

École des profs CollègeAhuntsic

Lundi 1^{er} juin

Séance 1 : ~~Croissance de la complexité : du Big Bang aux sociétés humaines~~

Séance 2 : ~~Ancienne et nouvelle « grammaire » de la communication neuronale~~

[dîner]

Séance 3 : ~~Nos mémoires~~

Séance 4 : ~~Cartographier notre connectome~~

Mardi 2 juin

Séance 5 : Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Séance 6 : Les « fonctions supérieures »

[dîner]

Séance 7 : Le corps-cerveau-environnement

Séance 8 : Vers une « neuropédagogie » ?

Mardi 2 juin

Séance 5 : Des réseaux qui oscillent à l'échelle du cerveau entier

Non-linéarité et connexions réciproques dans les réseaux;

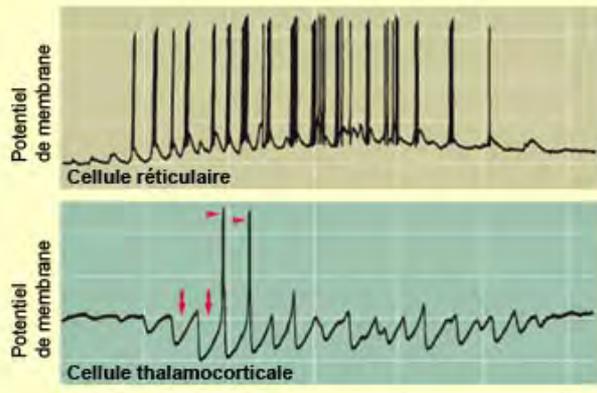
Les systèmes complexes chaotiques;

Activité cérébrale endogène;

Oscillations et synchronisations;

Électroencéphalogramme;

Rôles fonctionnels pour les rythmes cérébraux.



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

alors que la synchronisation relative entre les neurones était considérée moins importante.

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,

August **2011** (Vol. 54, No. 8)

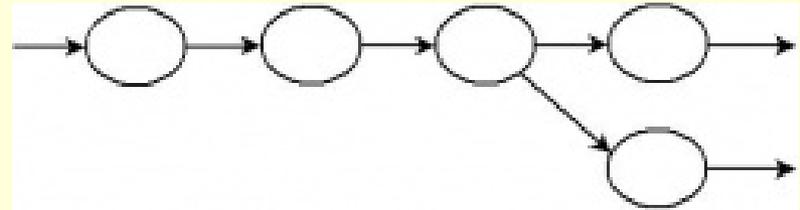
Cognitive Computing

Dharmendra S. Modha, et al.

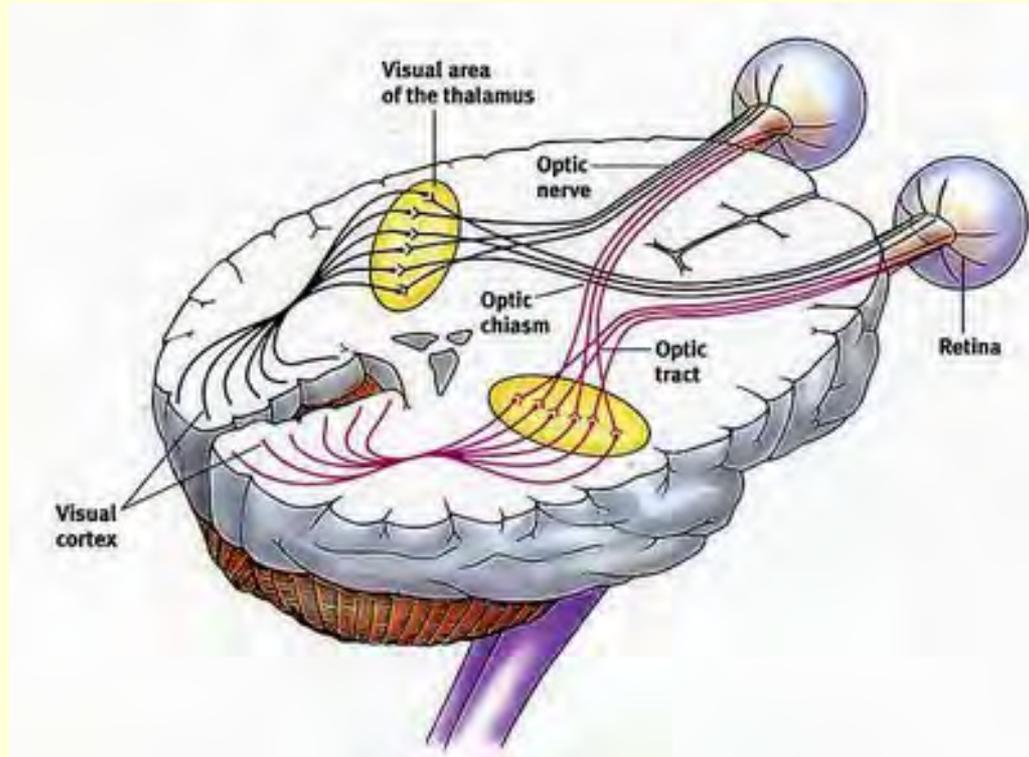
<http://cacm.acm.org/magazines/2011/8/114944-cognitive-computing/fulltext>



Avec la physique de Newton,
on est dans un monde de
causalité **linéaire**.



Sauf que, dans le cerveau...



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

Il suggère que ce qui est capté par nos yeux est transmis 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.

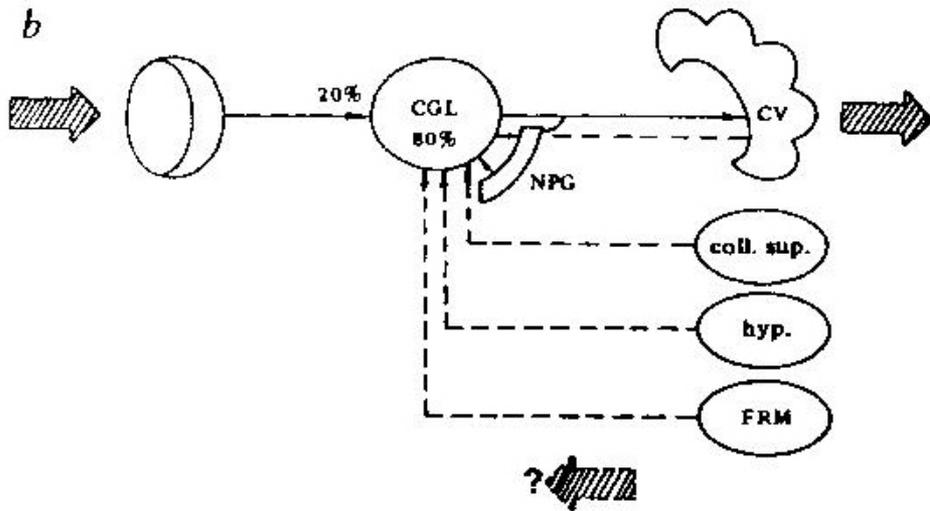


Figure 7 : Le diagramme des connexions du système visuel des mammifères. NPG : noyau peri-géniculé; coll.sup. : colliculus supérieur; hyp. : hypothalamus; FRM : formation réticulaire médiane; C.V. : cortex visuel; CGL : corps genouillé latéral.

74

Mais Francisco Varela a 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.

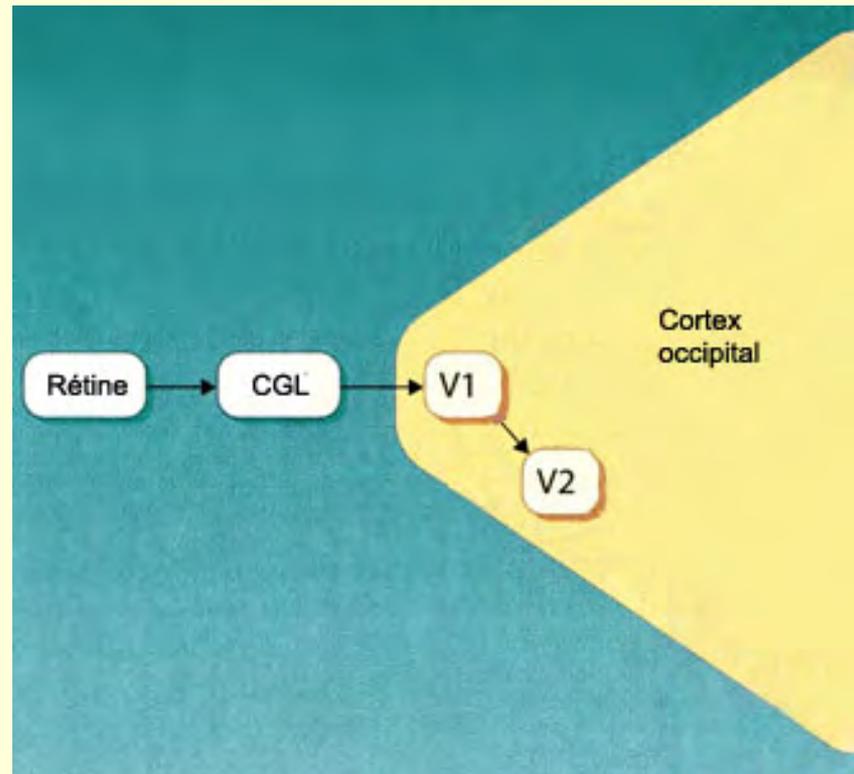
On peut aussi constater qu'il existe plus de fibres reliant le cortex au CGL qu'il n'y en a dans le sens inverse !

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

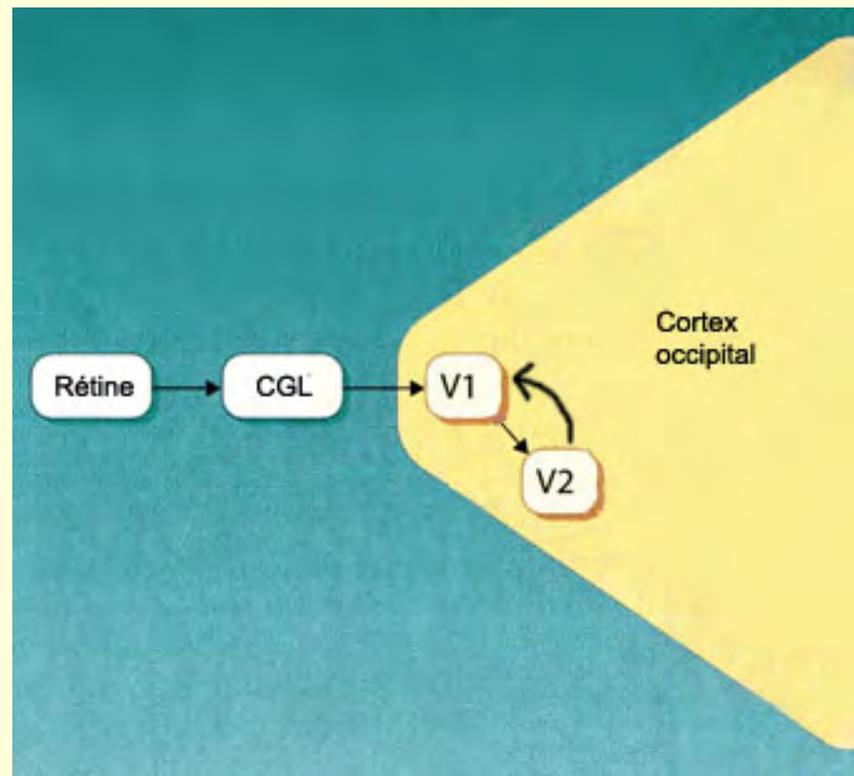
Pour Varela, ce qui se passe plutôt, c'est « la rencontre de ces deux ensembles d'activité neuronale qui constitue un moment de **l'émergence d'une nouvelle configuration cohérente** ».

On y reviendra à l'avant-dernière séance...

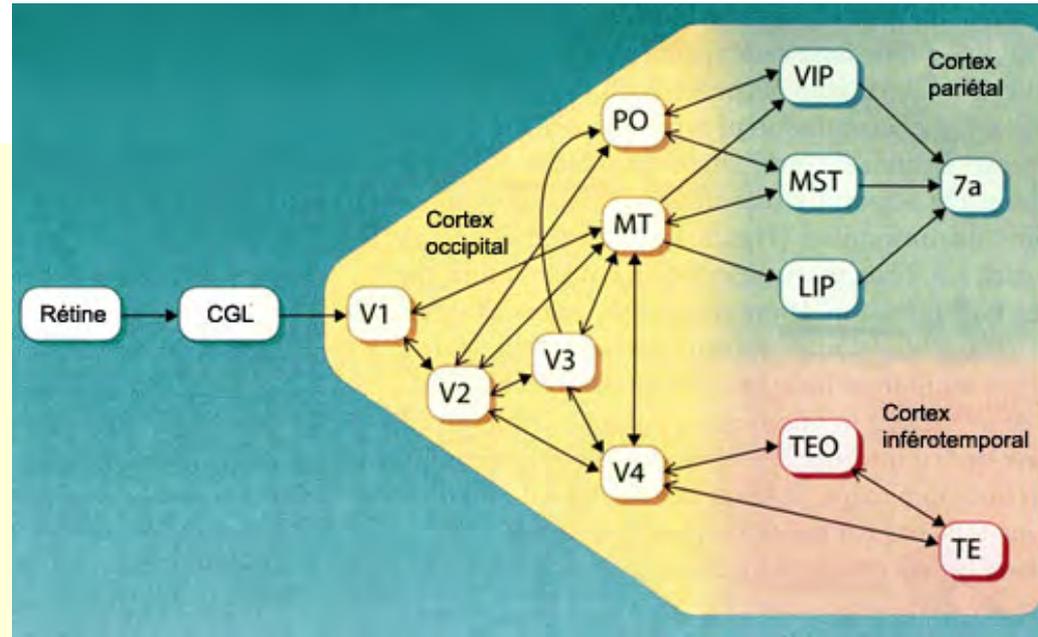
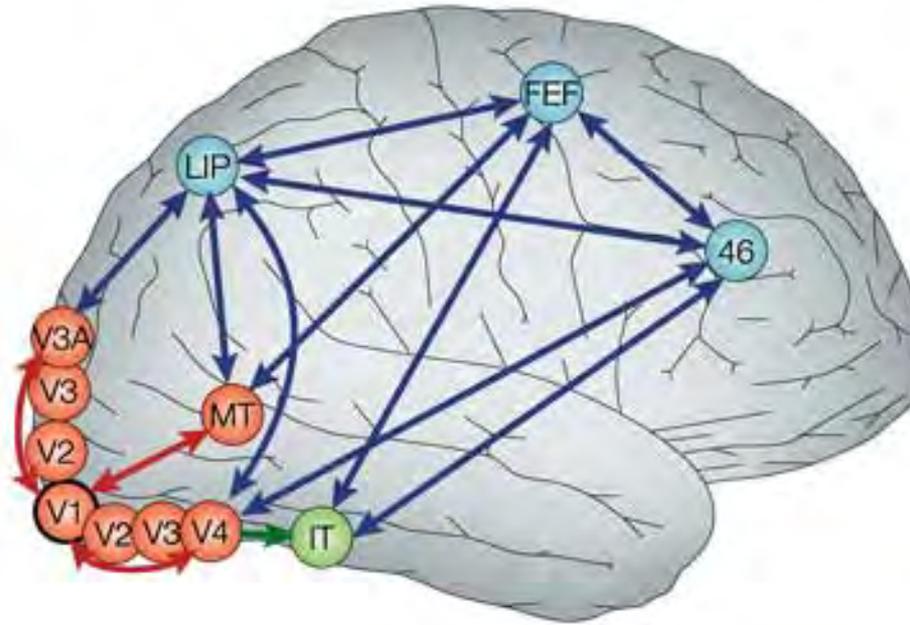
Si l'on regarde maintenant entre V1 et V2...



