: Exemples d'hypnogrammes obtenus chez un enfant, un adulte jeune et un sujet âgé.



La « règle de trois », avec Roger Godbout, du Laboratoire de recherche sur le sommeil de l'hôpital Rivière-des-Prairies. **4 octobre 2015**

http://ici.radio-canada.ca/emissions/les_annees_lumiere/2015-2016/archives.asp?nic=1&date=2015-10-04

Pourquoi dort-on ?

Dans les années '80 et '90, des expériences chez les animaux ont montré que la privation totale de sommeil entraîne la mort au bout de 230 à 235 heures (environ 10 jours).

Les animaux privés de sommeil s'alimentaient plus mais leur température baissait, ce qui est paradoxal et dénote un fort dérèglement du métabolisme.

Tous les animaux ont un cycle de repos (même les abeilles, relaxation muscle du cou).

Chez l'humain, on peut aussi observer ce qui se passe quand on ne dort pas assez ou, comme le disent les médecins, quand on montre les signes du **syndrome d'insuffisance du sommeil**.

C'est d'abord la vigilance, la concentration et la capacité de réfléchir qui sont diminuées.

On observe ensuite un ralentissement des réflexes, des troubles de la mémoire, de la fatigue musculaire, des sautes d'humeur, voire de l'agressivité et de la difficulté à se situer dans le temps ou l'espace.

Cela peut aller jusqu'à des **hallucinations** semblables à celles qui surviennent habituellement au moment de s'endormir, entre rêve et réalité. Anodines lorsqu'on est au lit, elles peuvent être fatales au travail ou au volant. En fait, le manque de sommeil serait la cause cachée de la majorité des "**erreurs humaines**" qui **provoquent des accidents**.

→ Il y aurait près de 10% de plus d'accidents de la route le lendemain du jour où on avance l'heure.

Chez l'humain, on peut aussi observer ce qui se passe quand on ne dort pas assez ou, comme le disent les médecins, quand on montre les signes du **syndrome d'insuffisance du sommeil**.

C'est d'abord la vigilance, la concentration et la capacité de réfléchir qui sont diminuées.

On observe ensuite un ralentissement des réflexes, des troubles de la mémoire, de la fatigue musculaire, des sautes d'humeur, voire de l'agressivité et de la difficulté à se situer dans le temps ou l'espace.

Cela peut aller jusqu'à des **hallucinations** semblables à celles qui surviennent habituellement au moment de s'endormir, entre rêve et réalité. Anodines lorsqu'on est au lit, elles peuvent être fatales au travail ou au volant. En fait, le manque de sommeil serait la cause cachée de la majorité des "**erreurs humaines**" qui **provoquent des accidents**.

À plus long terme, plusieurs études ont trouvé une relation entre la quantité et la qualité du sommeil et plusieurs problèmes de santé chroniques. C'est le cas par exemple de l'**obésité**, du **diabète** ou de l'**hypertension**.

Dans ces trois cas, le manque de sommeil perturbe des mécanismes régulateurs qui se mettent normalement en branle durant la nuit.

Aucun humain ne peut dormir moins de 4 h par nuit (sommeil « incompressible »)

Mais il y a des gros dormeurs et des petits dormeur, avec une moyenne 7h30 – 8h pour la majorité des gens.

15 à 20% des gens dorment moins de 6 heures
10% des gens plus de 9 heures

Il semble qu'avec l'entraînement, on puisse réduire progressivement d'une heure ou deux son temps de sommeil normal sans ressentir trop de fatigue.

C'est d'ailleurs ce qui semble s'être passé dans les sociétés développées durant le dernier siècle : **les adultes de 1910 dormaient en moyenne 9 heures par nuit**, alors que celui d'aujourd'hui se contente de 7,5 à 8 heures.

L'éclairage électrique qui permet d'augmenter facilement la durée de jours et la valorisation croissante de valeurs liées à la productivité durant ce siècle y sont sans doute pour quelque chose.

Dans notre société obsédée par la performance, on cite souvent en exemple Napoléon, Louis XIV ou Churchill qui dormaient, dit-on, que quelques heures par nuit.

Mais curieusement, on oublie de parler de tous les autres qui, comme Einstein, avait besoin de 10, et parfois même de 12 heures de sommeil par nuit !

Différents « **style de sommeil** » aussi :

on se couche plus ou moins tard et on se lève plus ou moins tôt.

Mécanismes neuronaux produisant le sommeil :

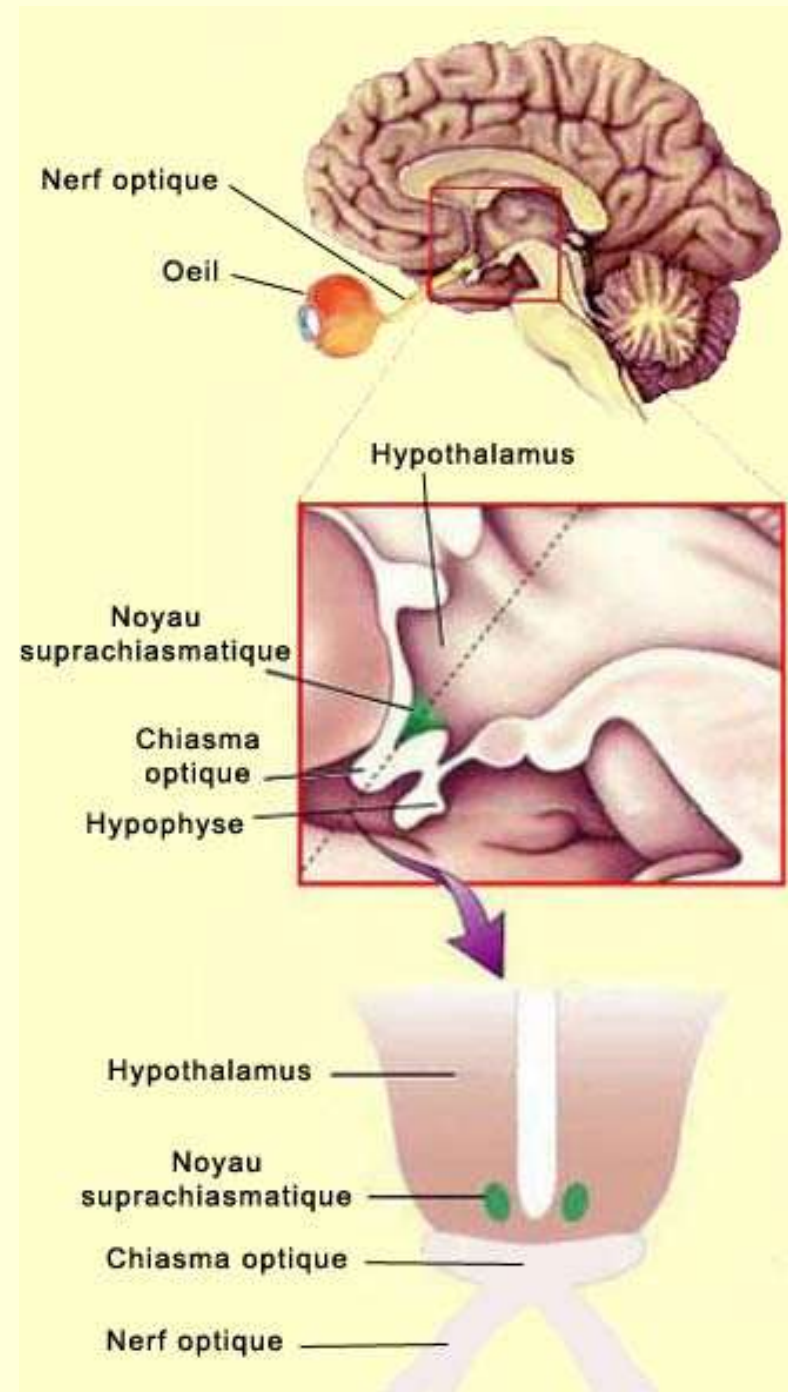
Pourquoi et comment on **s'endort** ?

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.

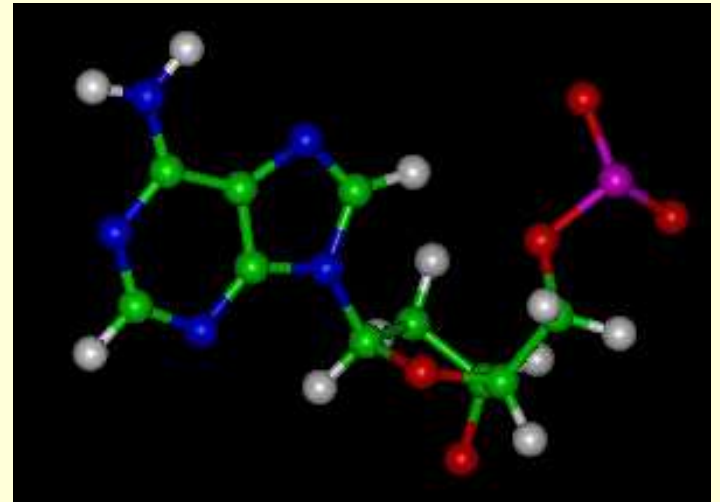
C'est aussi ce qu'on appelle **la dette de sommeil**, qui s'accumule durant toute la journée.

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.



Caféine

Plusieurs caractéristiques de l'**adénosine** en font un candidat idéal comme facteur hypnogène :

- sa concentration dans le cerveau est plus élevée durant l'éveil que durant le sommeil;
- elle croît durant un éveil prolongé;
- et l'administration d'adénosine ou de ses agonistes induit la somnolence.

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.

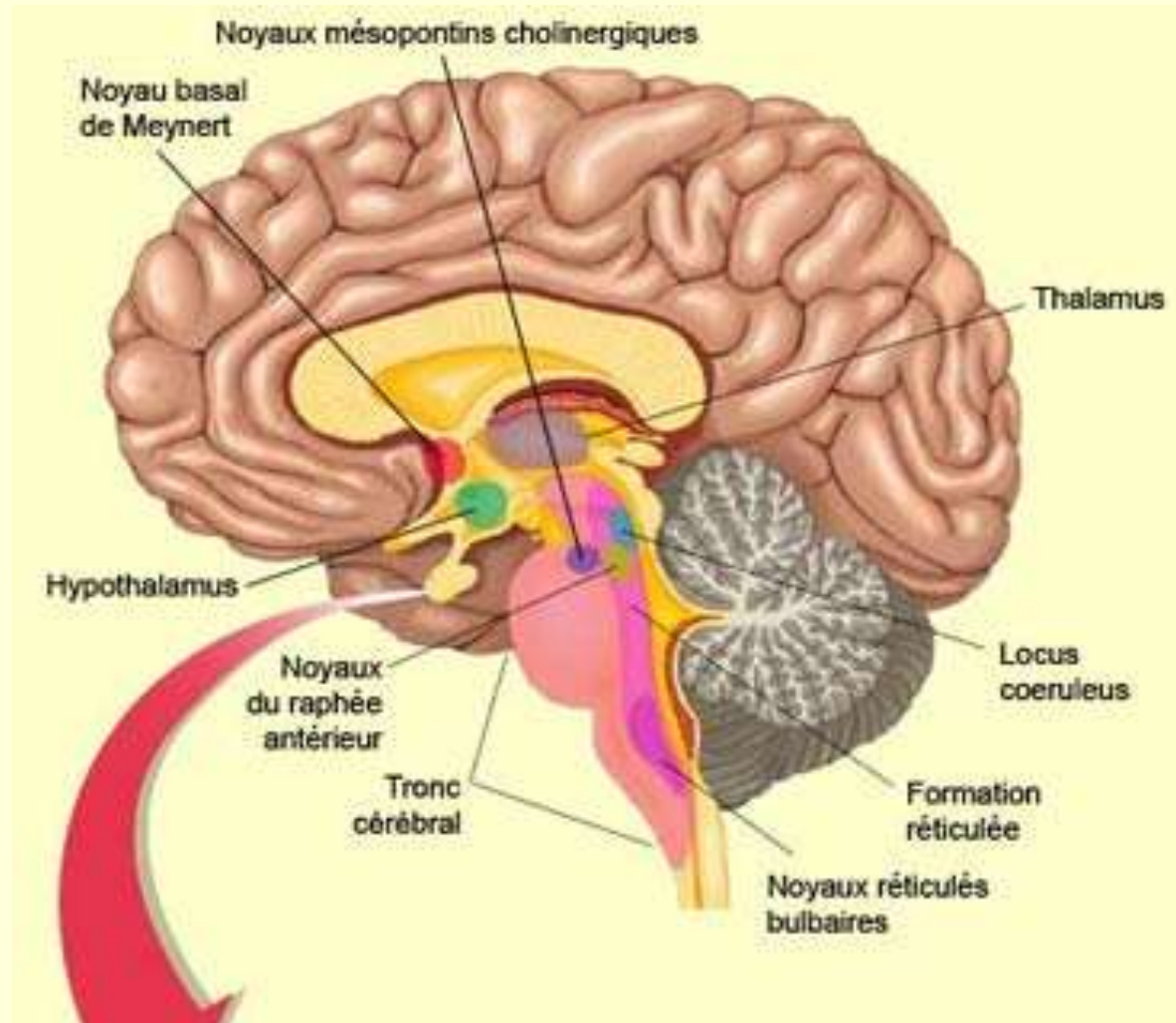
La forte activité cérébrale durant l'éveil entraîne une forte consommation d'ATP et par conséquent l'accumulation d'adénosine.

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.