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.

Enfin, il y a les **"bruits"** produits par le cerveau, qui se projettent sur l'oreille et paraissent bien réels.

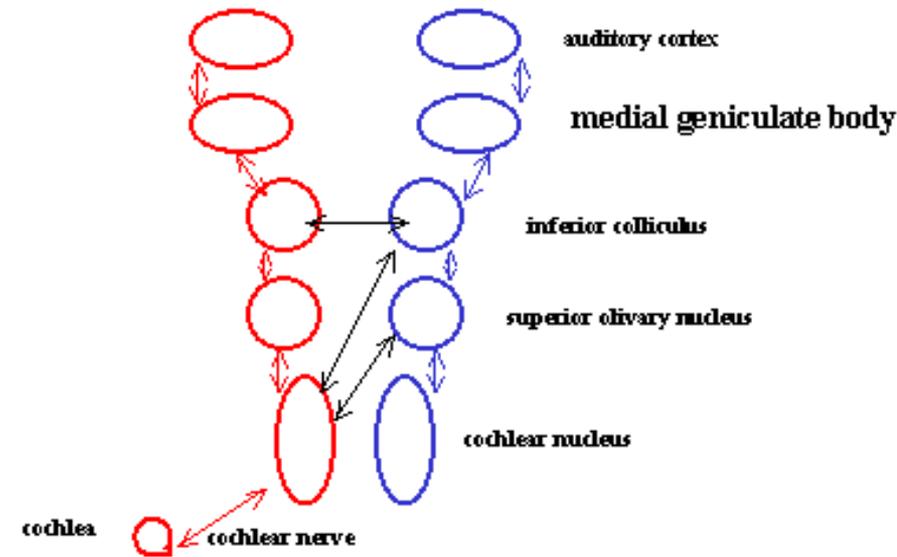
Au bout de cinq minutes par exemple, une personne croyait entendre une nuée d'abeilles. Puis elle avait l'impression de percevoir le sifflement du vent dans des arbres ou la sirène d'une ambulance. Ces sons apparaissaient puis disparaissaient. Au bout de 45 minutes, elle distinguait les paroles d'une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



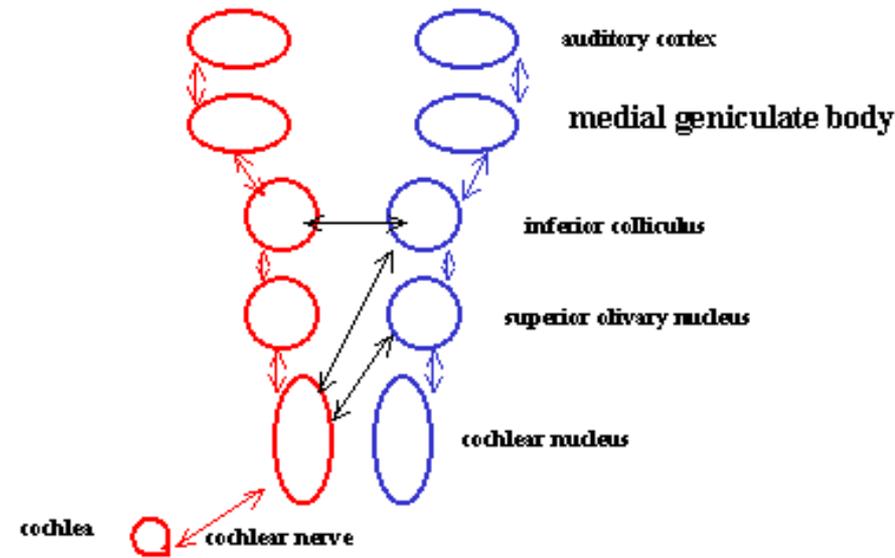
Mais c'est l'explication donnée à ce phénomène par Trevor Cox, professeur d'ingénierie acoustique à l'université de Salford, qui est intéressante pour nous ici :

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

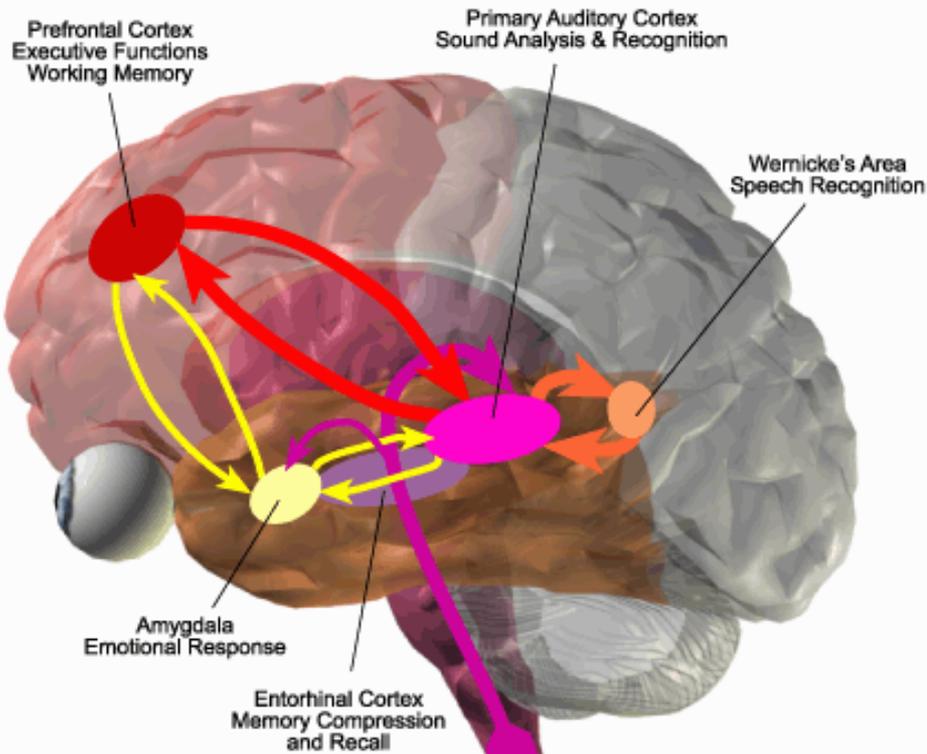
De telles impulsions permettent au cerveau de moduler l'audition pour s'adapter à son environnement. Mais c'est également cette relation qui provoque les hallucinations auditives.



Auditory Pathway



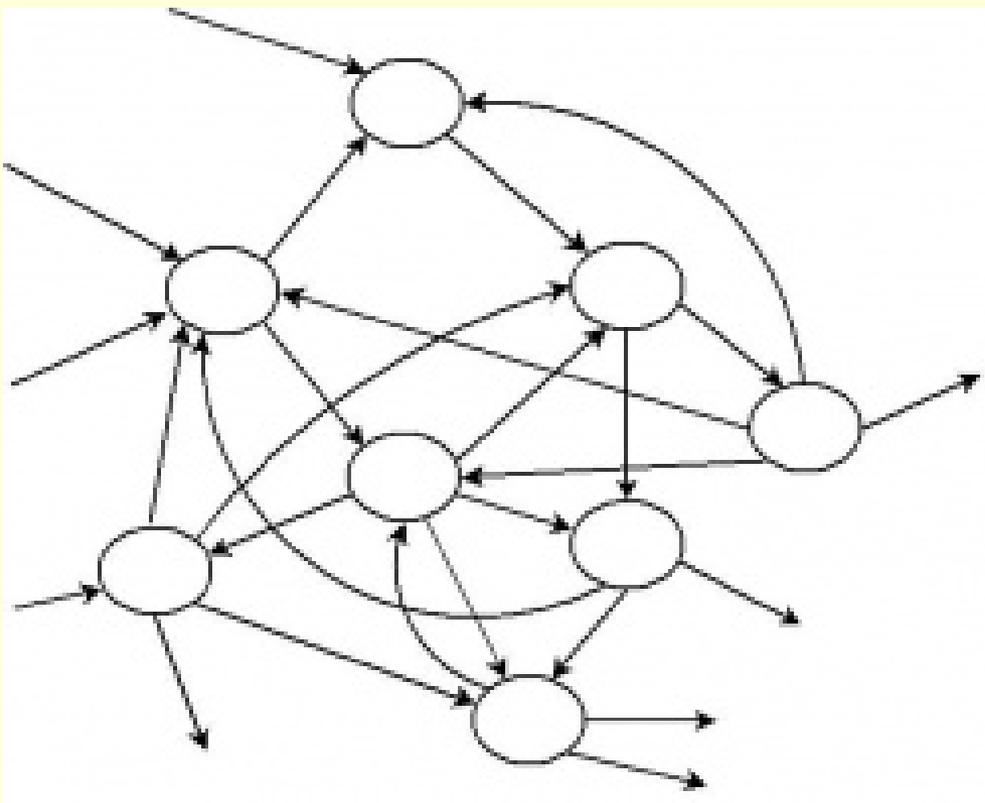
Auditory Pathway



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

La propriété la plus évidente de ces réseaux de neurones est leur **non linéarité**.

Les connexions se font dans toutes les directions et sont souvent **récioproques**.



En guise d'intro : les système complexe chaotique

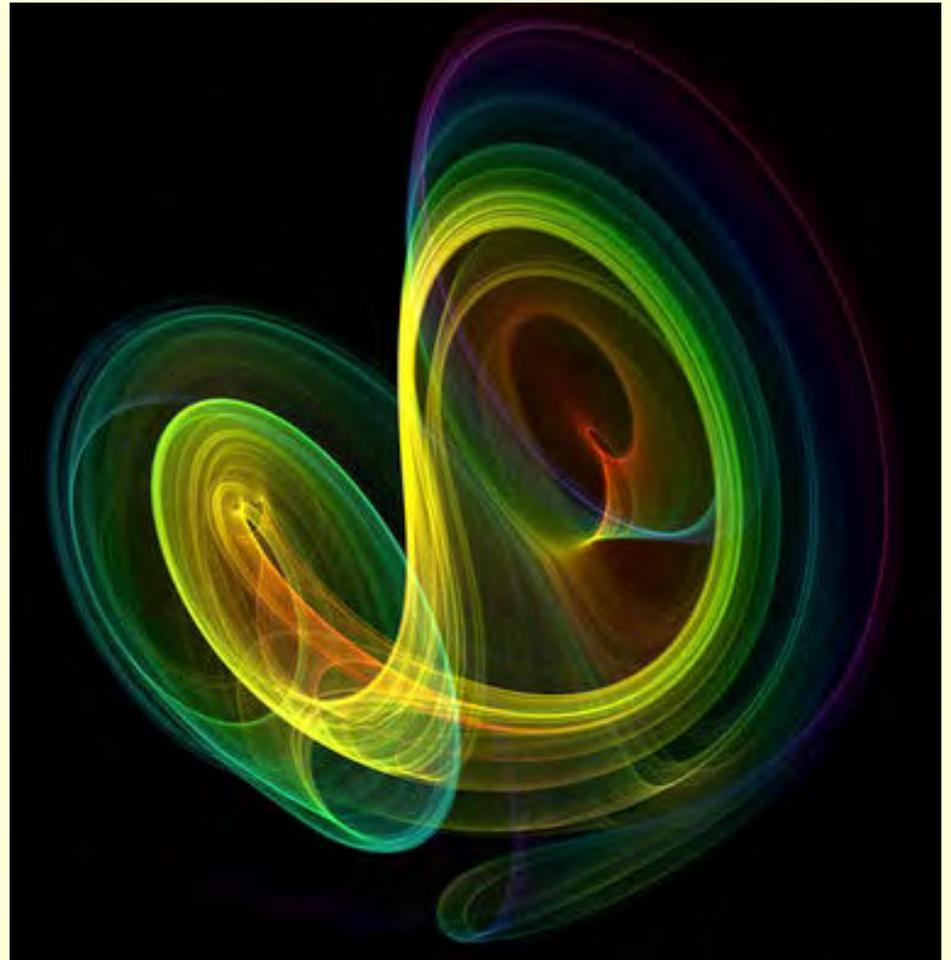
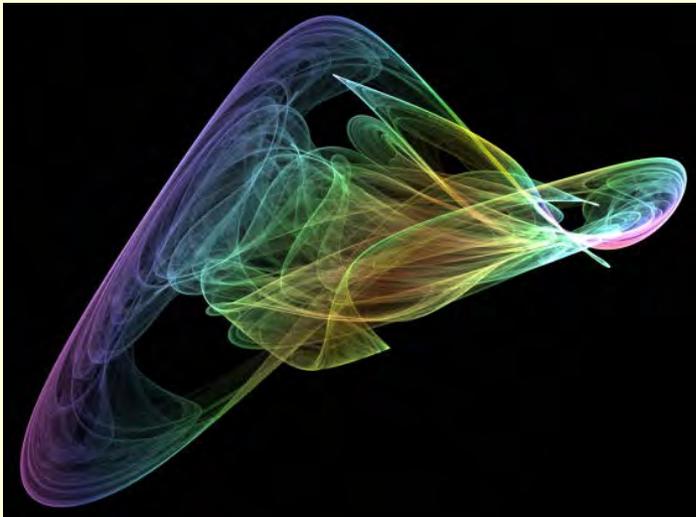
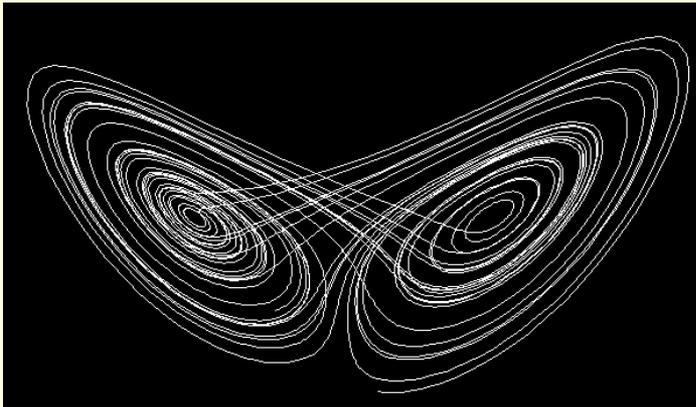
Jusqu'au milieu du XXe siècle, on distinguait deux types de phénomènes naturels : les phénomènes aléatoires, qui sont par conséquent imprévisibles, et les phénomènes obéissant à une loi déterministe, qui de ce fait sont prévisibles. Autrement dit, connaissant leurs conditions initiales, on pouvait prédire 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 **empêchaient** 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 certains systèmes décrits par des lois déterministes peut suffire à rendre imprévisible son comportement. On dit de ces systèmes **sensibles aux conditions initiales** qu'ils sont "**chaotiques**".



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»**.