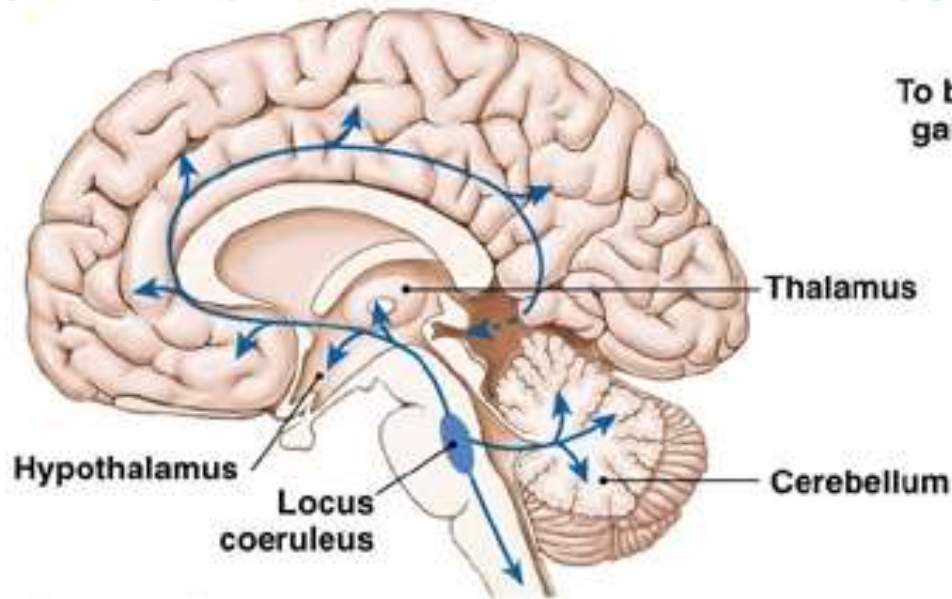
Les régulations complexes entre éveil et sommeil

Neuromodulateurs de l'éveil

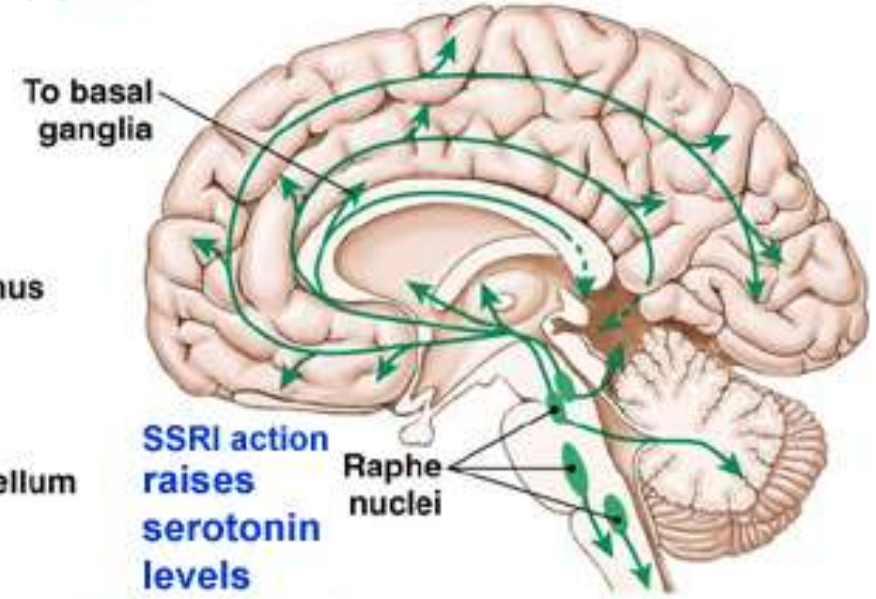
Être éveillé n'est pas le fruit du travail d'un « centre de l'éveil » dans le cerveau mais bien le résultat de l'activation d'un réseau complexe et redondant d'une **dizaine de groupes de neurones** répartis de l'hypothalamus au bulbe rachidien.