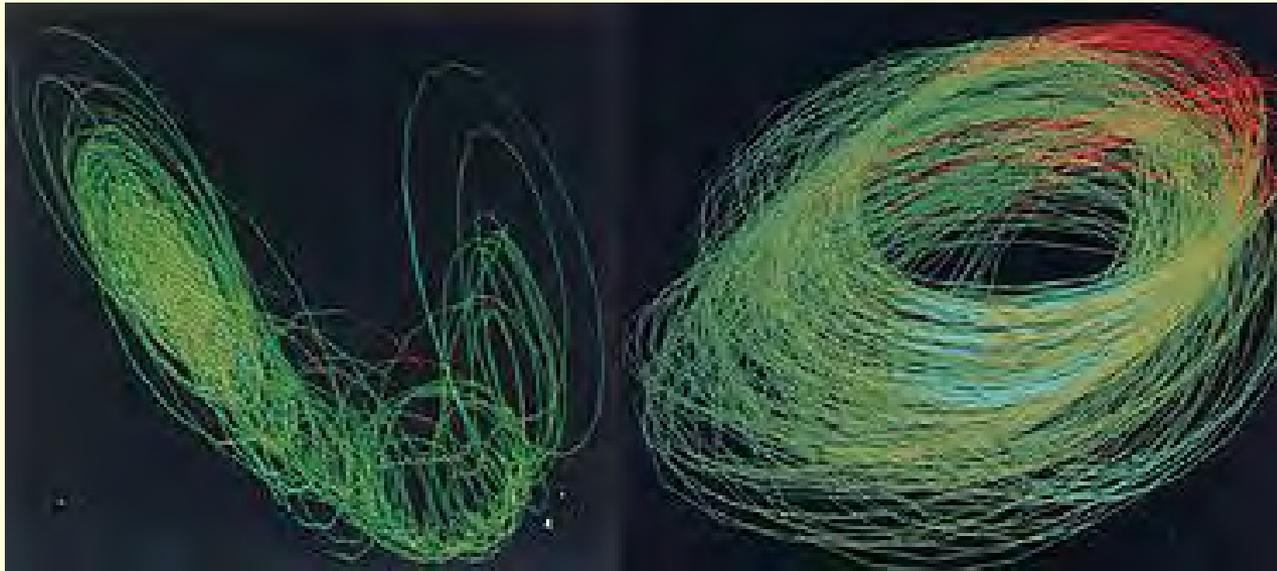


Walter J. Freeman a été l'un des premiers dans les années 1970 et 1980 à constater que **la connectivité neuronale du cerveau humain engendre une telle activité chaotique** qui obéit, comme les phénomènes météorologiques, aux lois de la dynamique non linéaire (ou « chaos déterministe »).

Il fait donc appel aux **outils mathématiques de la dynamique non-linéaire** pour interpréter les états électriques observés.

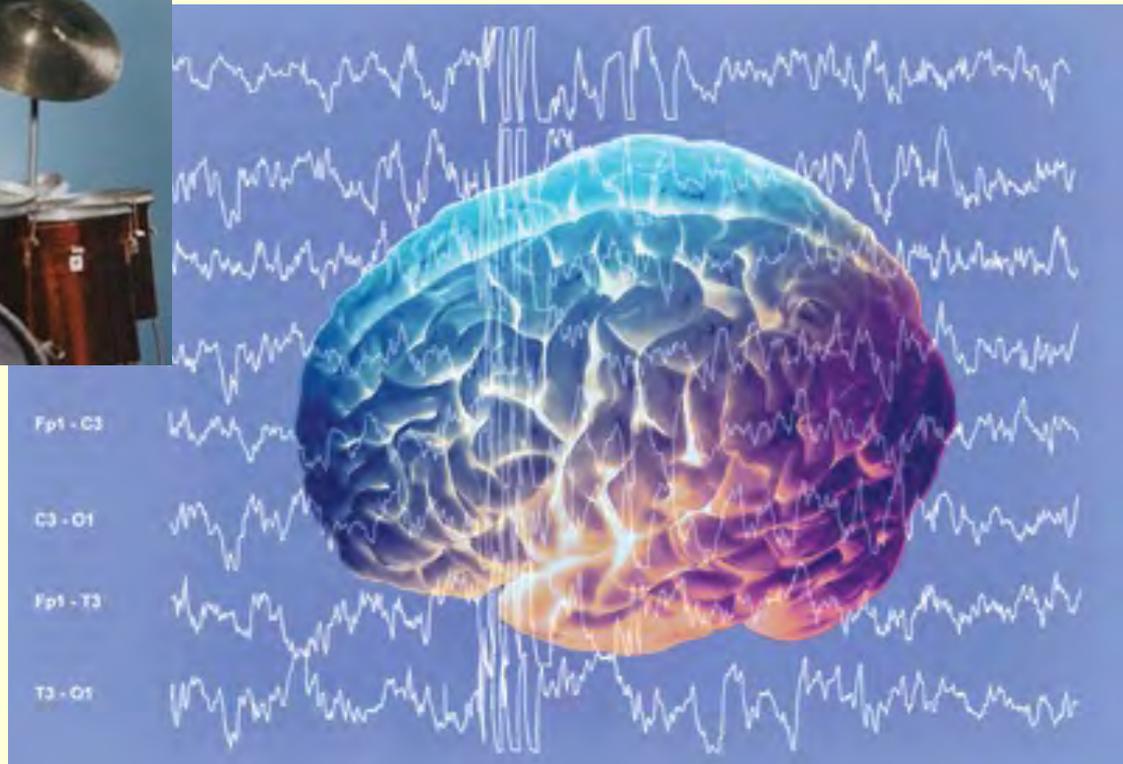
En analysant les électroencéphalogrammes (EEG) de cerveaux durant de multiples tâches, il a pu montrer que les différents rythmes du cerveau humain obéissent bien aux "lois" du chaos déterministe.

"PHASE PORTRAITS" made from electroencephalograms (EEGS) generated by a computer model of the brain reflect the overall activity of the olfactory system at rest (above) and during perception of a famfflar scent (right) [and] reveals that **brain activity in both conditions is chaotic : complex but having some underlying order.**



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.**

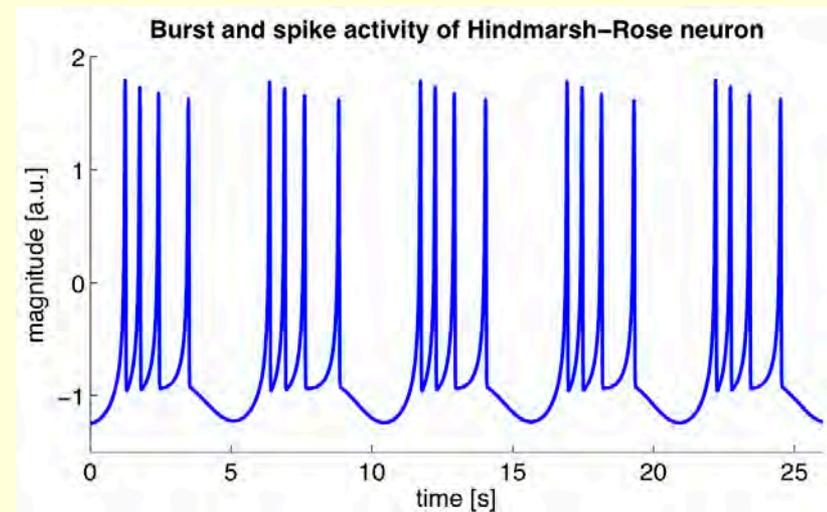
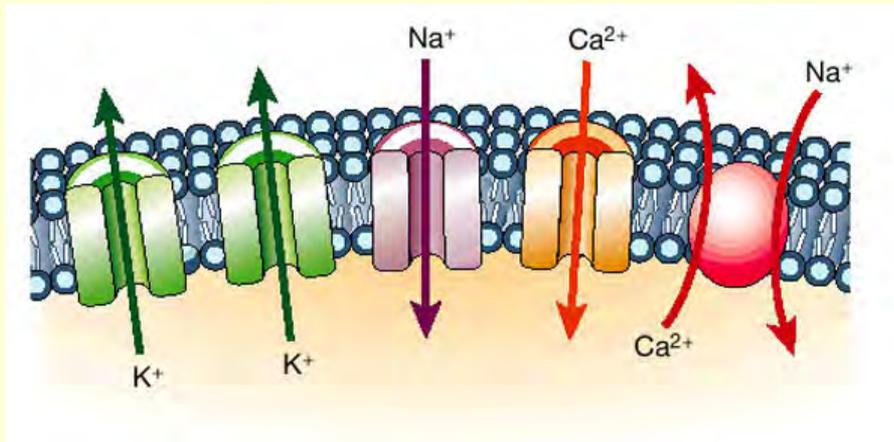
On va donc parler de fluctuations chaotiques, qui souvent forment des rythmes...
mais de rythmes cérébraux !



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.

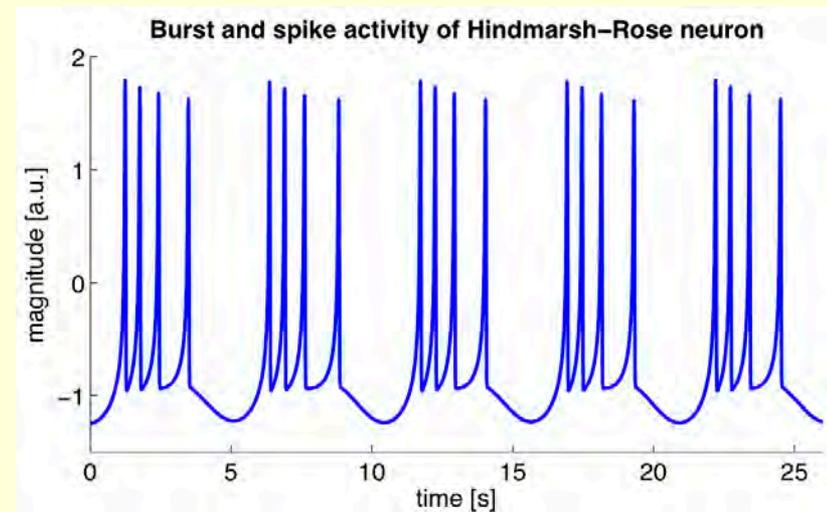
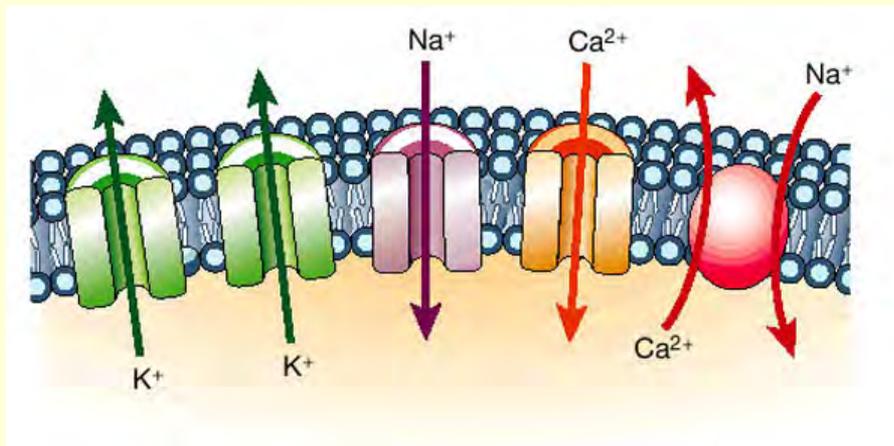


“nature went to a lot of trouble bringing together these channels at the right densities and location just to serve one purpose: **oscillation.**”

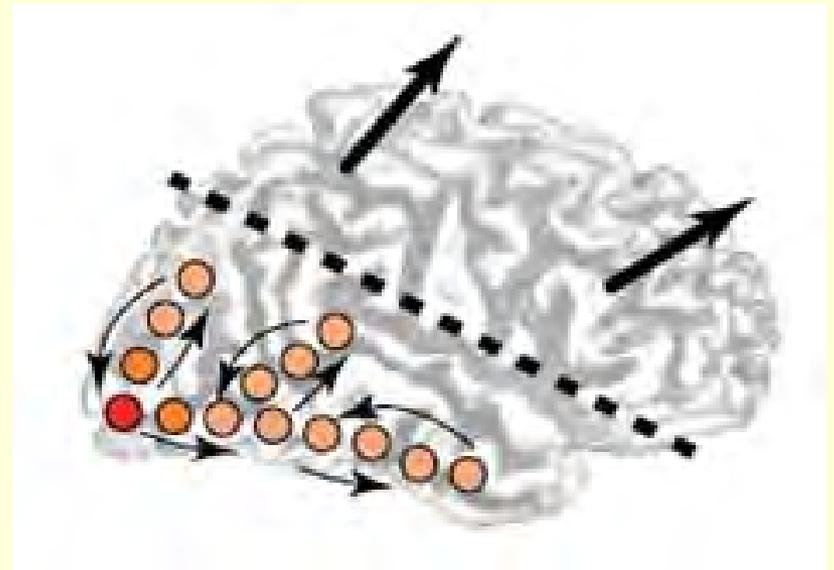
- Buzsáki 2006

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

- William Bechtel (2013)



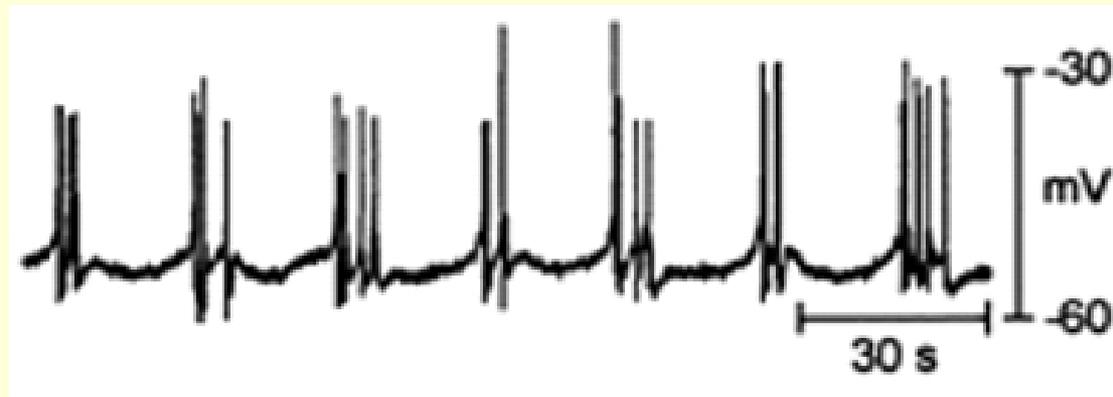
“If there’s input to the nervous system, fine. It will react to it.



Activité « **Bottom up** »

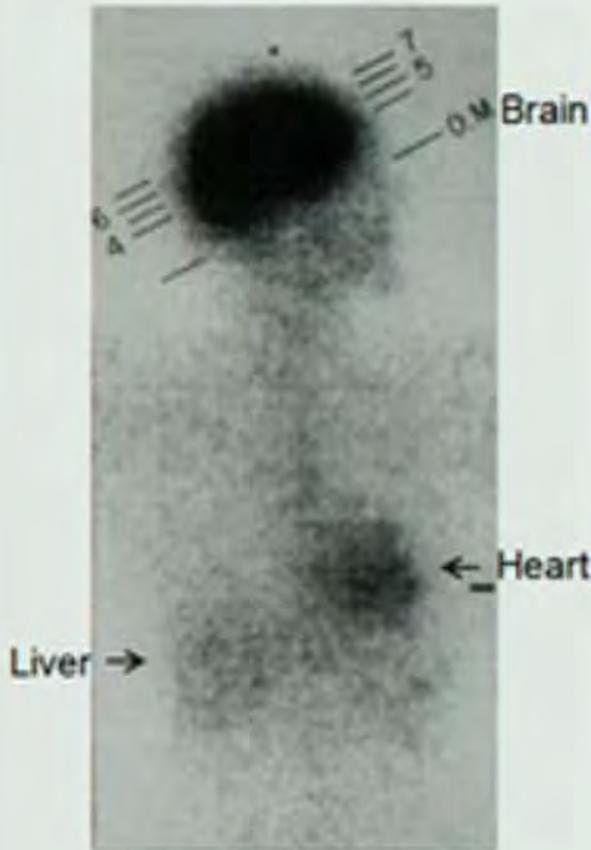
But the **nervous system is primarily a device for generating action spontaneously.** It’s an ongoing affair.

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)

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

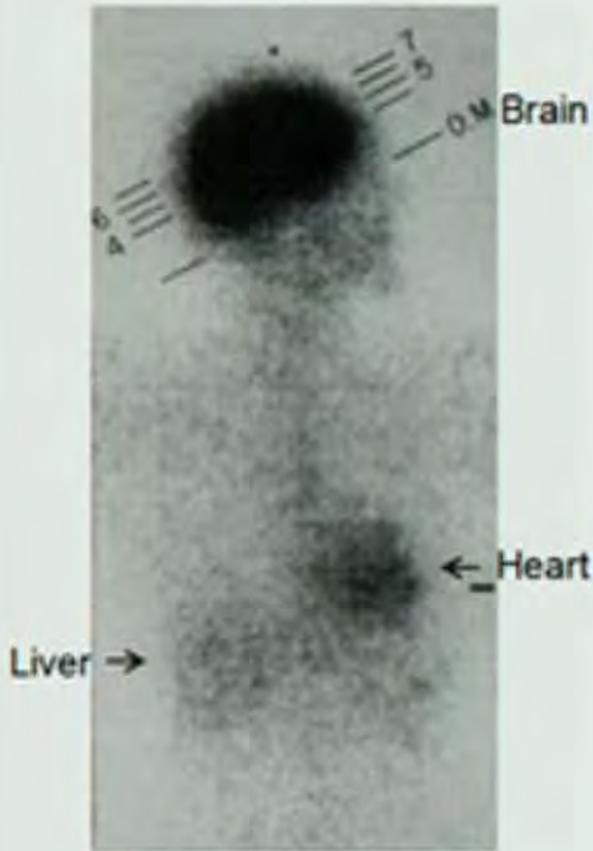
**SYMPOSIUM 2: The Connectome: Mapping the Brain
(Boston, 2011)**

Marcus Raichle

(6:30 à 17 min.)

<http://thesciencenetwork.org/programs/one-mind-for-research/symposium-2-the-connectome-mapping-the-brain>

Resting Metabolism



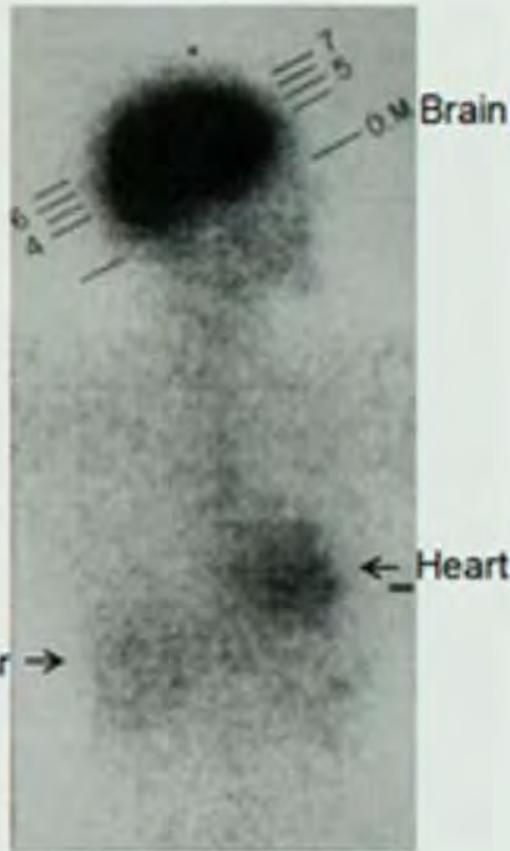
Alavi & Reivich (2002)

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 ?

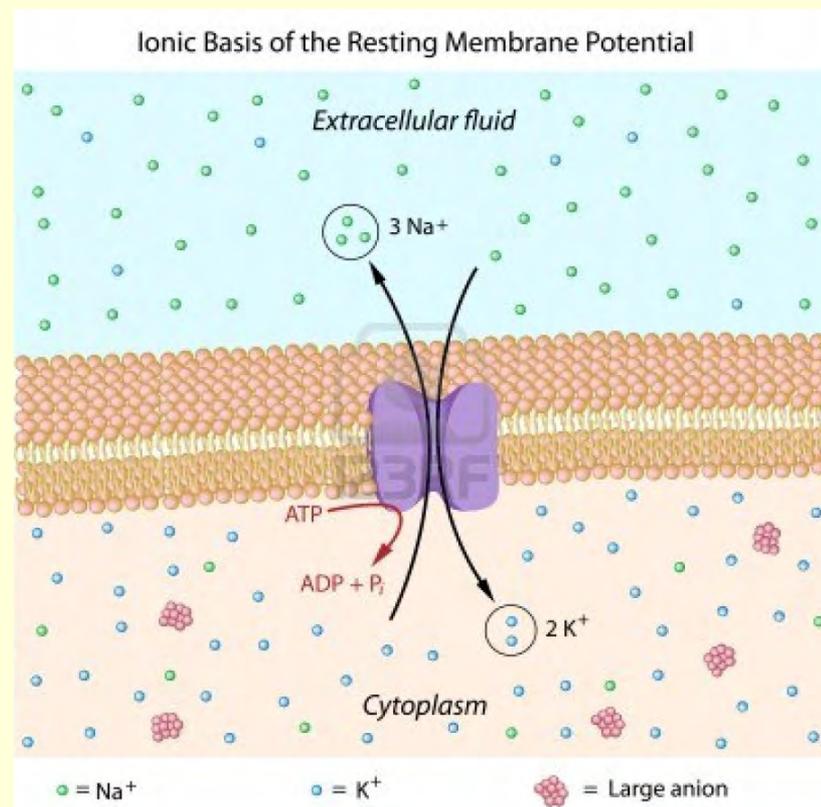
Resting Metabolism



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

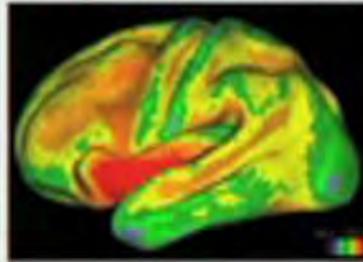


Task Performance

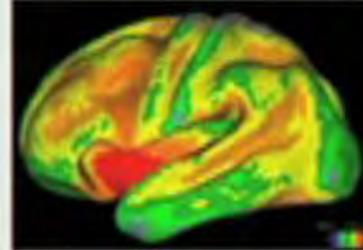
Averaged Blood Flow

Conditions

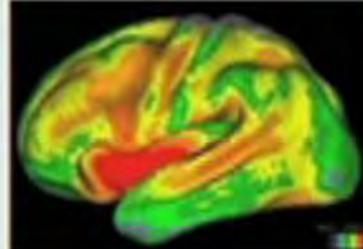
Averaged Difference Images



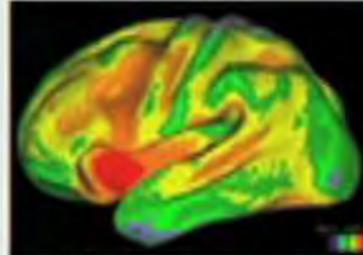
Visual Fixation



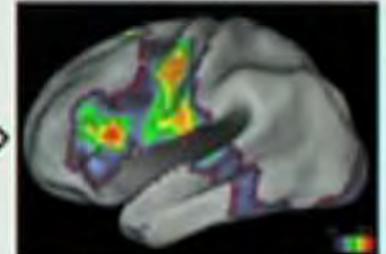
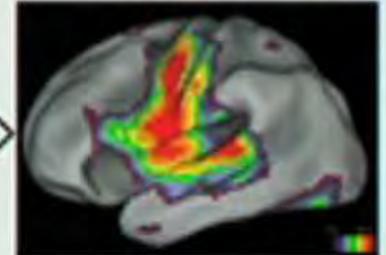
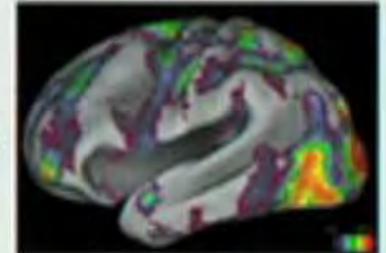
Viewing Words



Reading Words



Generating Verbs



« Our resting brain is never at rest. »

- Marcus Raichle

500 1300

Relative PET Counts

0 5

% Difference

(Adapted from Petersen et al (Nature) 1988)

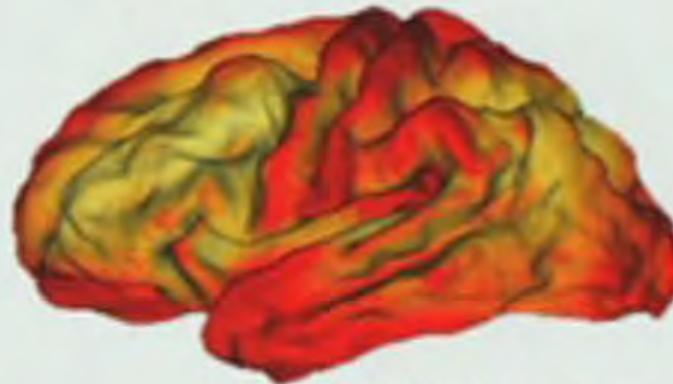


An Historical View

Reflexive
(Sir Charles Sherrington)



Intrinsic
(T. Graham Brown)



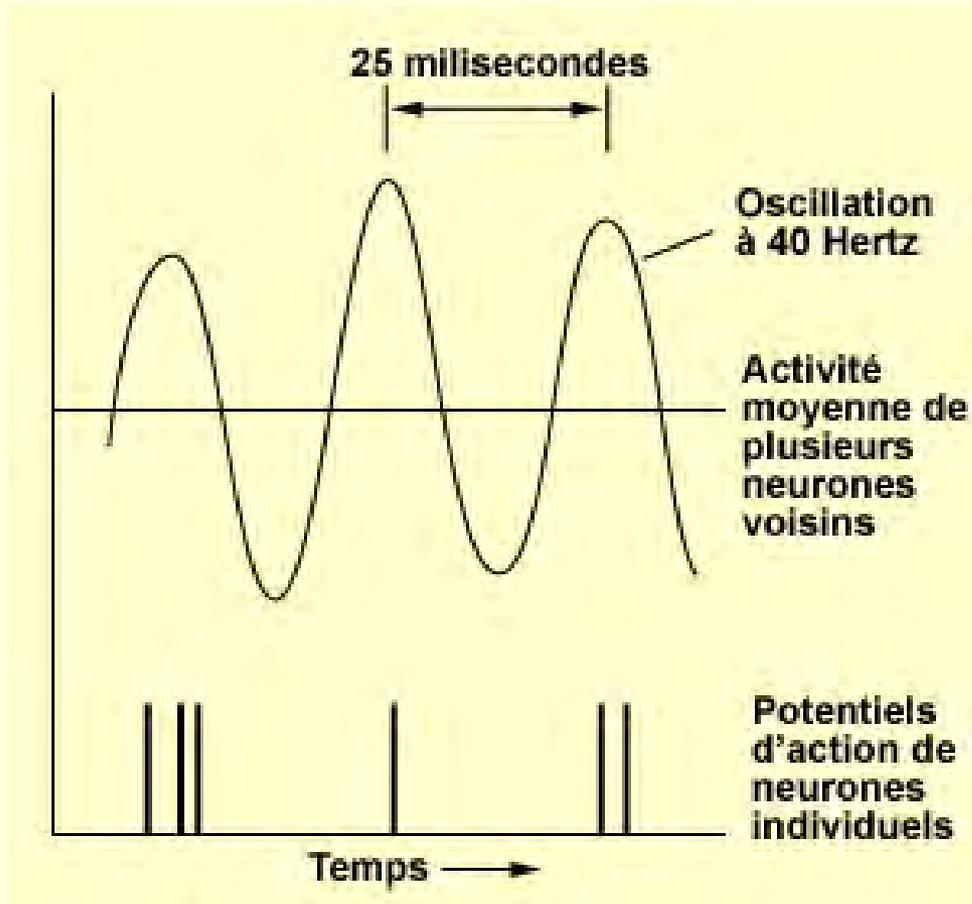
The Endogenously
Active Brain:
The Need for an Alternative
Cognitive Architecture

William Bechtel

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

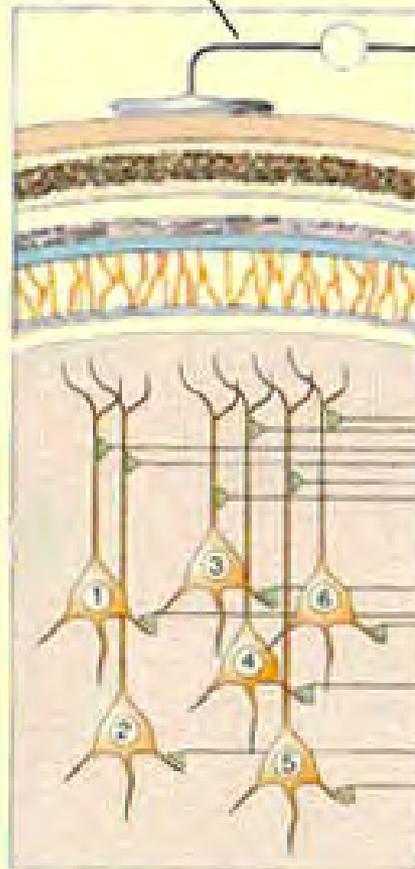
<http://mechanism.ucsd.edu/research/bechtel.The%20Endogenously%20Active%20Brain.pdf>