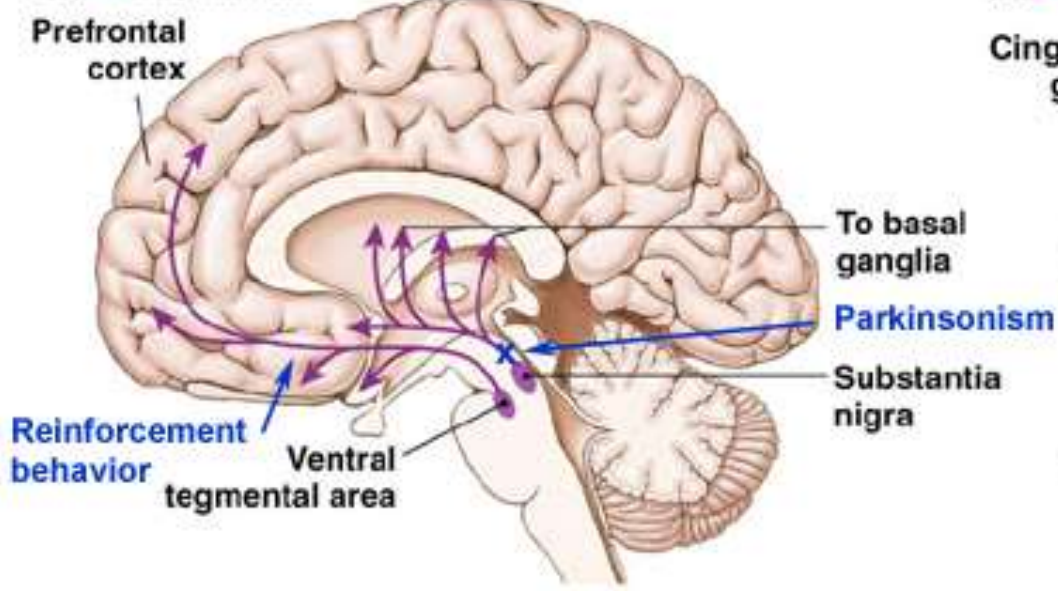
(a) • Norepinephrine



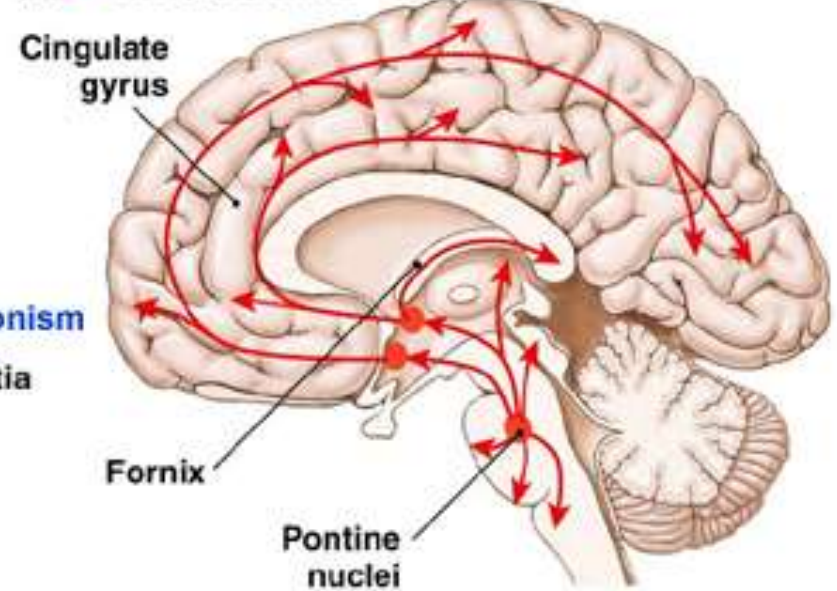
(b) • Serotonin



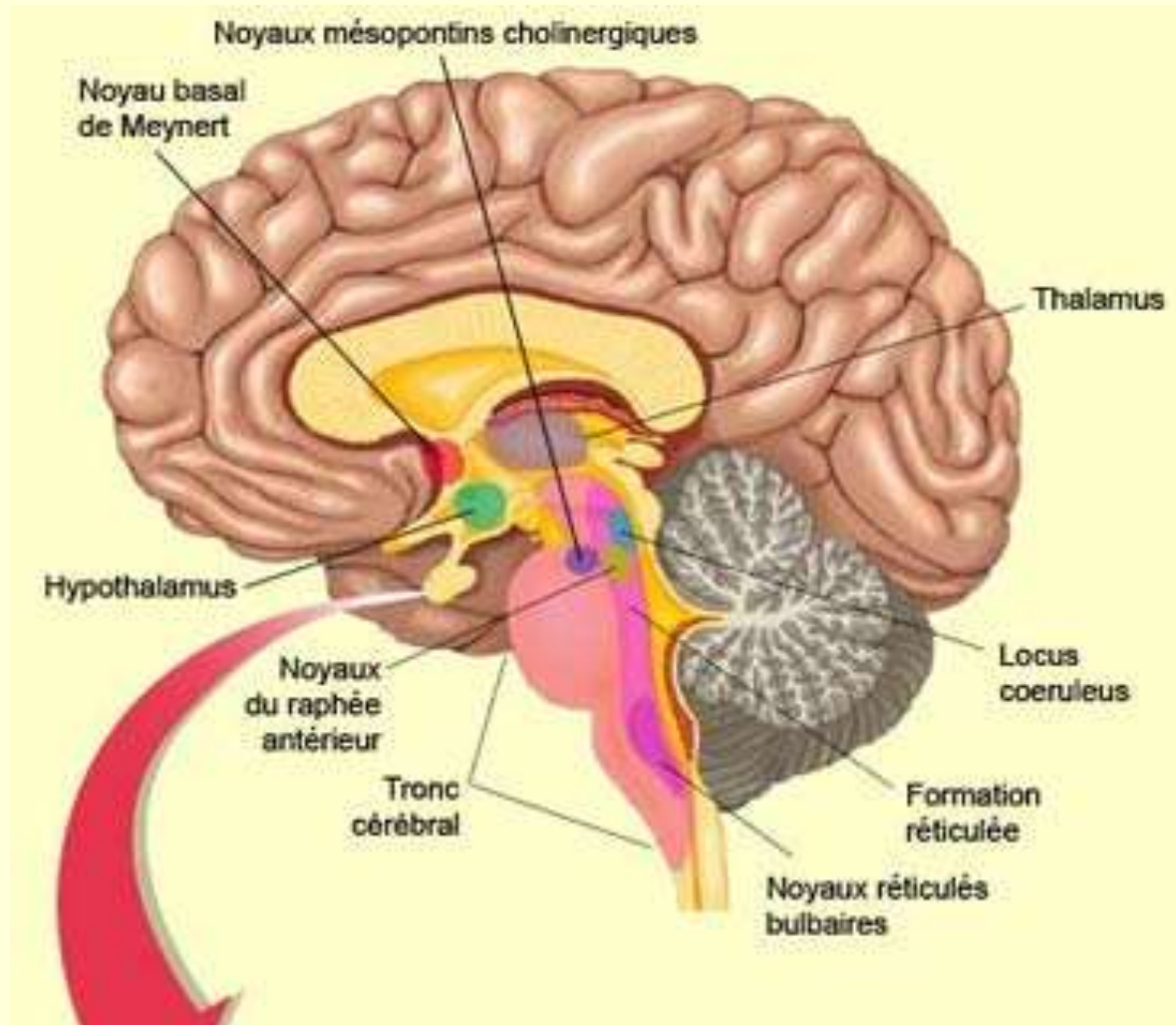
(c) • Dopamine



(d) • Acetylcholine



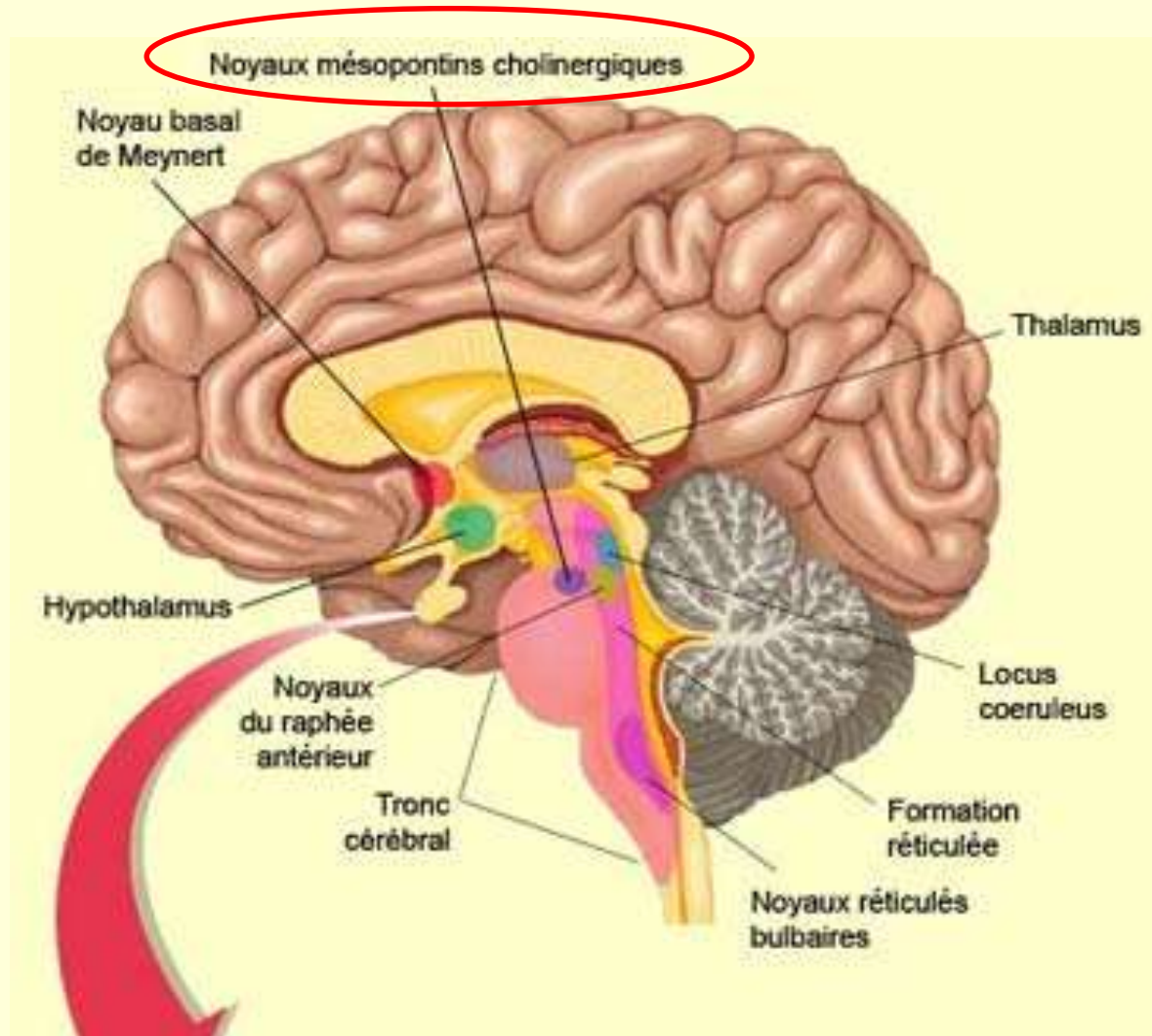
Ces neurones communiquent entre eux grâce à différents neurotransmetteurs mais ont tous en commun de **diminuer ou d'arrêter leur activité pendant le sommeil.**



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

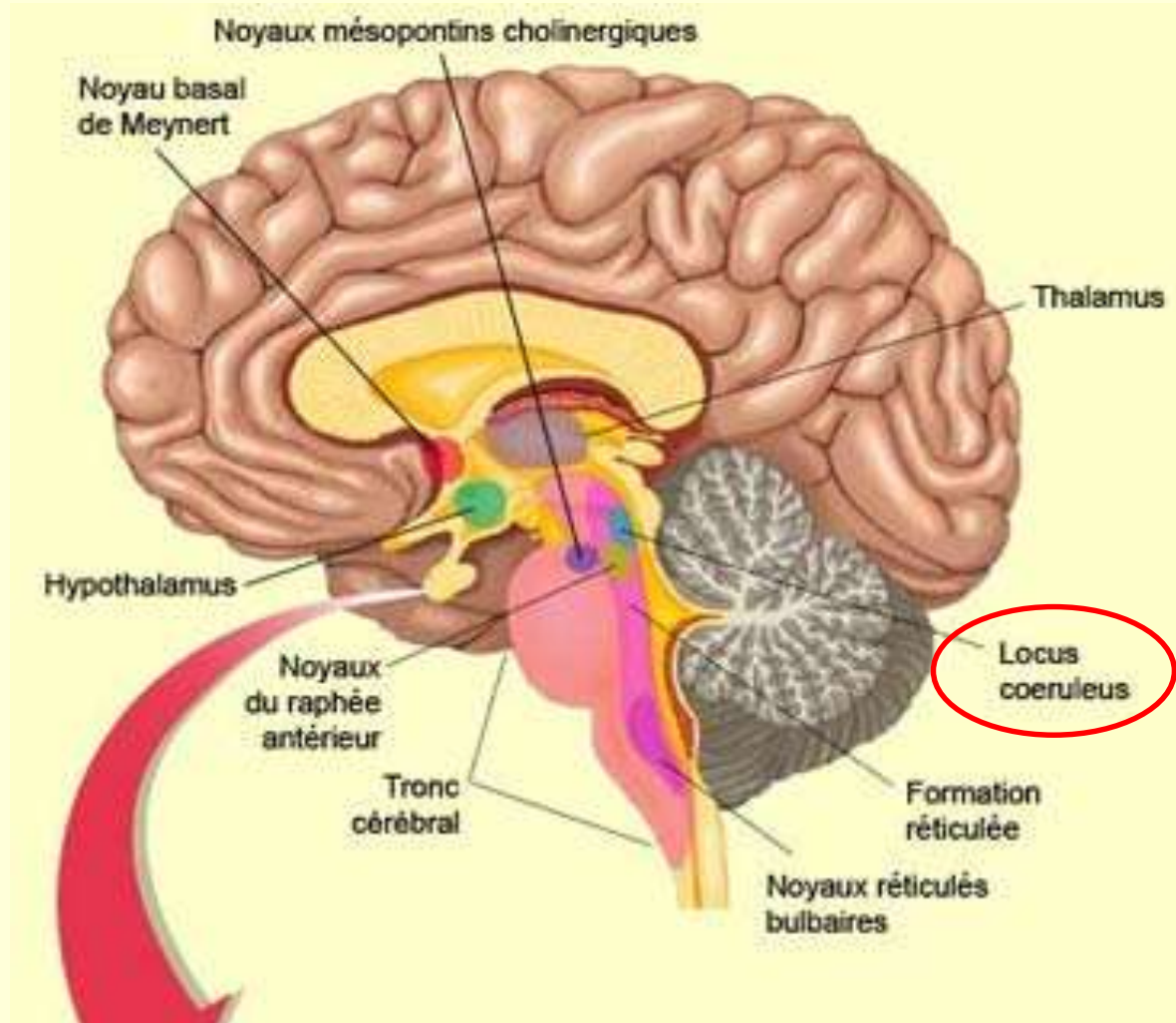
L'acétylcholine produite par ces noyaux exerce une double action : elle diminue l'activité du noyau réticulaire thalamique appartenant au système du sommeil ; et elle active les neurones thalamocorticaux impliqués dans l'éveil.

(sont aussi actifs pendant le sommeil paradoxal)

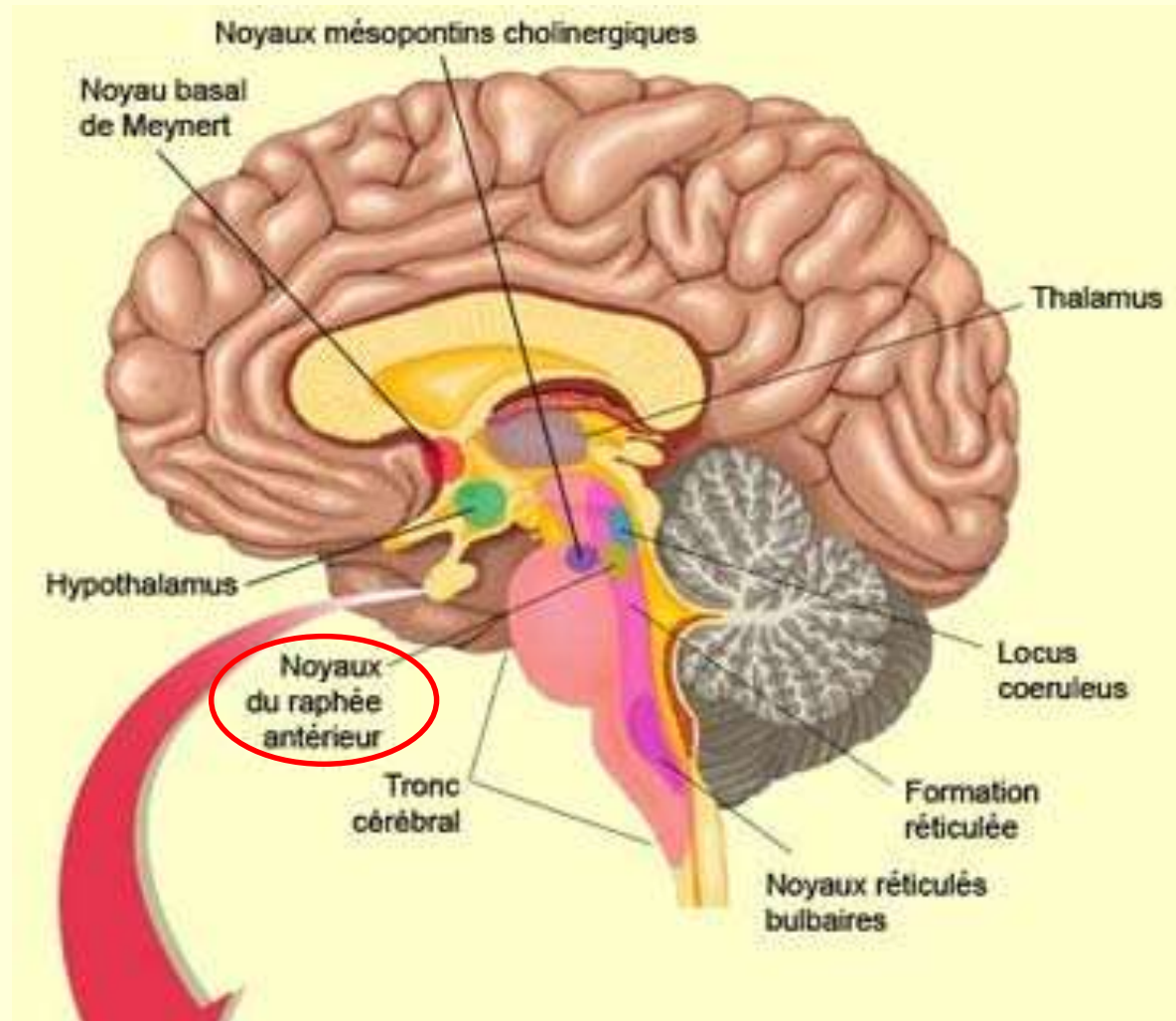


Les noyaux du locus coeruleus, situés dans la partie dorsale du pont, et dont les projections noradrénergiques influencent des structures cérébrales comme le thalamus, l'hippocampe et le cortex.

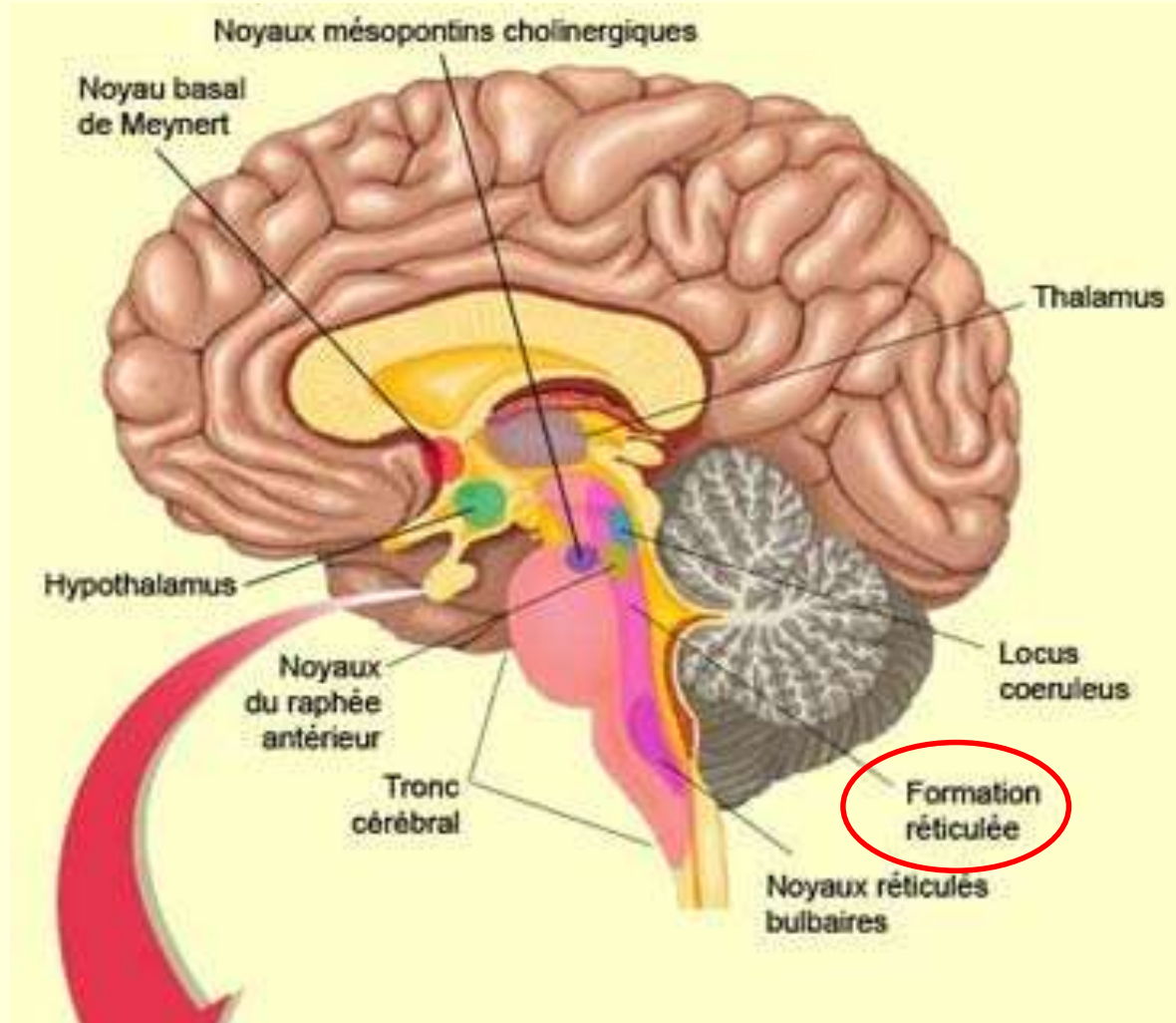
L'activité du locus coeruleus est maximale chez le sujet éveillé et actif, réduite durant un éveil calme, encore plus réduite en sommeil lent, et complètement abolie en sommeil paradoxal.