Raichle: Two Views of Brain Funct

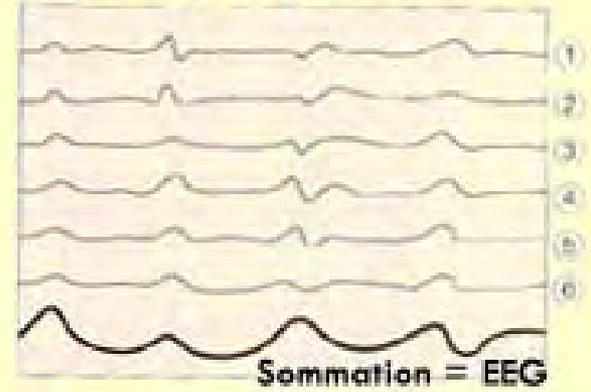




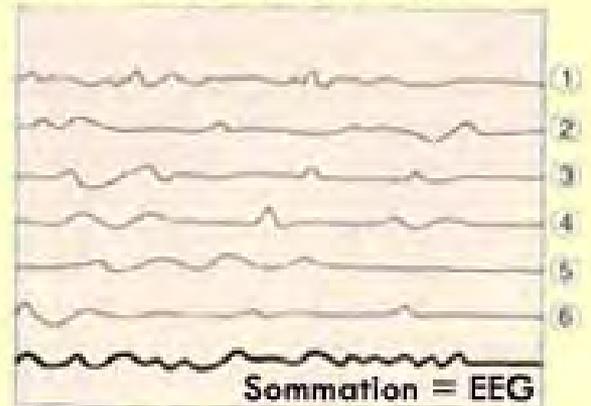
Électrode d'EEG



Décharges synchronisées

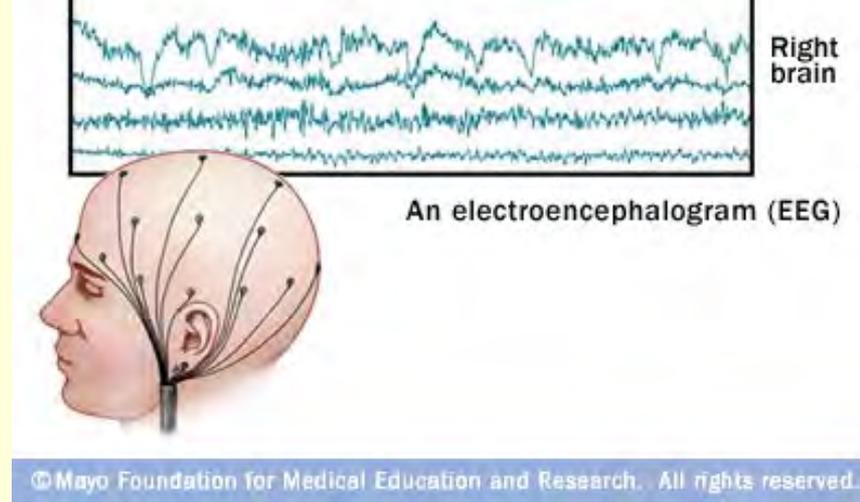


Décharges irrégulières



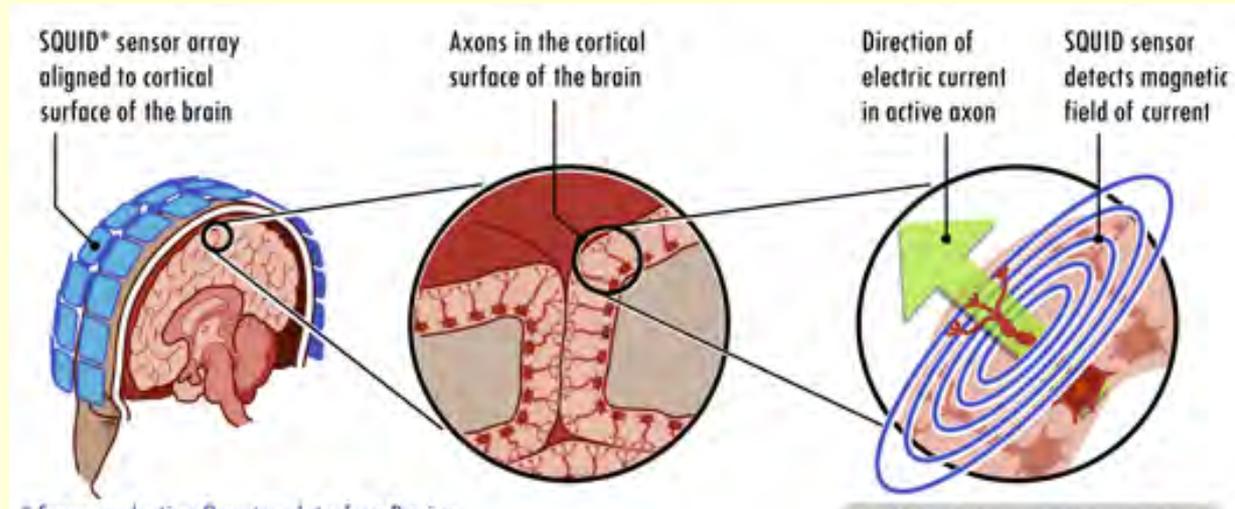
Électroencéphalogramme (EEG)

L'électroencéphalographie (EEG) et la magnétoencéphalographie (MEG) sont deux techniques **non invasive** pour enregistrer l'activité du cerveau.



Les oscillations recueillies, dont la fréquence va de < 1 Hz à > 100 Hz, correspondent à l'**activité globale** des neurones du cerveau **en temps réel**.

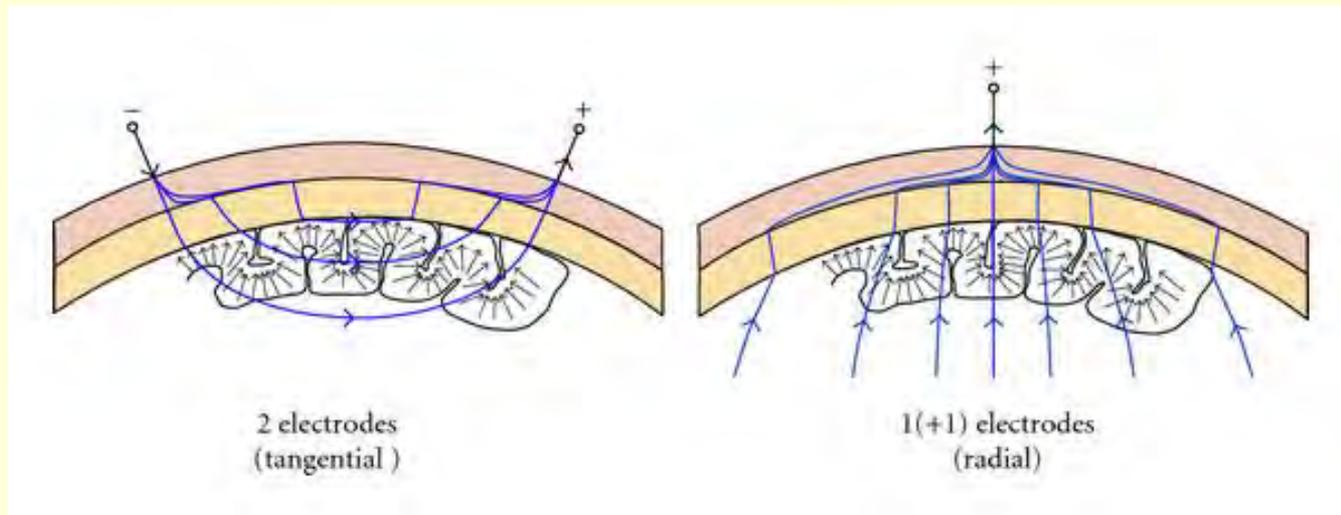
Alors que l'**EEG** enregistre l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes appliquées sur le scalp, la **MEG** mesure le champ magnétique associé à ce courant électrique grâce à des détecteurs sensibles aux champs magnétiques alignés sur le crâne.



Le potentiel électrique d'un seul neurone est beaucoup trop faible pour être détecté par l'EEG ou la MEG. Donc toujours l'activité synchrone de populations entières de milliers ou de millions de neurones qui est détectée.

Ce sont les **neurones pyramidaux du cortex** qui produisent le plus de signal car il sont alignés et ont tendance à décharger de façon synchrone.

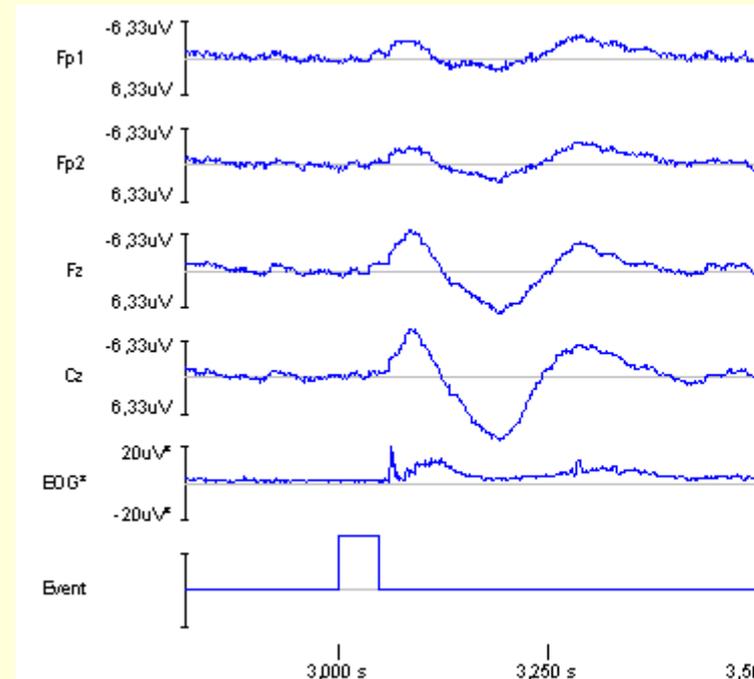
Comme le voltage diminue avec le carré de la distance, l'activité dans les **structures sous-corticales** est plus difficile à détecter.



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



- Dans les années **1970** : développement permettant de relier l'activité corticale de l'EEG avec la présentation d'un stimulus (**potentiels évoqués**)
- **Exemple** : Kutas et Hillyard trouve en **1980** que lorsque le dernier mot d'une phrase est anormal, l'EEG montre une déflexion négative environ 400 millisecondes après.





EEG

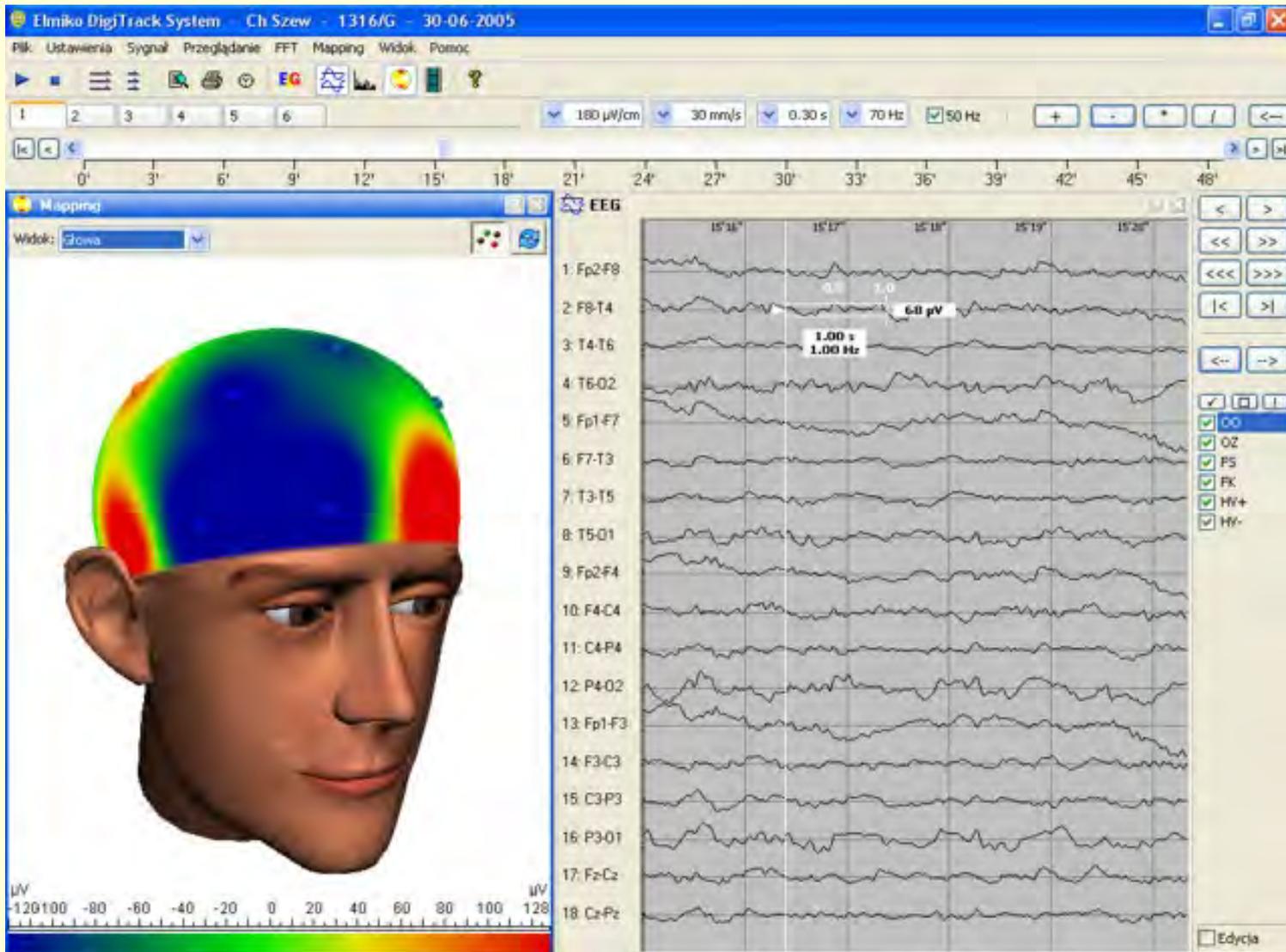
- Traditionnellement peu d'info sur la localisation de l'activité

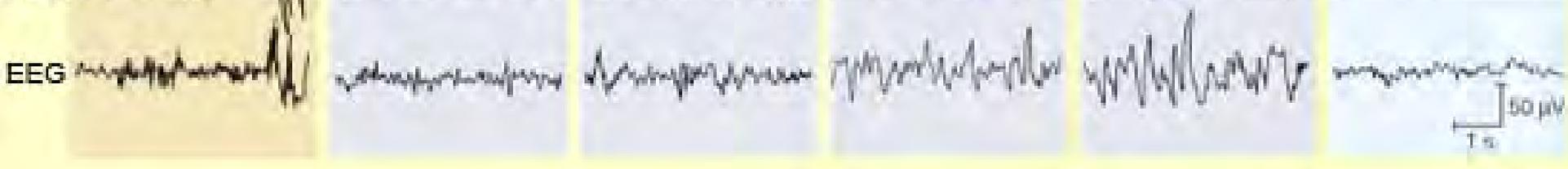
mais bonne résolution temporelle

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



- Enfin, le signal oscillatoire peut maintenant être cartographié sur la surface cérébrale (avec de fausses couleurs semblables à l'IRMf) et animé en temps réel.