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.

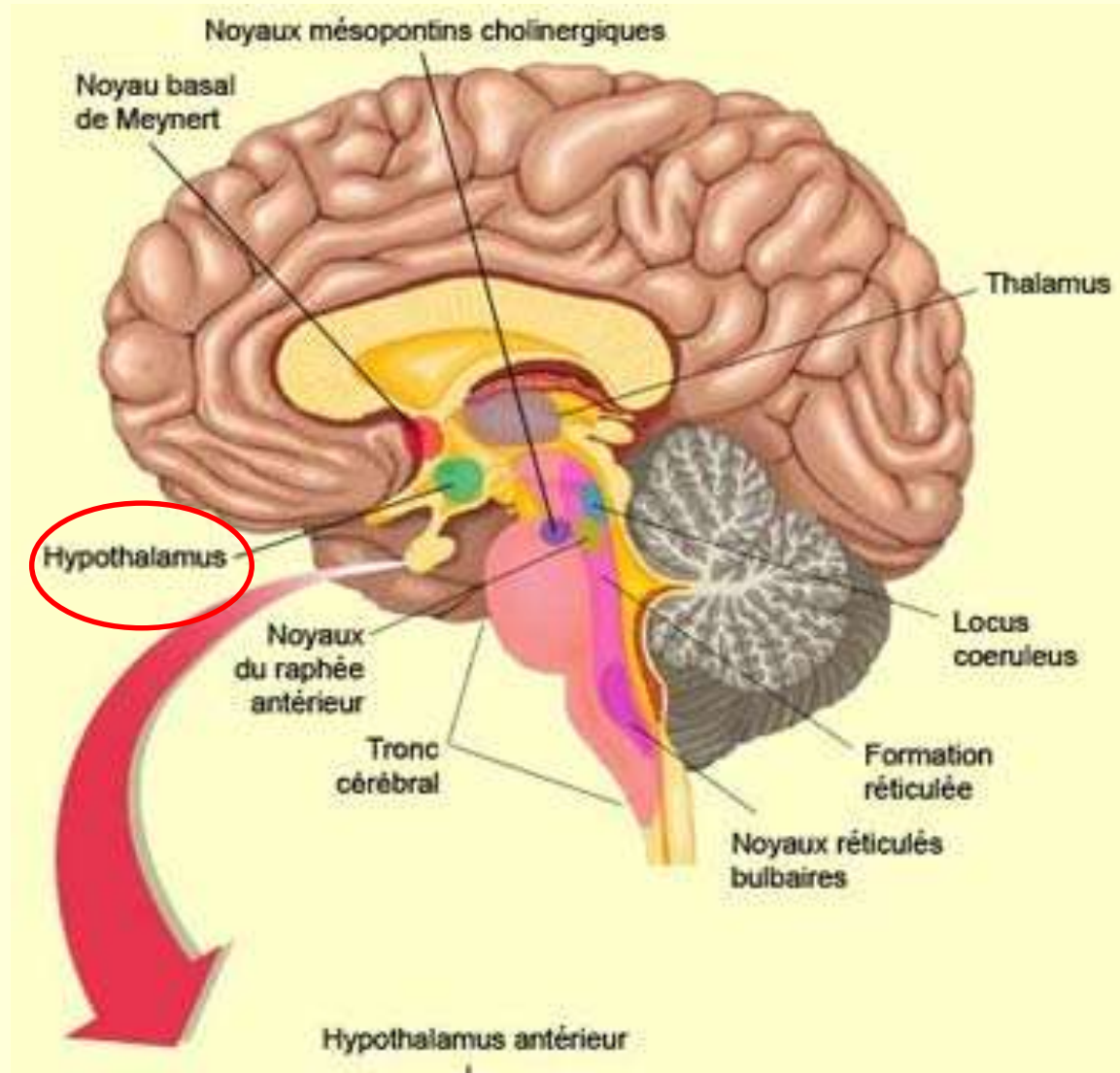


La formation réticulée mésencéphalique, qui se projette massivement sur les noyaux thalamiques, qui vont ensuite influencer tout le cortex. Son rôle est un de désynchronisateur du cortex au sens large, favorisant l'éveil mais aussi le sommeil paradoxal.



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.

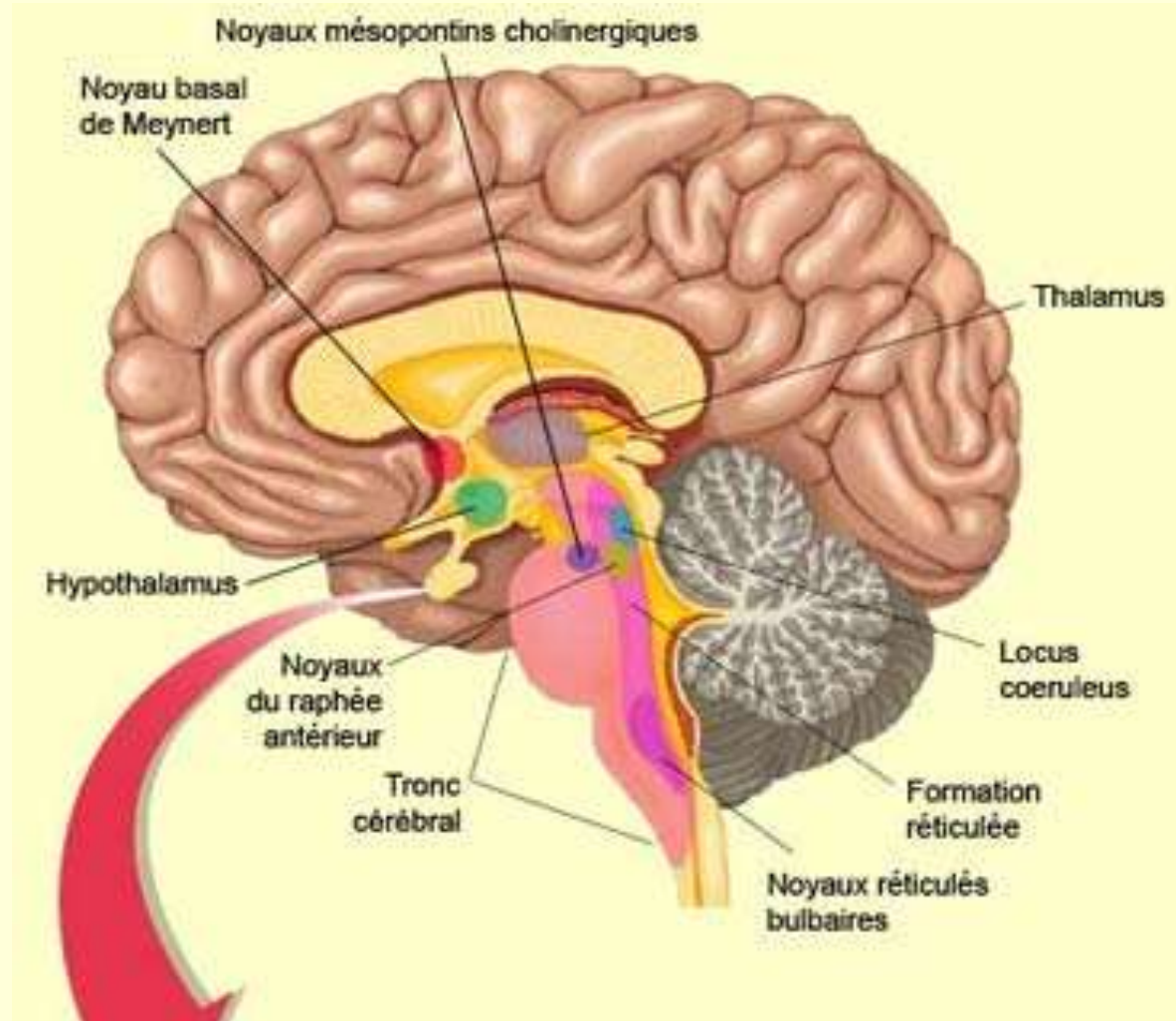


L'ensemble de ces structures du tronc cérébral reçoit des **collatérales des afférences sensorielles et végétatives** qui participent ainsi au maintien de leur activité.

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

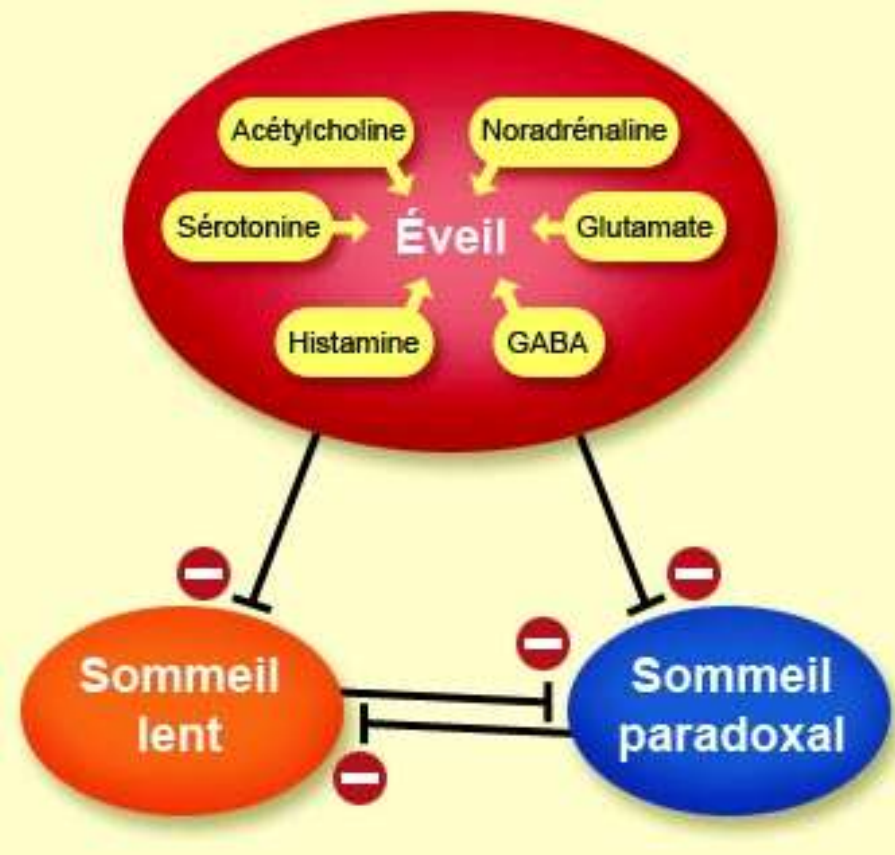
Aucune des structures décrites, prise isolément, n'est donc indispensable à l'activation corticale.

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** :

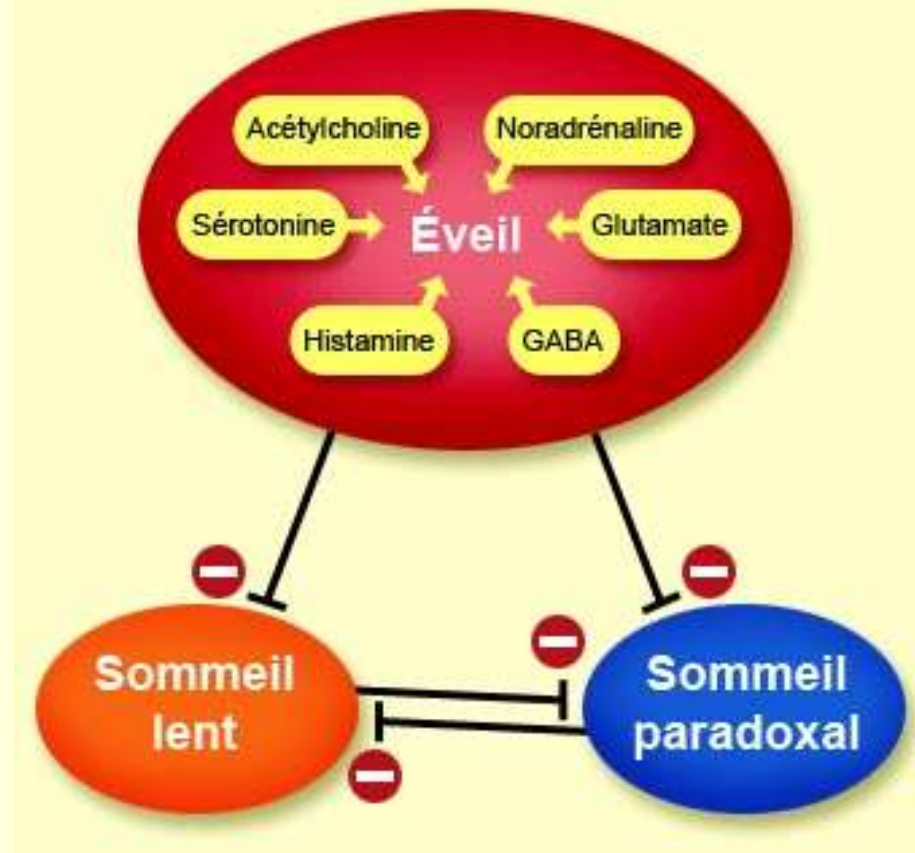
l'une d'entre elle entre en activité quand l'activité cesse dans l'autre, et vice versa.