ÉVEIL

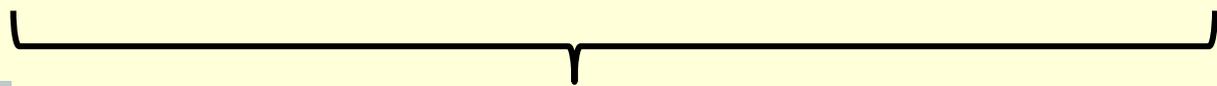
I

II

III

IV

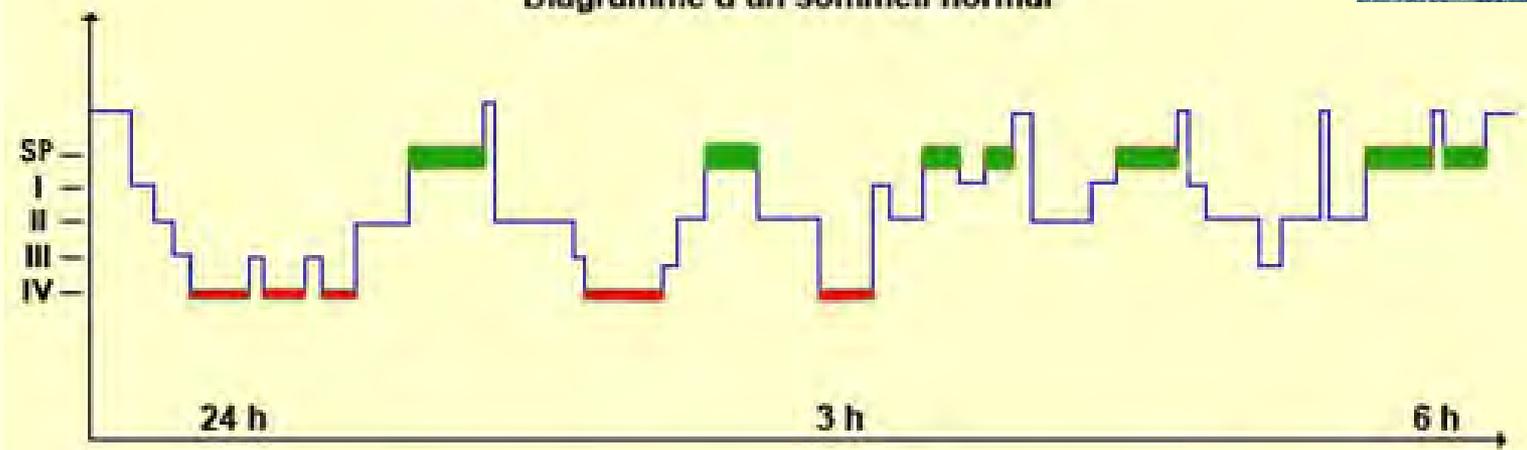
REM



RÊVE



Diagramme d'un sommeil normal



Sommeil lent : I à IV ———
 Sommeil profond : IV ———

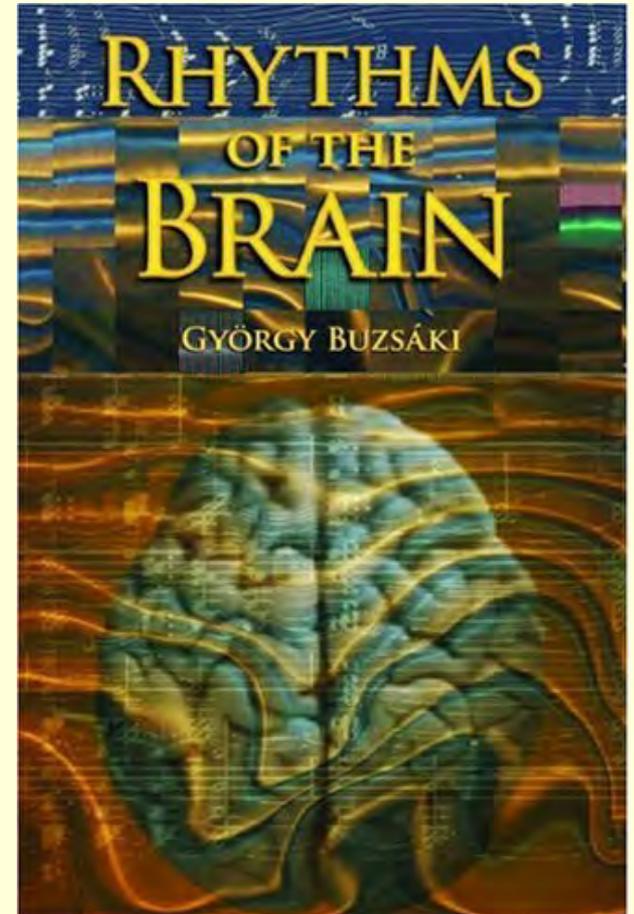
Sommeil paradoxal : V ———

Rôle(s) fonctionnel(s) de ces oscillations

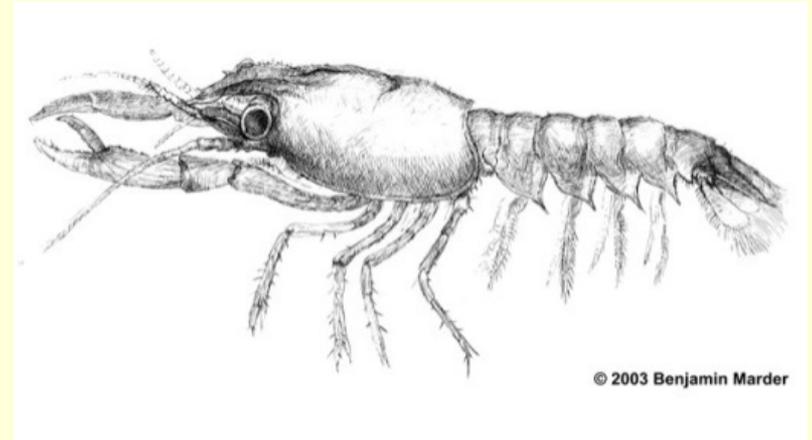
Il fut un temps, pas si lointain dans l'histoire des neurosciences, où le caractère chaotique de l'ensemble de ces oscillations, **associé à du bruit de fond**, était peu considéré, voire ramené à un épiphénomène sans importance.

Cette époque est toutefois bien révolue.

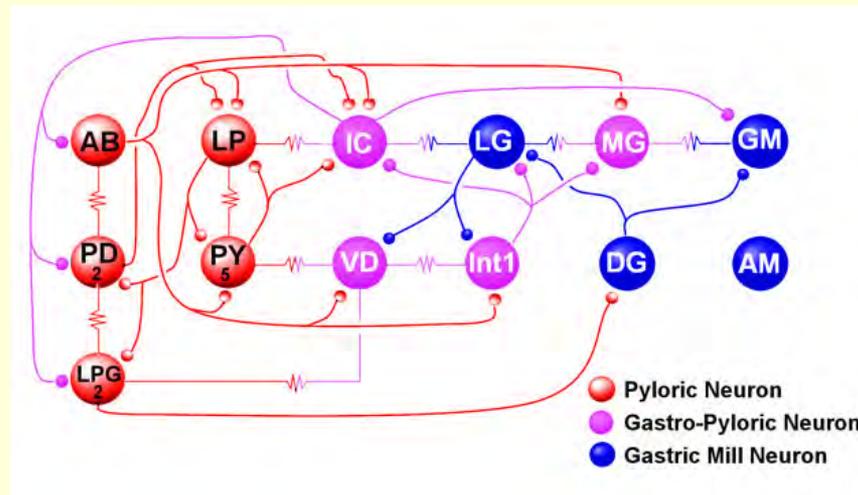
En effet, la dimension temporelle de l'activité cérébrale qui se traduit par ces rythmes cérébraux est maintenant au cœur des travaux dans des champs de recherche complexes comme le sommeil ou la conscience.



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

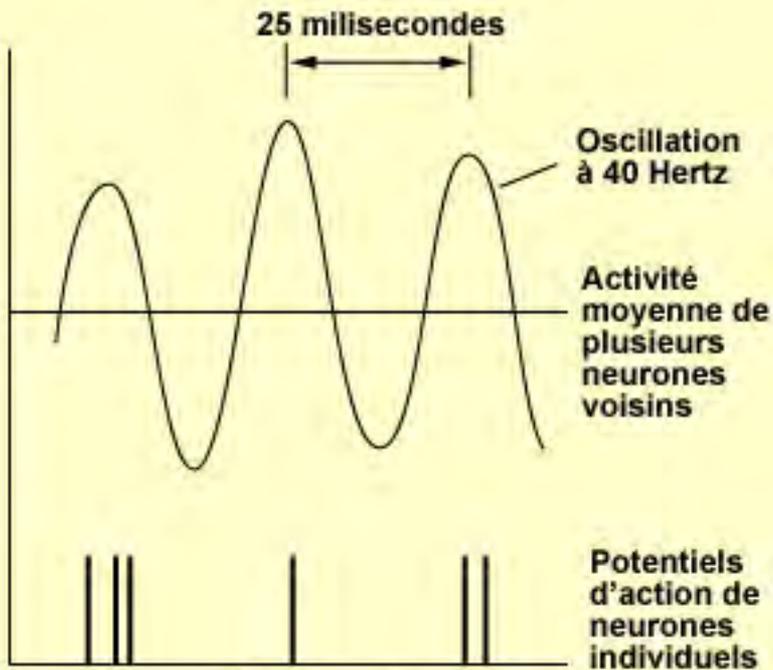
Scaling Brain Size, Keeping Timing: Evolutionary Preservation of Brain Rhythms

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

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



B



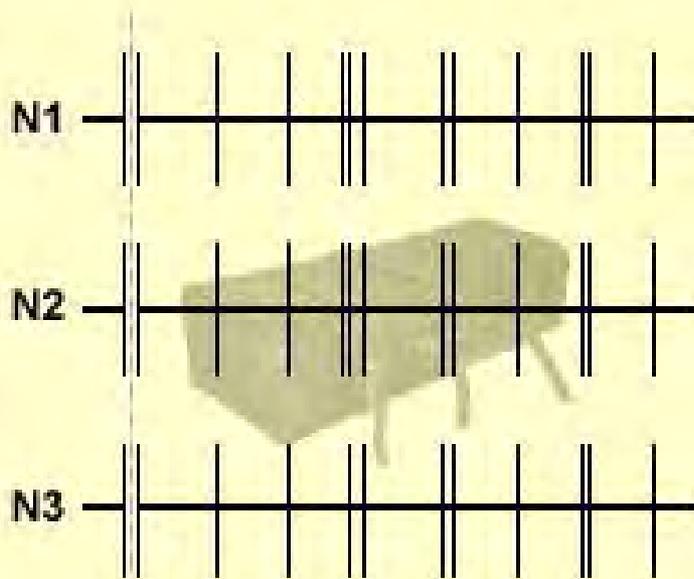
Oscillations

(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.

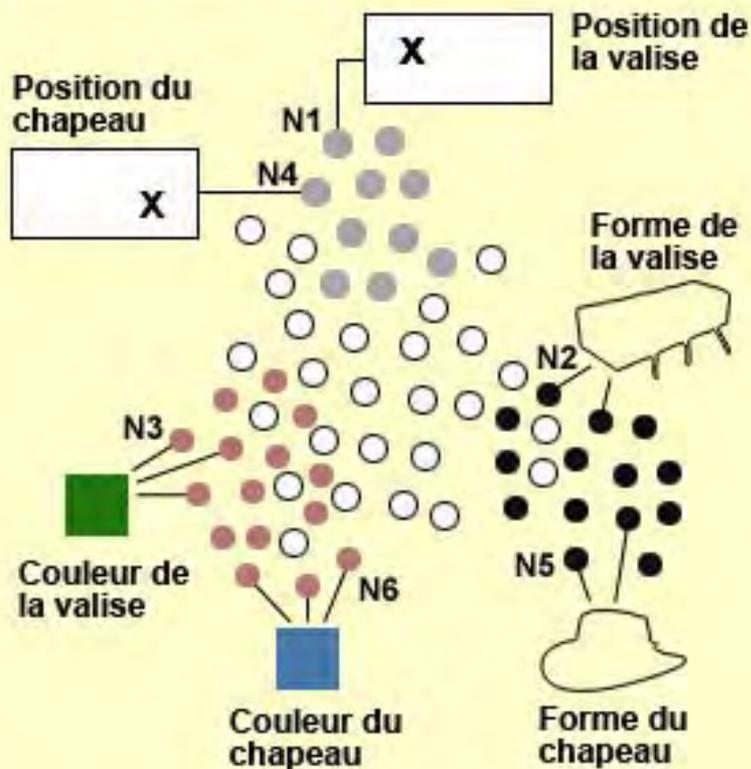
Du coup, ce sont des assemblées de neurones **entières** qui se « reconnaissent et se parlent ».

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,

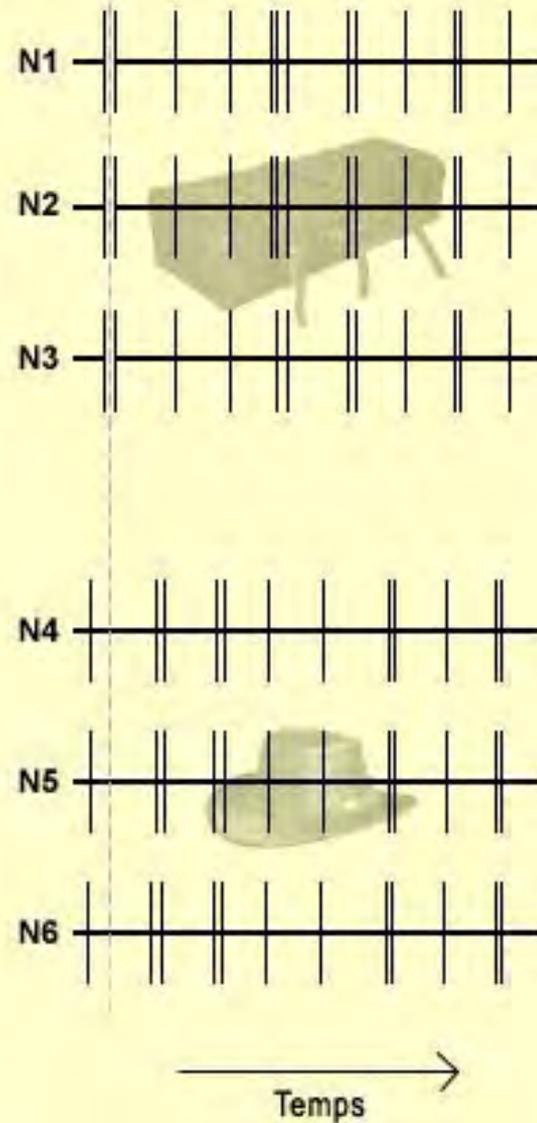
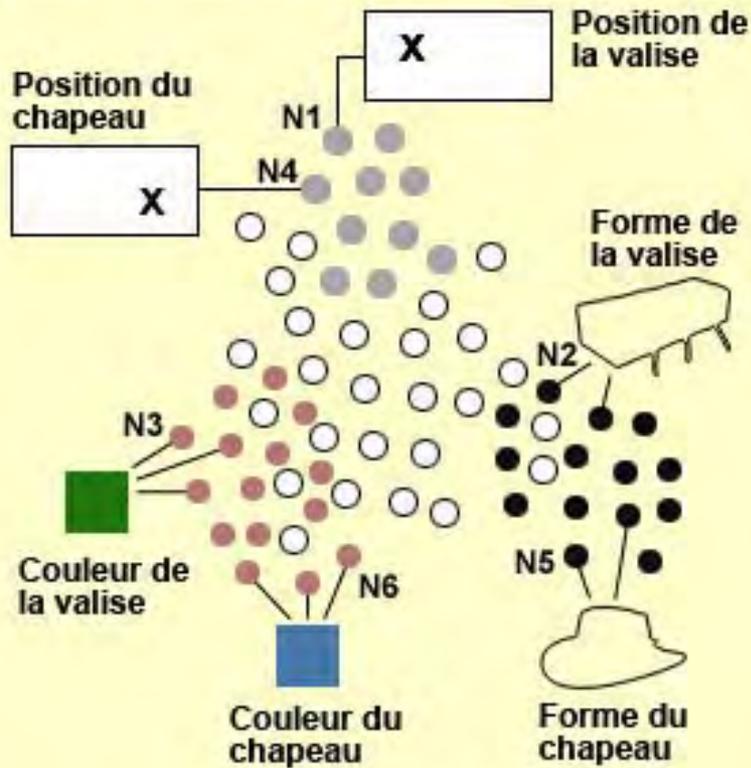
propriétés qui activent souvent des **régions distinctes et distantes**
dans le cerveau.