L'éveil est donc la conséquence d'une **augmentation générale de l'activité du cortex** qui produit la désynchronisation corticale observée lors de l'éveil.

Cette activation neuronale est entretenue par les stimulations de l'environnement et du milieu interne. On peut donc dire que, d'une part, l'activation du réseau de l'éveil est entretenue par l'éveil lui-même !

On sait tous qu'il est possible de se motiver à rester éveillé plus que d'habitude, malgré la fatigue qui se fait sentir.



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.

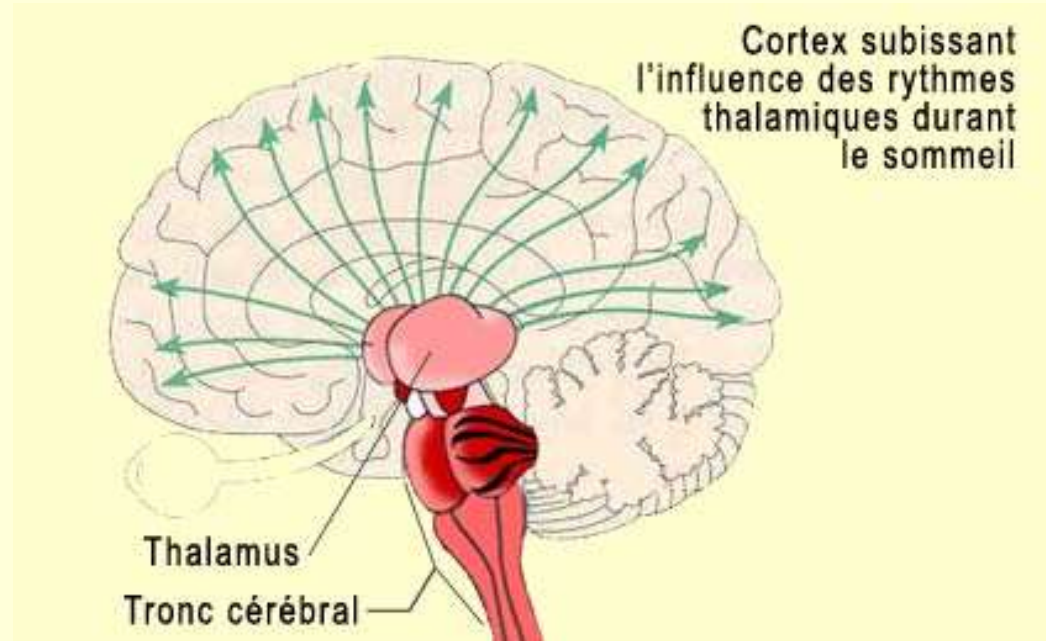
Les régulations complexes entre éveil et sommeil

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.

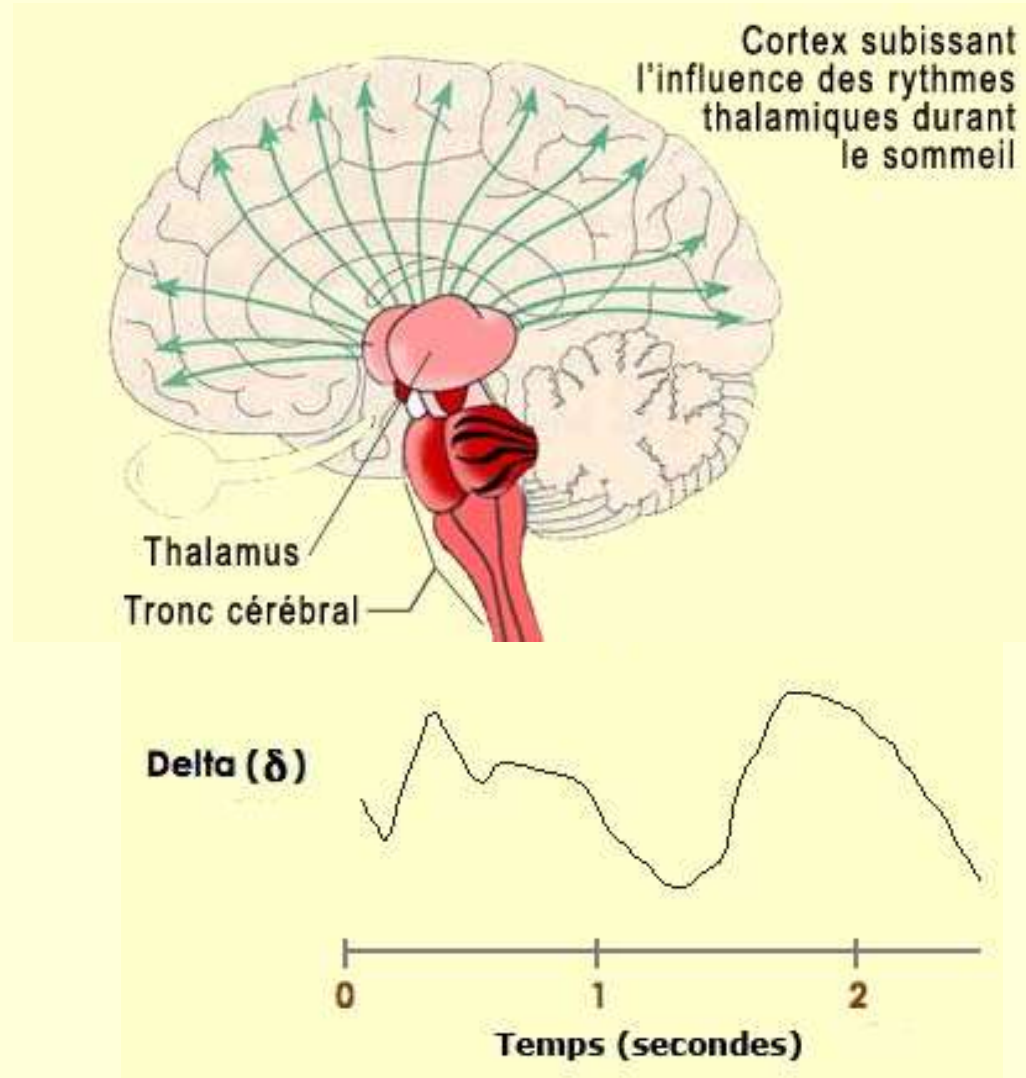


Plus précisément, c'est l'activité rythmique qui se met alors en place dans les neurones thalamo-corticaux de la région intra-laminaire du thalamus qui provoque cette déconnexion corticale des signaux internes et externes

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.

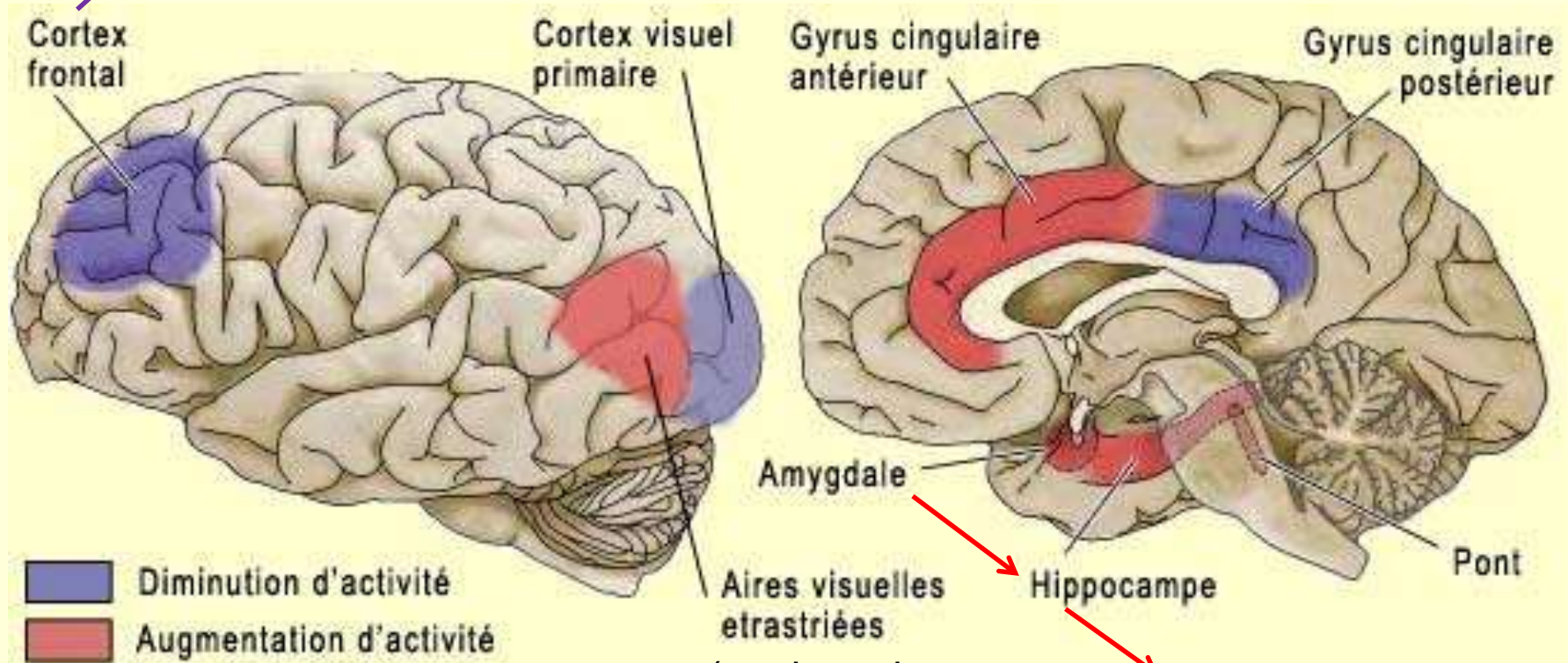


Les régulations complexes entre éveil et sommeil

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

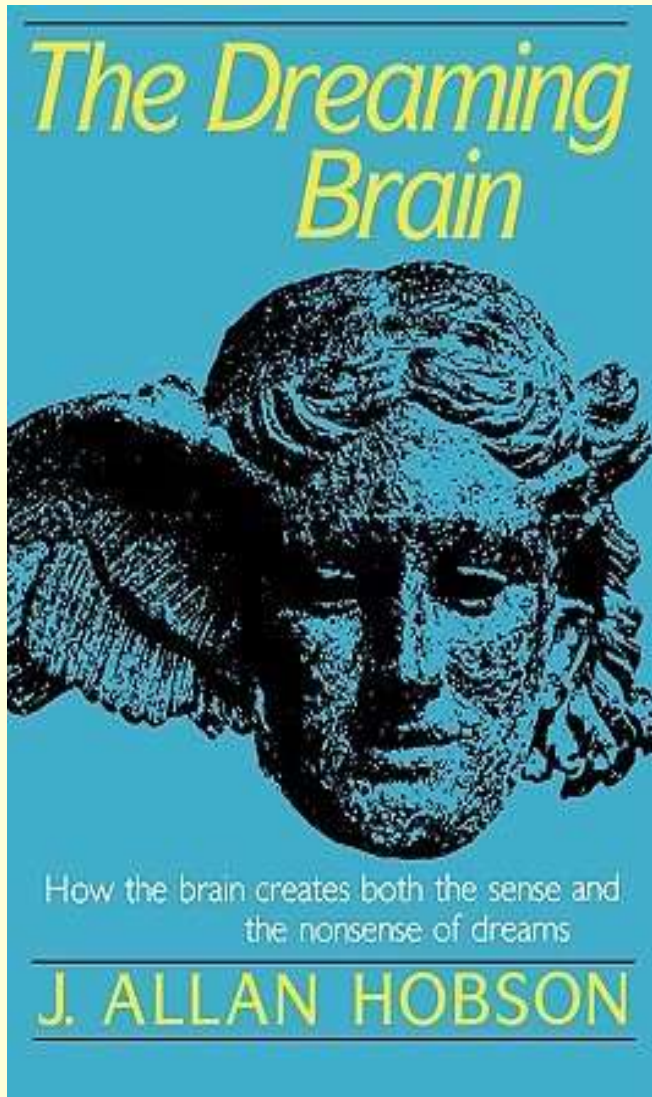
Variation d'activité cérébrale typique durant le REM (versus l'éveil)

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)