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



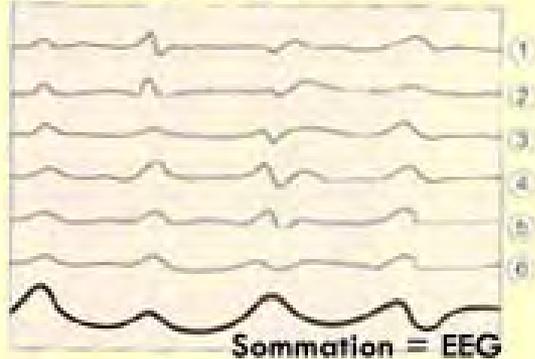
Alors on peut se demander **comment les caractéristiques d'un même objet sont-elles mises ensemble** pour former la perception consciente et distincte que l'on a de chacun des deux objets, sans en mélanger les caractéristiques ?

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

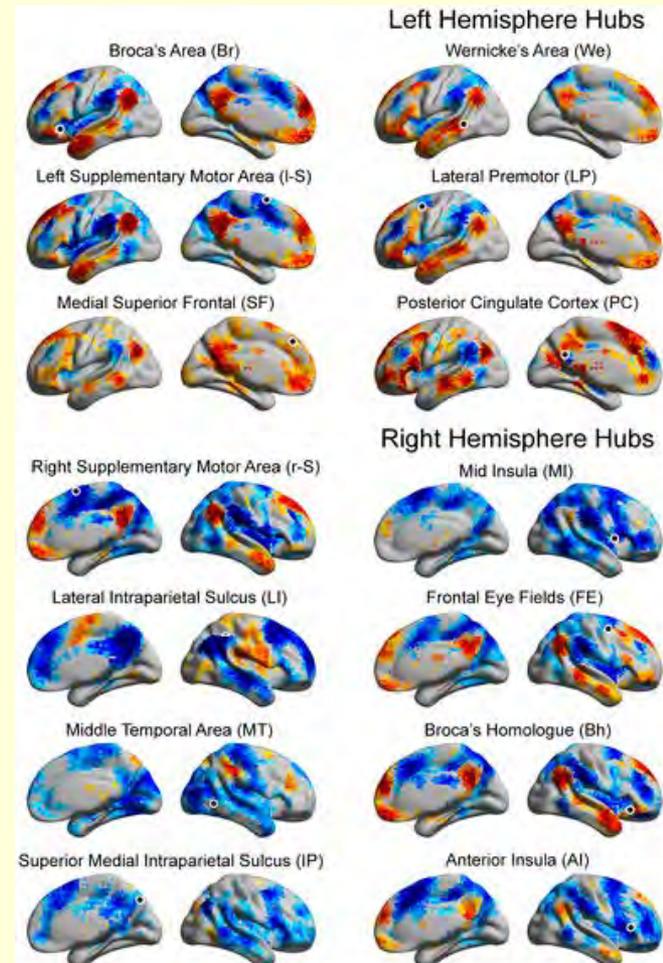
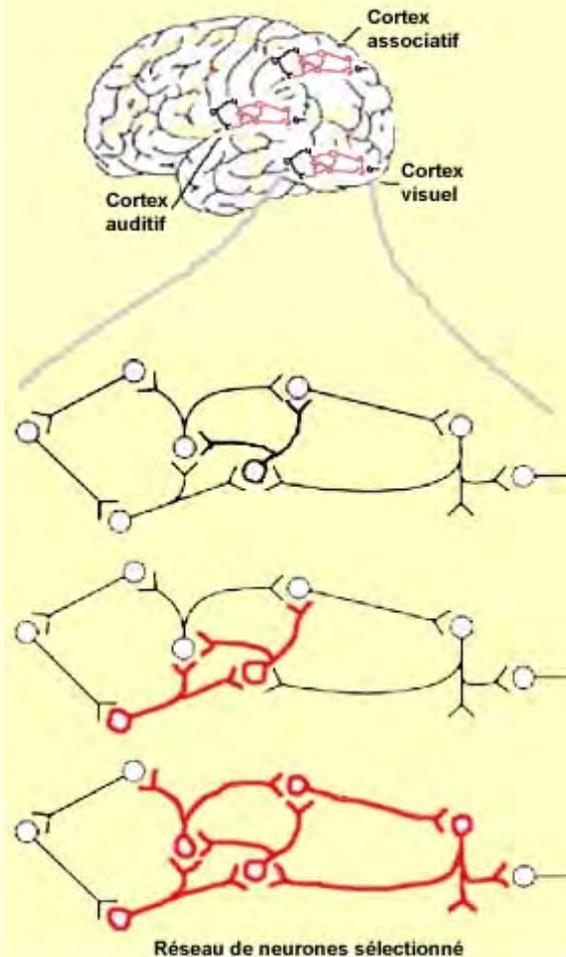
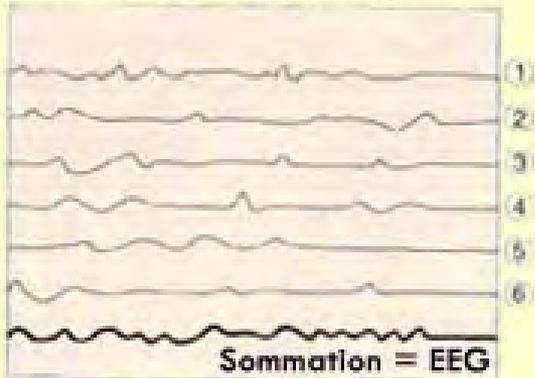


On observe donc la formation d'assemblées de neurones transitoires, rendues possible par des oscillations et des synchronisations, qui se produisent non seulement dans certaines structures cérébrales, mais dans des réseaux largement distribués à l'échelle du cerveau entier.

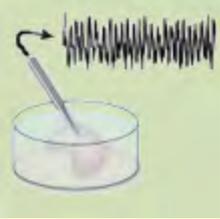
Décharges synchronisées



Décharges irrégulières



On voit aussi apparaître de plus en plus d'hypothèse sur la manière dont les **oscillations cérébrales** émergent et **interagissent indépendamment de tout stimulus spécifique.**



L'hippocampe entier révèle ses secrets

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2011/01/24/lhippocampe-entier-revele-ses-secrets/>

Il arrive parfois que des découvertes scientifiques importantes ne soient pas tant le fruit d'une expérience particulière, mais du long travail préalable pour mettre au point le protocole expérimental.

C'est le cas d'une étude de Sylvain Williams publiée en novembre 2009 dans Nature Neuroscience. Pendant des années, Williams et ses collaborateurs ont raffiné une technique permettant d'enregistrer l'activité neuronale dans un **hippocampe** entier de rat conservé in vitro.

C'est que la technique classique, celle où l'on enregistre l'activité des neurones dans une **mince tranche** d'hippocampe, est beaucoup plus accessible. Mais elle détruit inévitablement énormément de circuits internes à l'hippocampe, tous les axones qui voyagent perpendiculairement à la tranche, par exemple.

Par étonnant que dès les premiers enregistrements dans l'hippocampe entier, l'équipe de Williams a brisé un dogme vieux de plusieurs décennies :

le **rythme Thêta**, rythme majeur de décharge des neurones de l'hippocampe, ne provient pas nécessairement d'une région extérieure (le septum) comme on l'avait toujours cru, mais peut provenir de l'hippocampe lui-même !

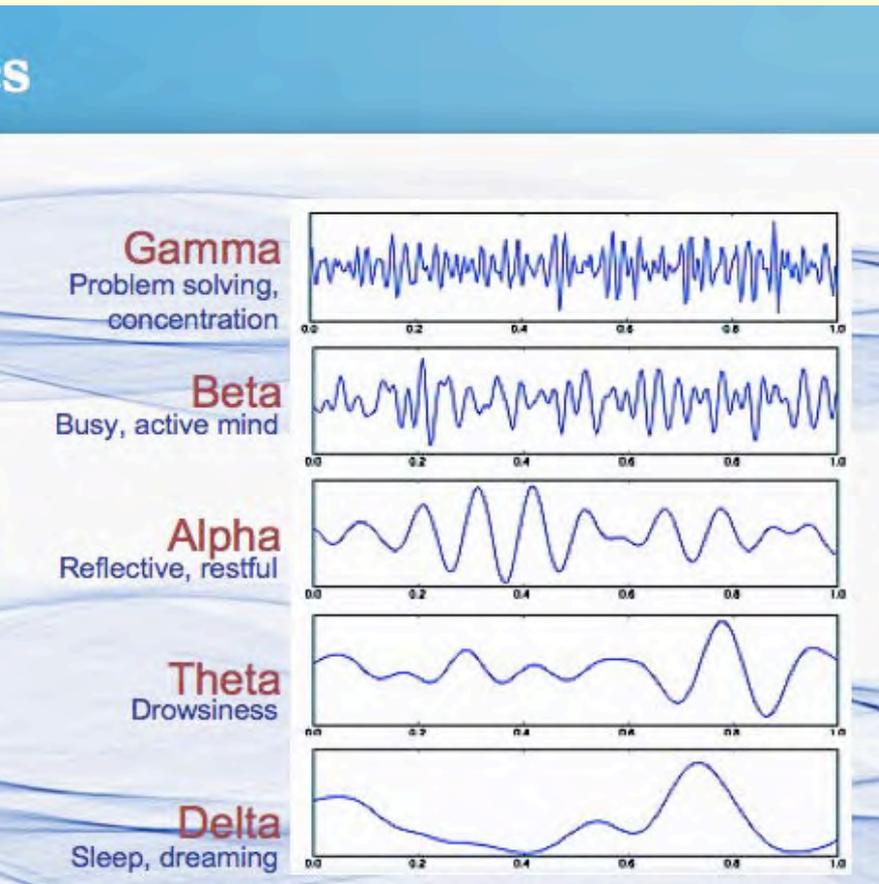
Quand on sait l'importance primordiale des rythmes Thêta pour l'apprentissage et la mémoire, savoir que ce rythme peut émerger de manière **endogène** dans l'hippocampe, et même spécifiquement dans sa sous-région CA1 comme l'étude a pu le montrer, soulève d'intéressantes questions pour l'avenir. Par exemple, celle du type d'interneurones de la région CA1 impliqués dans la génération des rythmes.

Autre exemple...

Le BLOGUE du CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX

Synchroniser nos neurones pour syntoniser notre pensée ?

<http://www.blog-lecerveau.org/blog/2011/03/28/synchroniser-nos-neurones-pour-syntoniser-notre-pensee/>

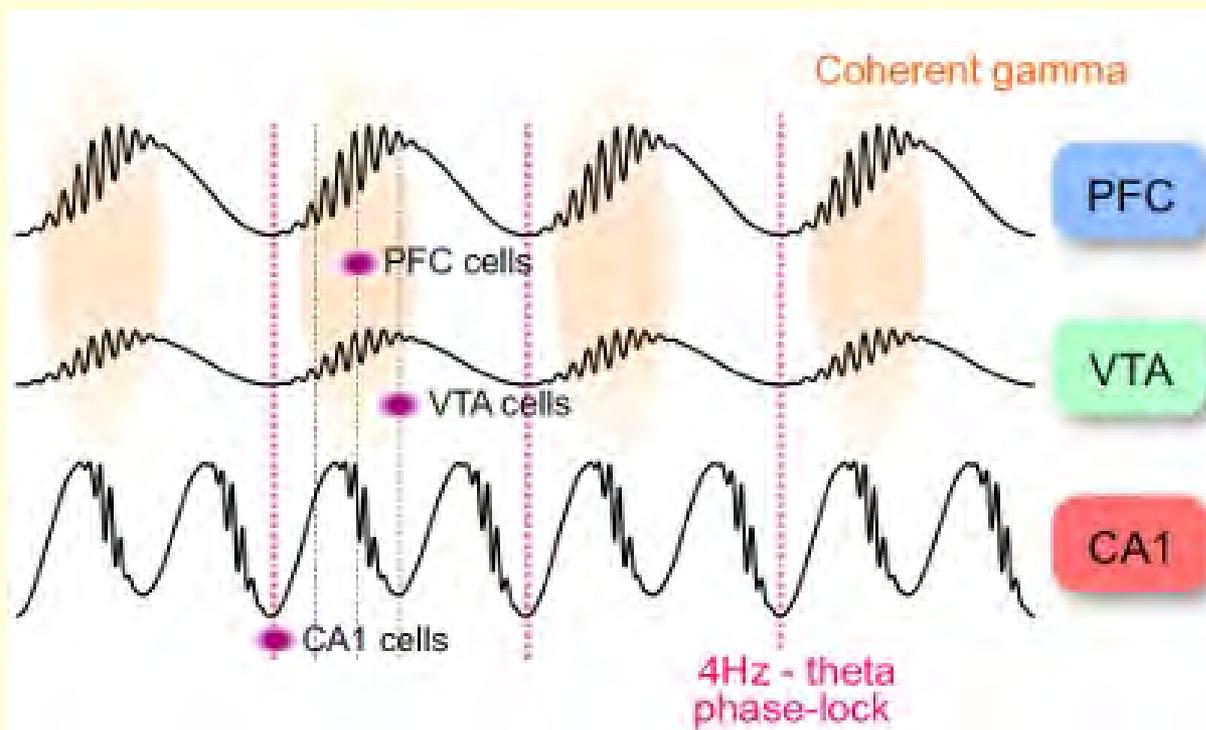


Laura Colgin a montré (*Nature*, novembre 2009) que **deux fréquences différentes d'oscillation dans le spectre Gamma** pouvaient servir à sélectionner alternativement deux types d'information :

tantôt un **souvenir** (fréquences basses, 25-50 Hz),

tantôt de l'information pertinente sur ce qui se passe **actuellement** (fréquences élevées, 65-140 Hz).

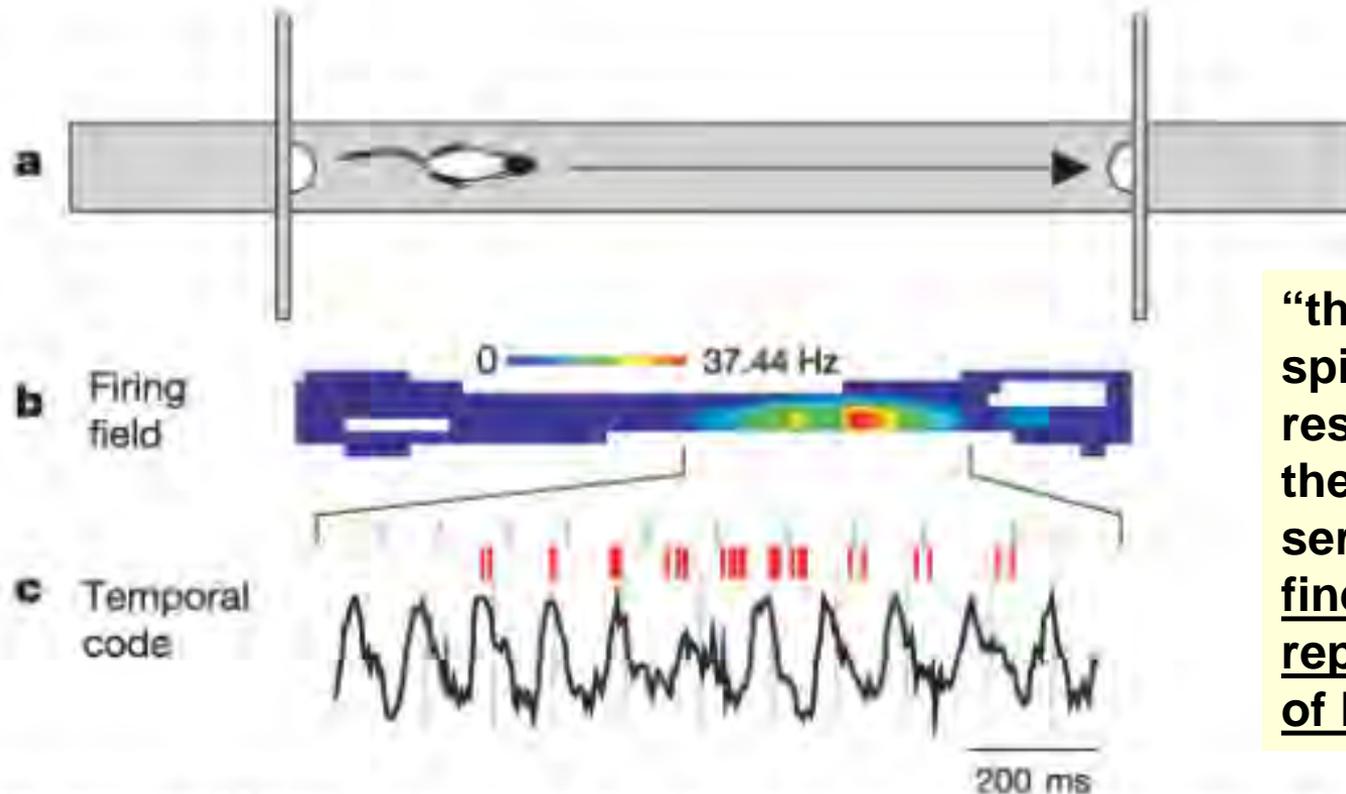
Ces **oscillations** dans le réseau sont donc capables de couvrir plusieurs bandes de fréquences qui peuvent se superposer.



Et peuvent servir de repère pour des computations complexes...

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

William Bechtel (2013)



“the time of spiking with respect to the theta cycle served as the finer-grain representation of location.”

Figure 4. Illustration of theta precession. As rat runs along the maze, it crosses the place field of a place cell (shown in the middle). The place cell spikes, shown in red at the bottom, precess against the underlying theta oscillation, firing first just after the peak and moving progressively earlier on subsequent theta cycles. From Huxter, Burgess, and O'Keefe (2003).

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>

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.

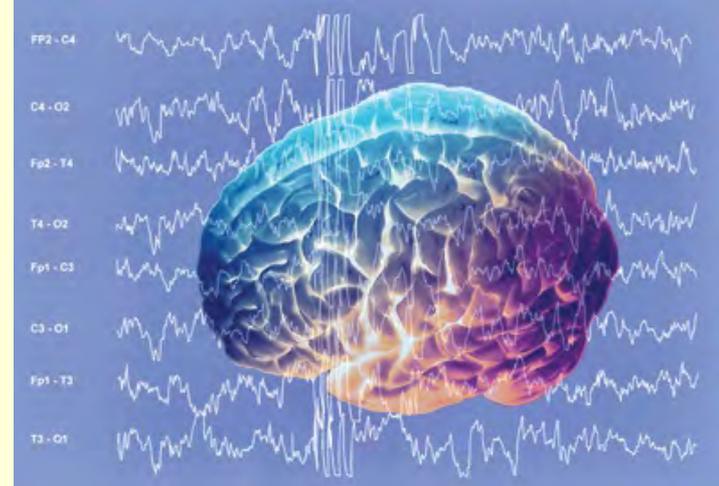
This study is also one of the first to show a causal relationship between gamma oscillations and cognition, not just a correlational one. »

Rôle fonctionnel des oscillations :

De nombreuses données montrent donc que cette activité endogène oscillatoire est utilisée dans diverses activités de traitement de l'information.

- **lier** différentes propriétés d'un même objet ("binding problem")
 - **contrôler** le flux d'information dans certaines régions
 - **créer des fenêtres temporelles** où certains phénomènes (comme la PLT ou une perception sensorielle) peuvent se produire (par sommation temporelle, etc.), et d'autre où ils ne peuvent pas.
- permettant aux processus neuronaux de répondre aux inputs extérieurs, mais par la suite **briser ces réponses** afin de pouvoir échantillonner d'autres inputs.

Car si le potentiel de membrane d'un neurone oscille, il y aura des moments où c'est plus facile pour lui de déclencher des potentiels d'action (dépolariation) et d'autres moins (hyperpolarisation)



Watching brain oscillations drive perception.

http://mindblog.dericbownds.net/2015/01/watching-brain-oscillations-drive.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+Mindblog+%28MindBlog%29

JANUARY 16, 2015

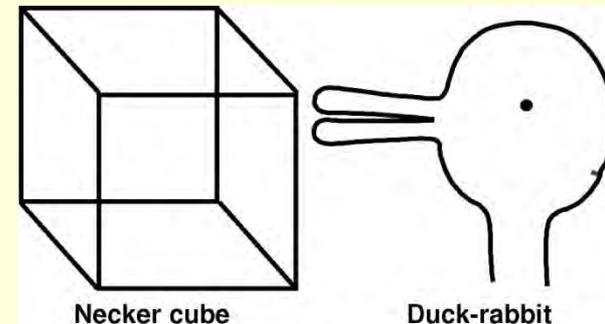
Are the electrical oscillations observed in EEG recordings as we perceive images simply correlations, reflecting brain processes driving our visual experience, **or are the oscillations themselves causal, driving the visual experience?**

[Helfrich et al.](#) address this basic question in a clever experiment in which they force brain oscillations of the left and right visual hemispheres into synchrony using transcranial alternating current stimulation.

This causes human subjects to more often perceive an ambiguous figure in one of its perceptual instantiations, **showing that the oscillations are driving the visual experience, not vice versa.**

Selective Modulation of Interhemispheric Functional Connectivity by HD-tACS Shapes Perception
December 30, 2014

<http://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1002031>



Mentionnons en terminant **le lien entre neuromodulation et oscillations**

Extrait du site web du laboratoire de Henry Markram

<http://markram-lab.epfl.ch/cms/lang/en/pid/88189>

“Oscillations of neural networks in the brain have long been associated with different brain states, and **neuromodulators seem to play a critical role in the induction and modulation of these oscillations**”

On va parler davantage de neuromodulation dans la première heure de cet après-midi...

Pour résumer tout ceci, une petite métaphore...



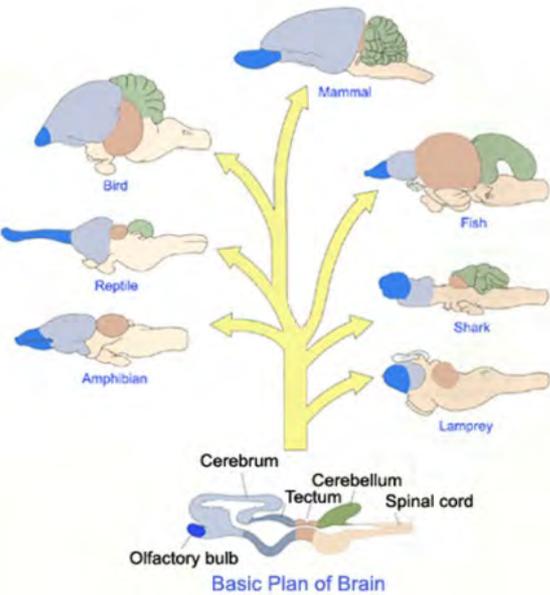
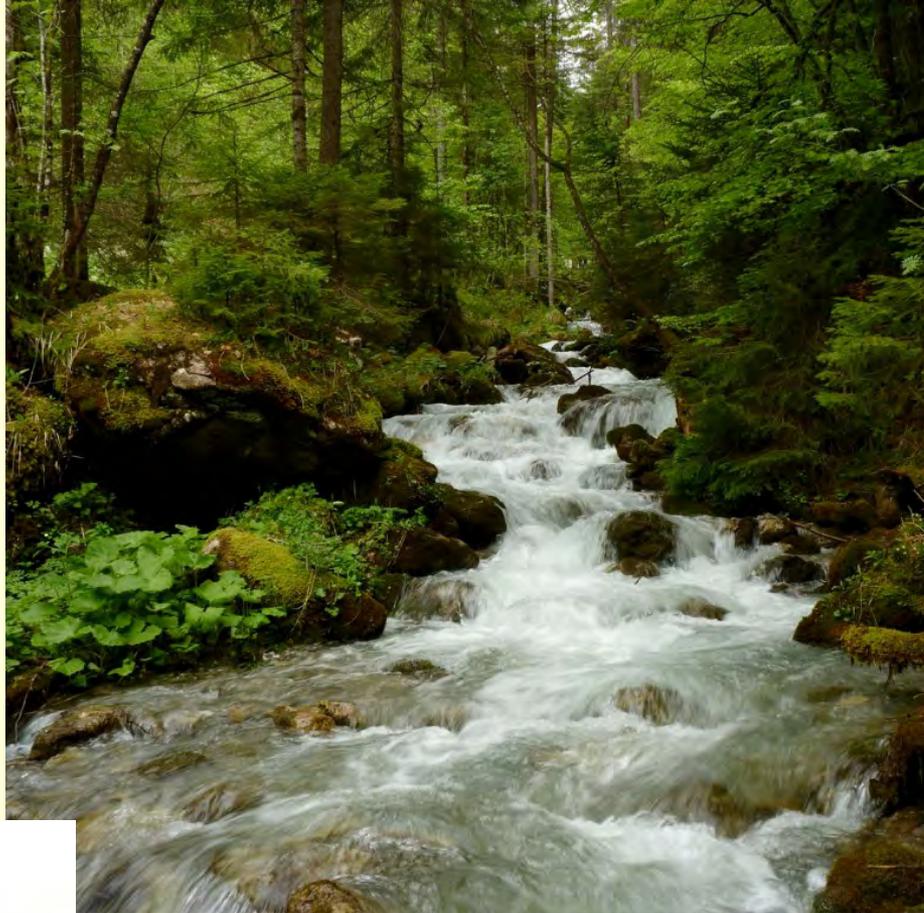
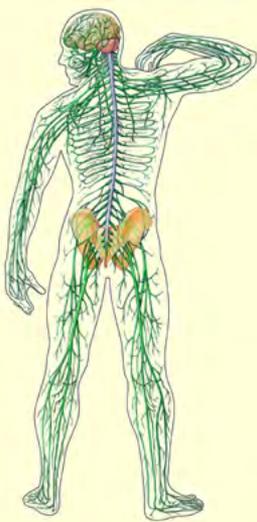
Le **lit de la rivière**
est notre
connectome.

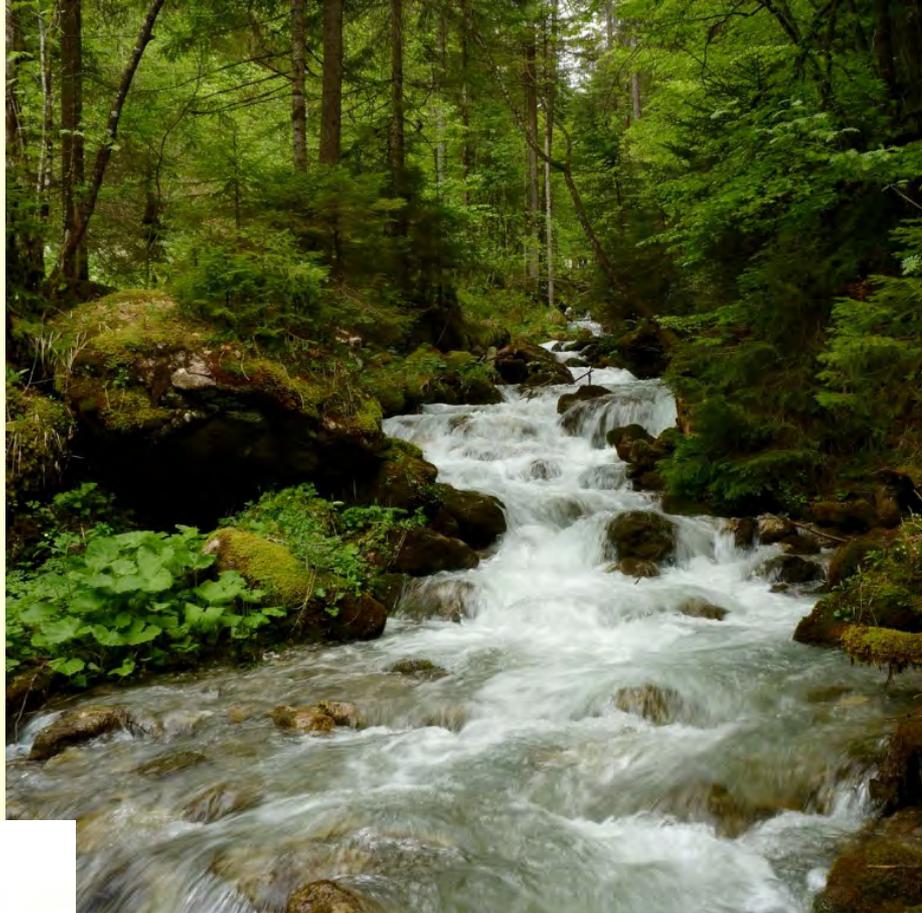
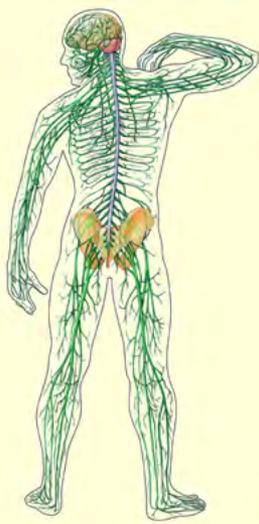


Le **flux de l'eau** est
l'**activité électrique**
du cerveau qui
fluctue
constamment.

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







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

Tout comme les petites routes de notre connectome sont modifiées par notre histoire de vie.