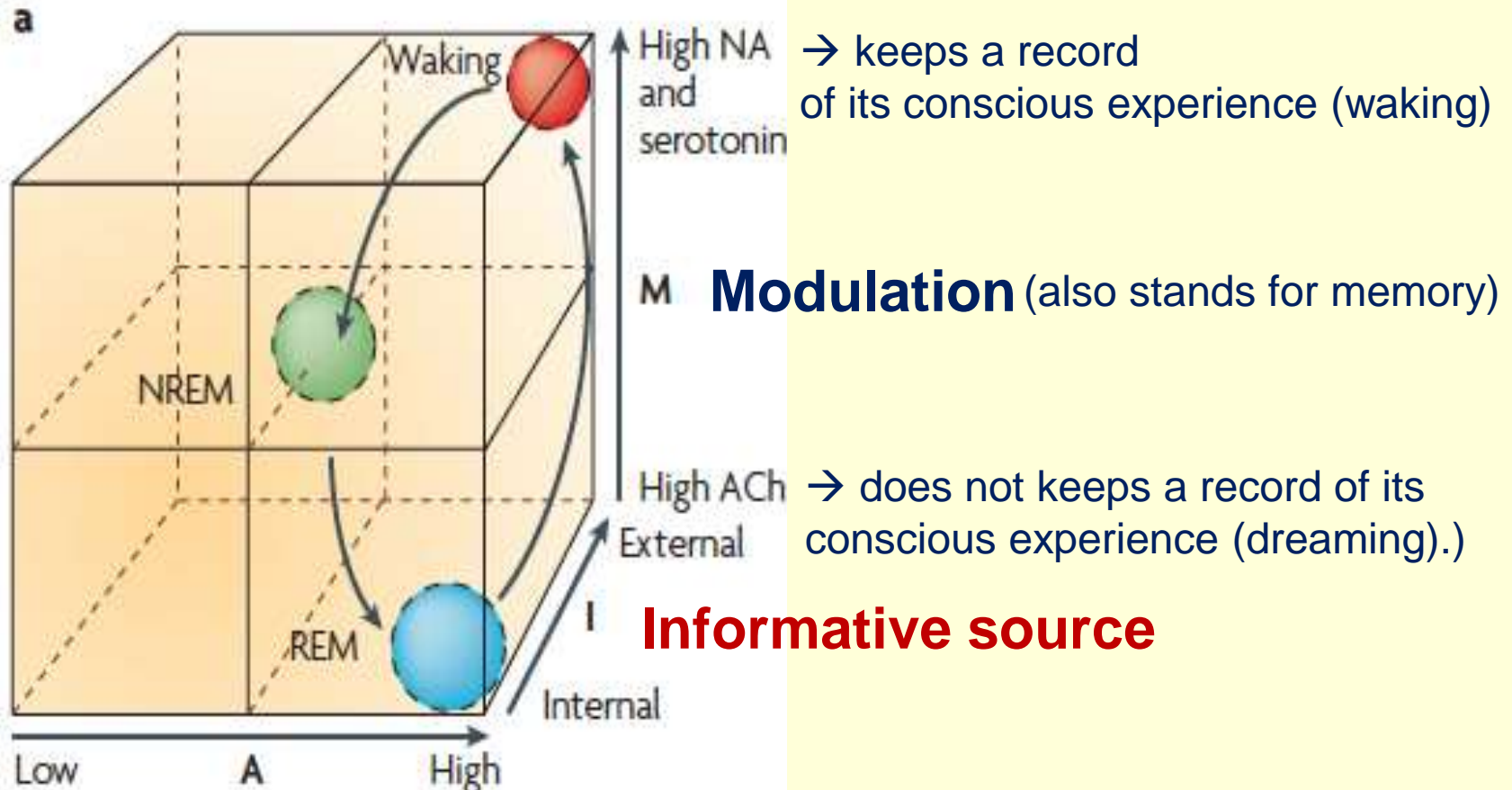
« émotions »



Activation-synthèse (1977)

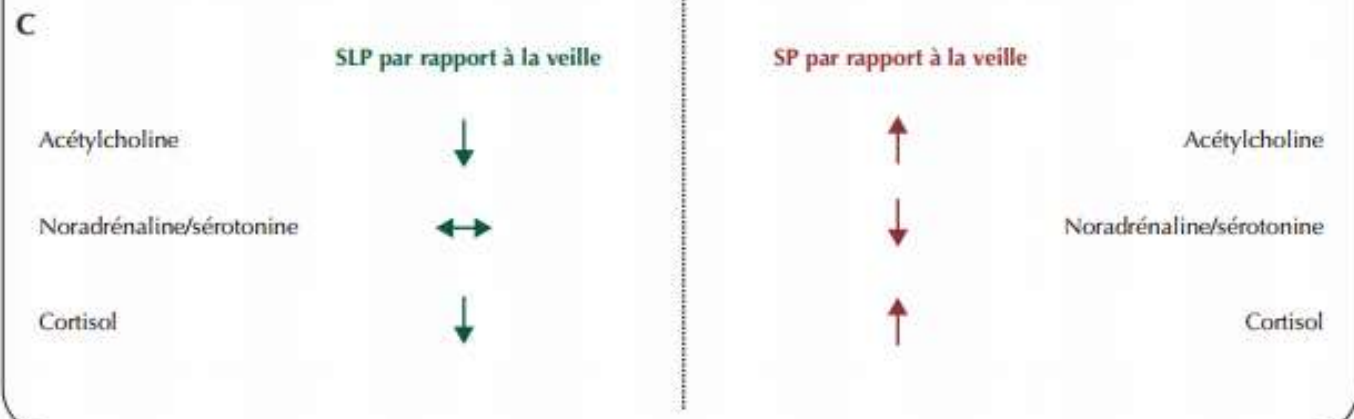
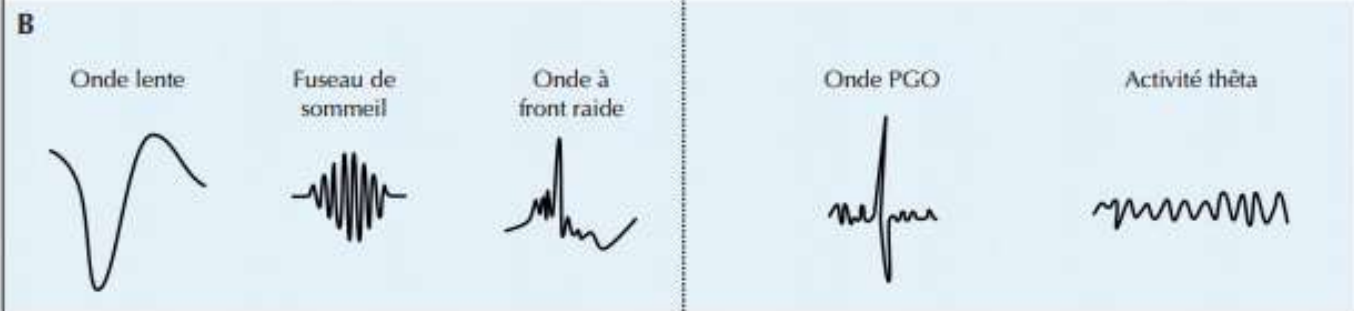
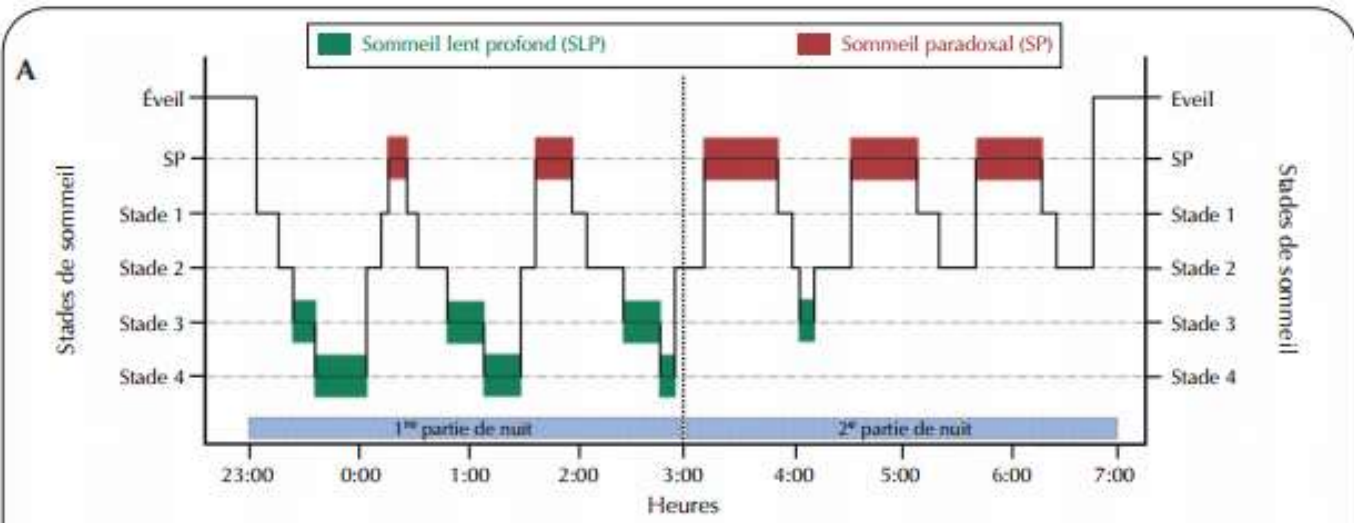
- **Activation:** le cerveau est mis en marche et gardé actif de façon interne par la partie pontique du tronc cérébrale (ce que Jouvet nomme le « pacemaker ponto-bulbaire »).
- **Synthèse:** le cortex frontal et les régions sous-cortical responsable de la mémoire interprètent l'activation stochastique du cerveau en essayant d'en faire sens (mais sans pouvoir tester la réalité).

Hobson dans les années 90: AIM



Activation

Source : Luc Faucher



Rôles possibles du sommeil

Les travaux de Jeff Liff pointent vers une fonction essentielle : **l'élimination des déchets produits durant le jour par le cerveau, et qui se ferait surtout la nuit.**

Ces déchets, générés par l'activité incessante d'un organe qui ne représente que 2% du poids du corps humain mais qui requiert en tout temps près de 20 à 25% de toute l'énergie que nous consommons, **le cerveau s'en débarrasse dans le liquide céphalo-rachidien** qui rejoint éventuellement la circulation sanguine.

Liff et ses collègues ont montré que le liquide céphalo-rachidien était évacué du cerveau **en suivant les vaisseaux sanguins qui s'y trouvent, mais à l'extérieur de ceux-ci.**

Jeff Liff: One more reason to get a good night's sleep

<https://tedsummaries.com/2014/10/15/jeff-iliff-one-more-reason-to-get-a-good-nights-sleep/>

13 février 2019

Le système glymphatique : les égouts du cerveau

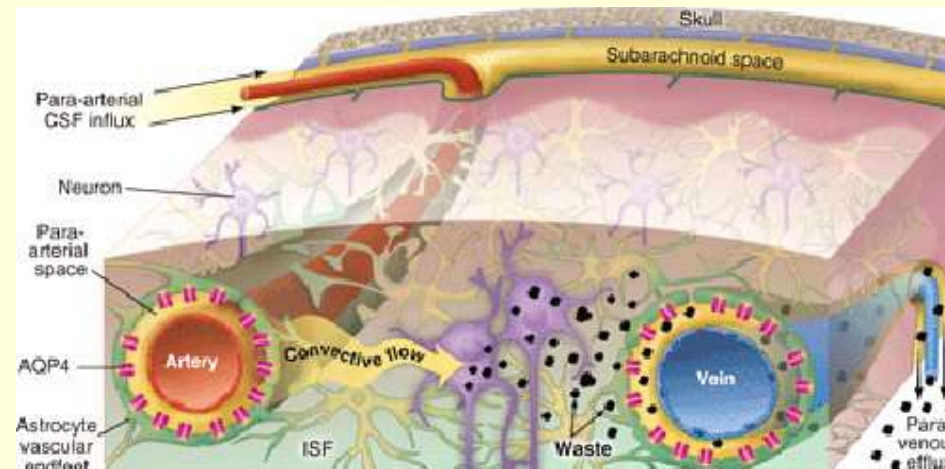
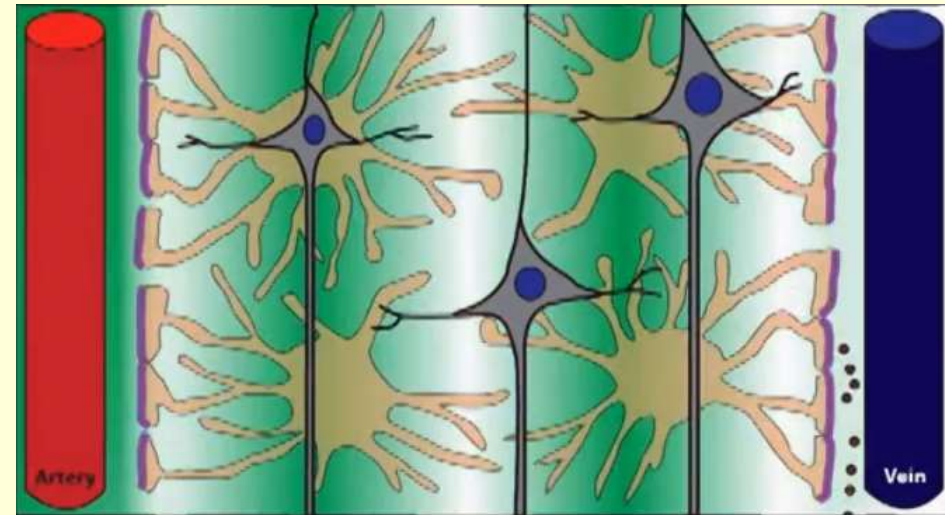
<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2019/02/13/7884/>

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.

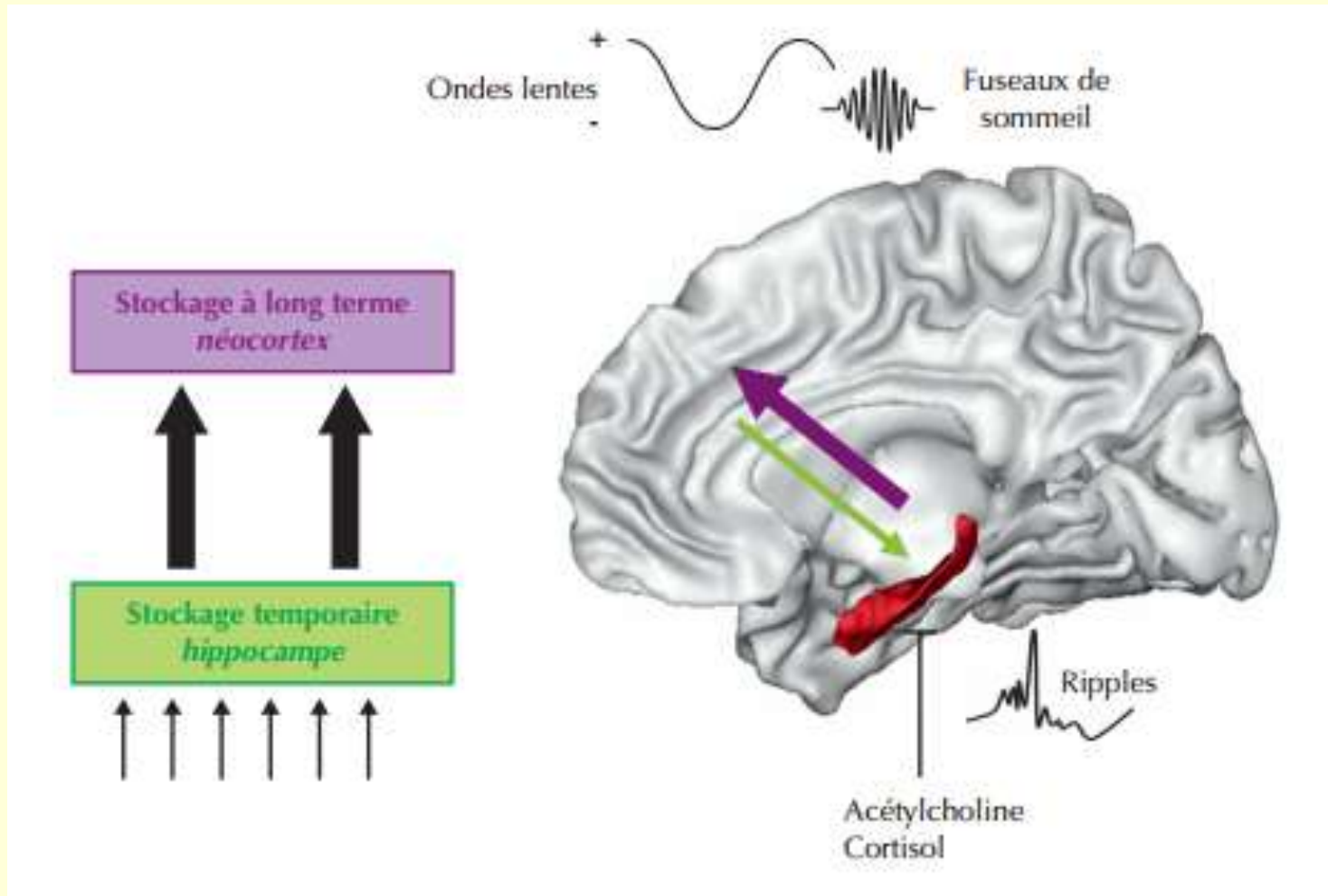
<https://www.lessymboles.com/je-dors-donc-jelimine/>



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.

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



<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2014/06/16/etre-veille-rever-et-se-reposer-durant-lete/>

http://www.jle.com/download/nrp-299604-role_du_sommeil_dans_la_consolidation_des_souvenirs--Wo@X@X8AAQEAAEopSUgAAAA-a.pdf

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

En **juin 2014** paraissait dans la revue Science un article confirmant le **rôle du sommeil dans la consolidation** structurelle des connexions neuronales après un apprentissage.

Plus spécifiquement, les neurones moteurs activés durant l'apprentissage d'une tâche **sont réactivés durant le sommeil profond**, ce qui favorise la formation d'épines dendritiques de manière spécifique sur ces neurones.

Lundi, **15 juin 2015**

De l'importance des oscillations cérébrales lentes durant le sommeil profond

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2015/06/15/4595/>

Il semble assez bien établi que les **oscillations lentes d'environ 0,75 Hz** qui se répandent largement dans tout le cerveau durant le sommeil profond **favorisent cette consolidation**.

Ce qui est différent des oscillations **thêta de 4 à 8 Hz** qui elles favoriseraient **l'encodage dans l'hippocampe**, une structure cérébrale très impliquée dans notre mémoire à long terme.

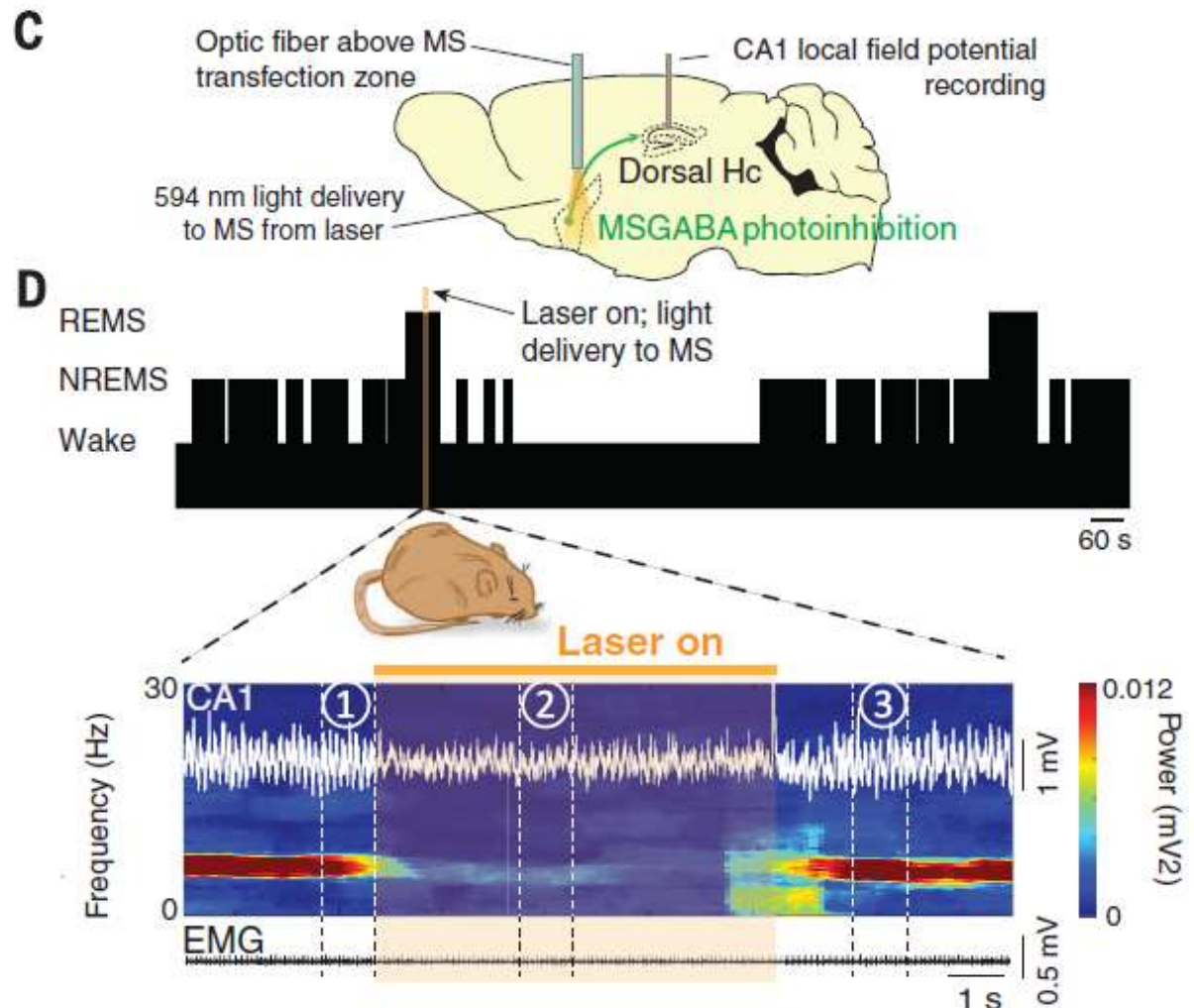
Causal evidence for the role of REM sleep theta rhythm in contextual memory consolidation

Richard Boyce,¹ Stephen D. Glasgow,² **Sylvain Williams,^{2*}†** Antoine Adamantidis^{2,3*}†
(2016)

<http://science.sciencemag.org/content/352/6287/812/tab-pdf>

Grâce à des techniques d'optogénétique chez la souris, des neurones au **GABA** du **septum médian** ont été rendu **silencieux**.

Cela a permis **l'atténuation du rythme thêta** associé à la consolidation **mnésique** durant le REM (sans perturber le sommeil).



Par la suite, la souris éveillée ne reconnaissait pas le nouvel emplacement d'un objet.

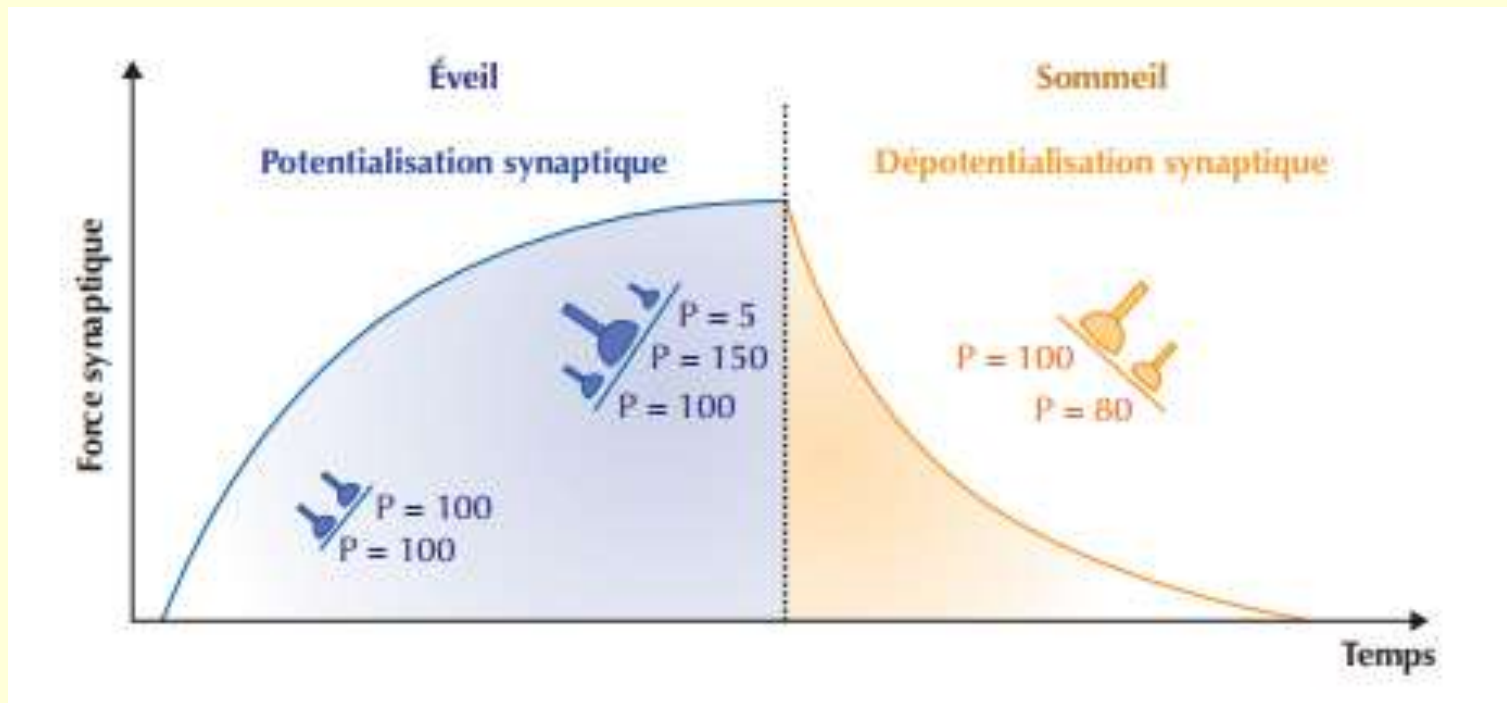
Ce traitement perturbait également une peur conditionnée à un certain contexte.

Le fait de rendre silencieux les neurones au GABA du septum médian en dehors des épisodes de REM n'avait pas d'effet sur la mémoire.

D'où leur conclusion que l'activité des neurones au GABA du septum médian, par leur contribution au rythme thêta dans l'hippocampe, est essentielle à la consolidation mnésique durant le REM.

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



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

•Liu Z, Faraguna U, Cirelli C, *et coll.* **Direct evidence for wake-related increases and sleep-related decreases in synaptic strength in rodent cortex.** *The Journal of Neuroscience* 2010, 30:8671-5.

•Vyazovskiy V, Cirelli C, Pfister-Genskow M, *et coll.* **Molecular and electrophysiological evidence for net synaptic potentiation in wake and depression in sleep.** *Nature Neuroscience* 2008, 11:200-8.

•Cirelli C, Tononi G. Is Sleep essential ? *Plos Biology* 2008, 6:e216, pp. 1605-11.

•Tononi G, Cirelli C. Sleep function and synaptic homeostasis. *Sleep Medicine Reviews* 2006, 10:49-62.

•Tononi G, Cirelli C. **Sleep and synaptic homeostasis: a hypothesis.** *Brain Research Bulletin* 2003, 62:143-50.

•Turrigiano G, Leslie K, Desai N, *et coll.* **Activity-dependent scaling of quantal amplitude in neocortical neurons.** *Nature* 1998, 391:892-6.

2015 Jan 16.

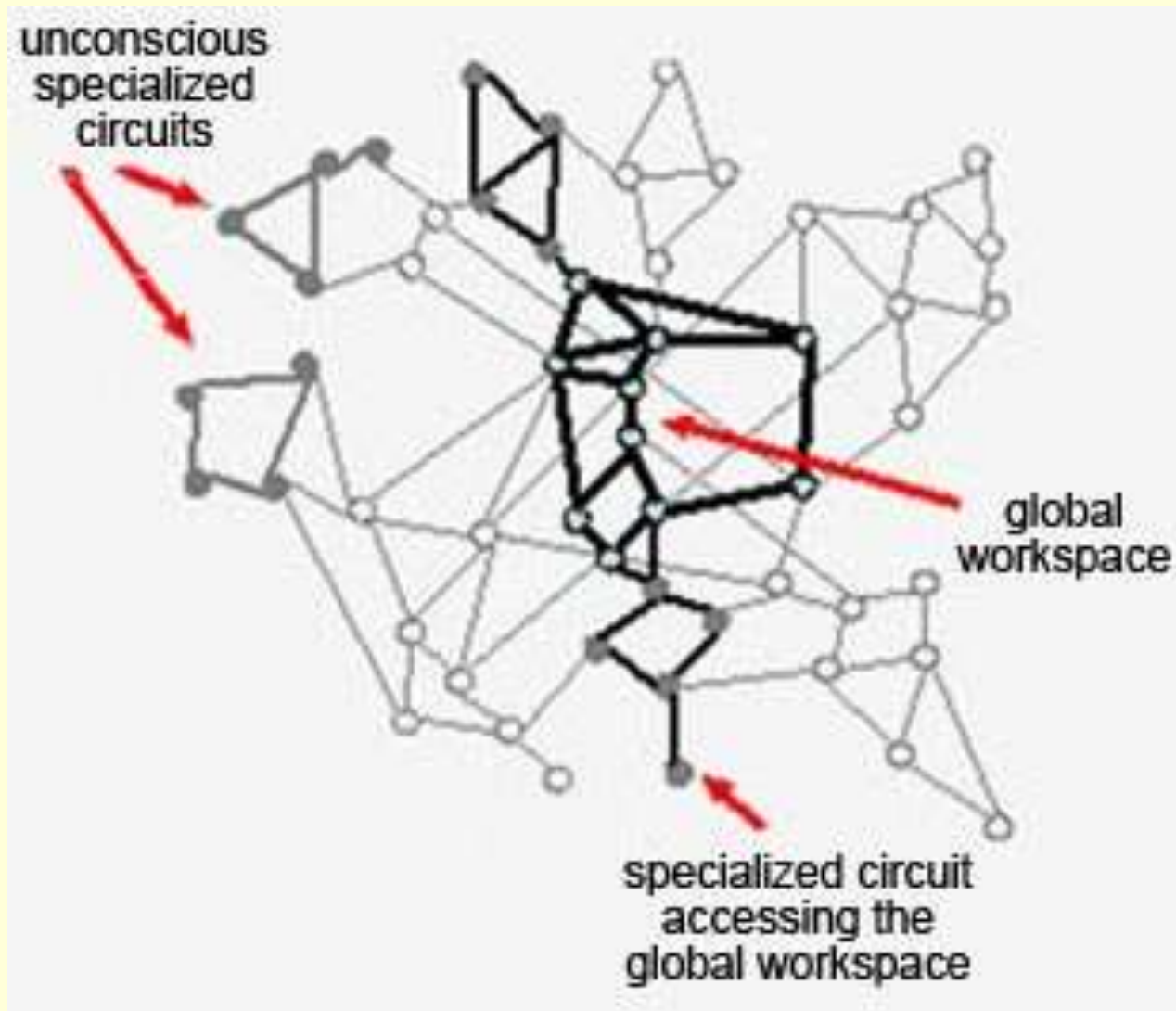
Sleep, Memory & Brain Rhythms

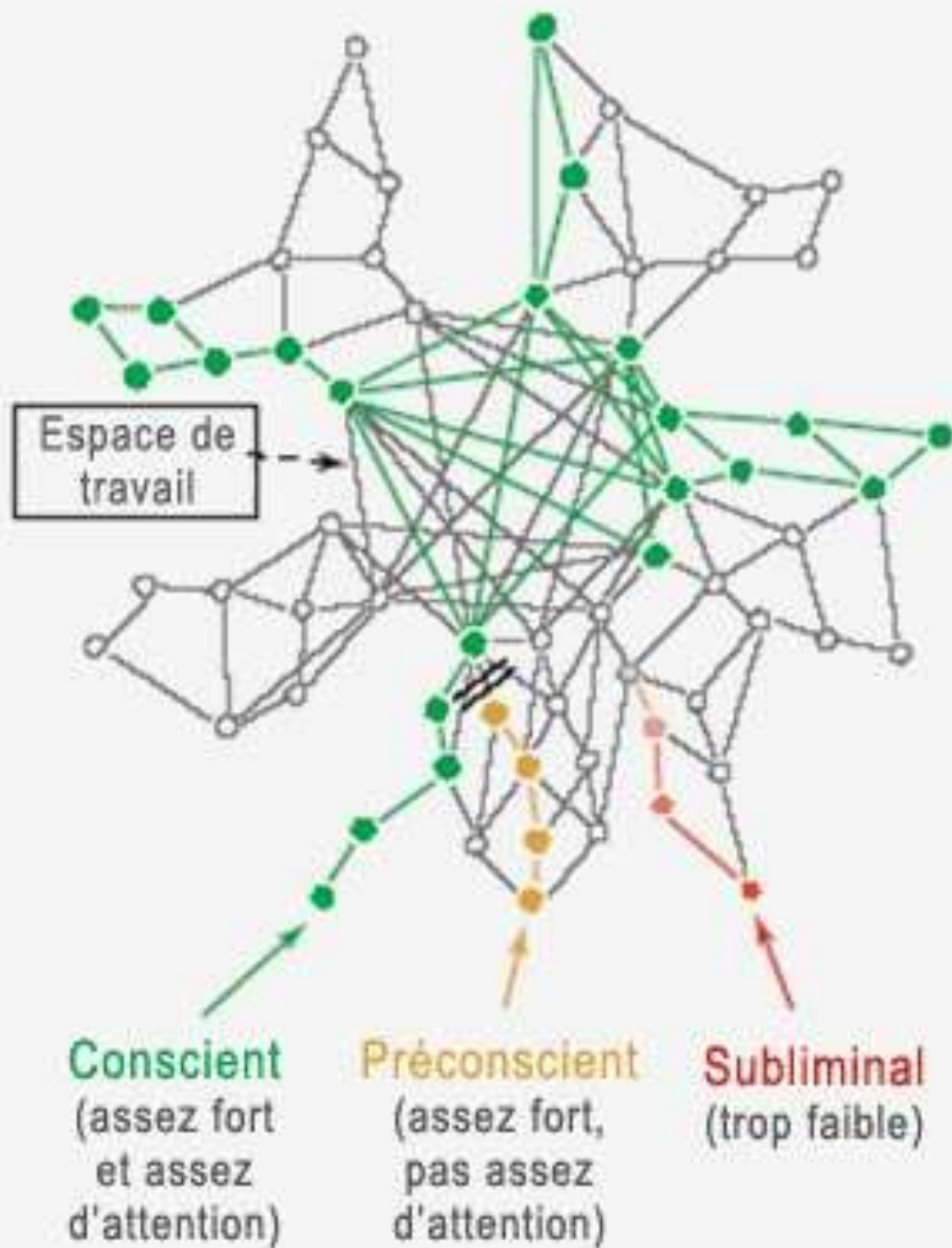
Brendon O. Watson and György Buzsáki

<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.”

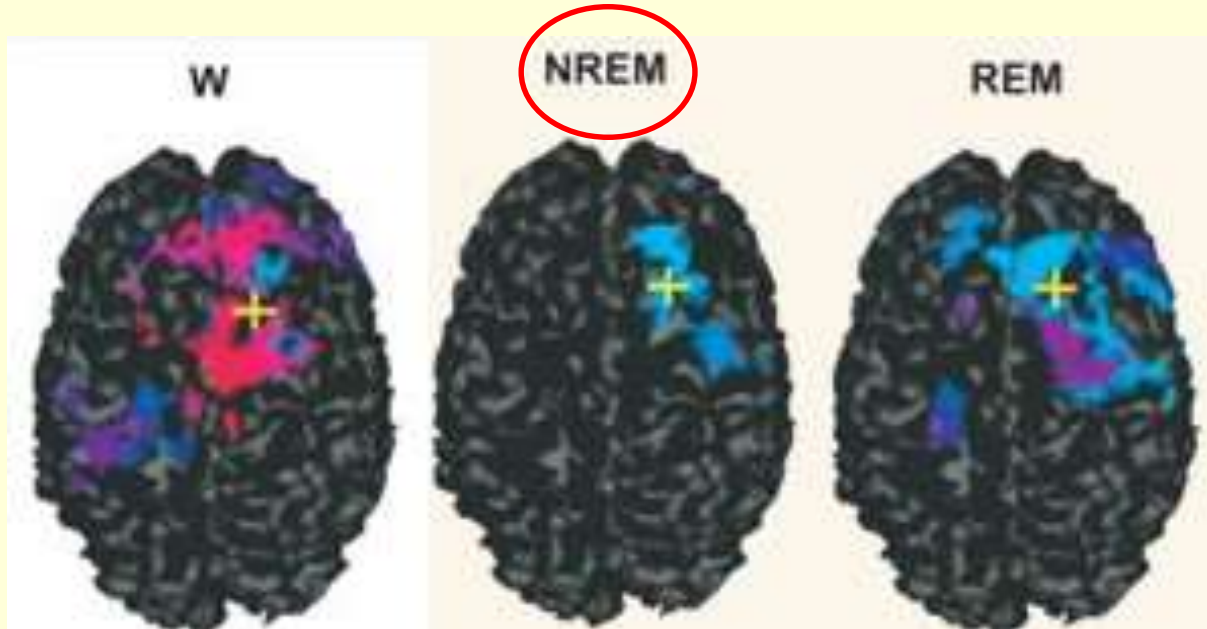
L'espace de travail neuronal : une hypothèse avancée il y a longtemps sur le plan théorique entre autres par Bernard Baars.





D'après Dehaene et al. 2006.

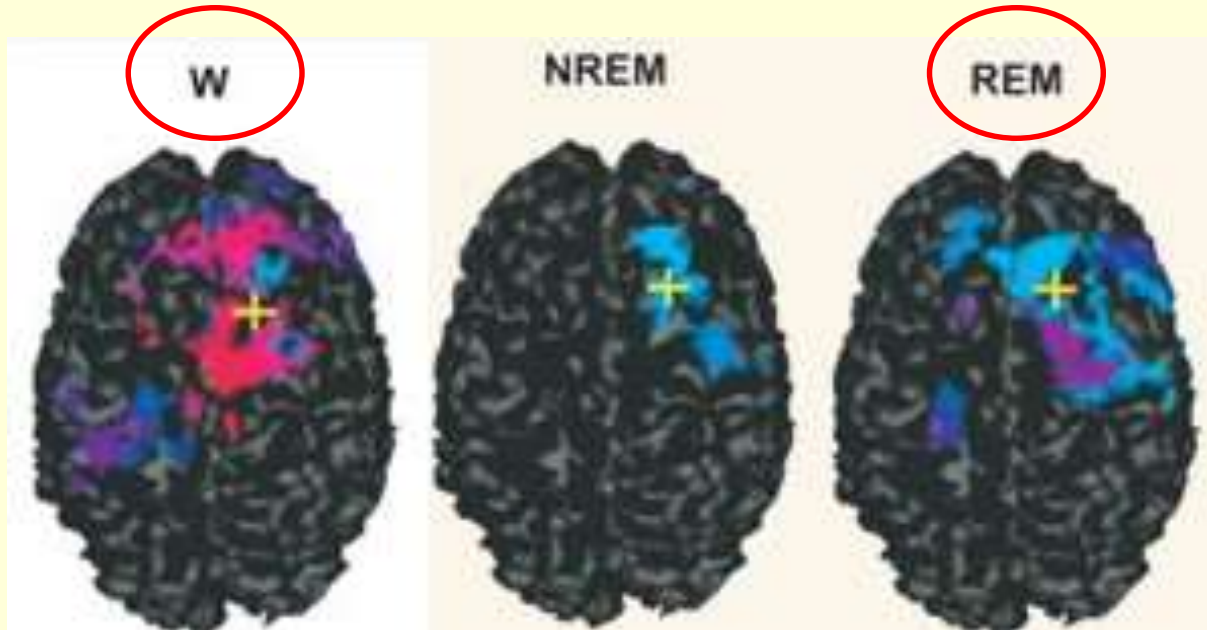
En 2010, Giulio Tononi et son équipe ont publiée dans la revue *Cognitive Neuroscience* une étude où l'on a employé la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) dans trois états suivants :



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.**