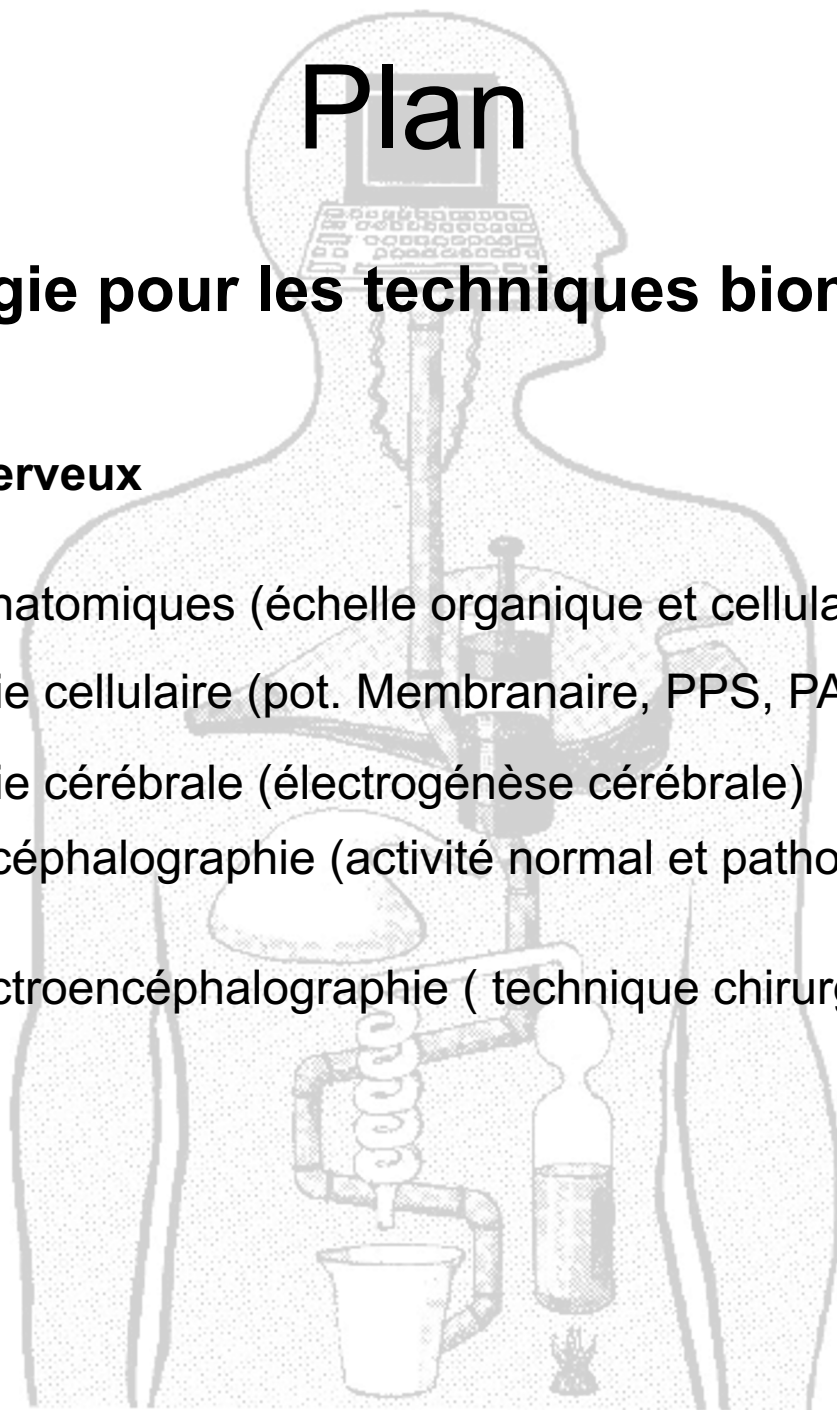


# Plan

## Physiologie pour les techniques biomédicales

### Chap3. Système Nerveux

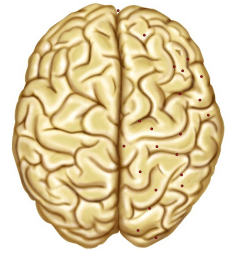
- rappels anatomiques (échelle organique et cellulaire )
- physiologie cellulaire (pot. Membranaire, PPS, PA)
- physiologie cérébrale (électrogénèse cérébrale)
- électroencéphalographie (activité normal et pathologie ; instrumentation)
- stéréoelectroencéphalographie ( technique chirurgicale ; instrumentation)





# RAPPELS

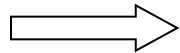
## Neuroanatomie



### Organisation du système nerveux (SN)

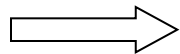
Quatre grands systèmes :

SN central



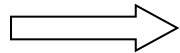
Cerveau, Cervelet, Moelle épinière

SN périphérique



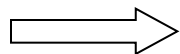
Ganglions, nerfs crâniens, nerfs rachidiens

SN somatique



Système moteur

SN végétatif



Système sympathique & parasympathique



# Principe de fonctionnement du SN

## 1. Recueil de l'information

Milieu intérieur

Milieu extérieur (env<sup>t</sup>)

## 2. Intégration de l'information

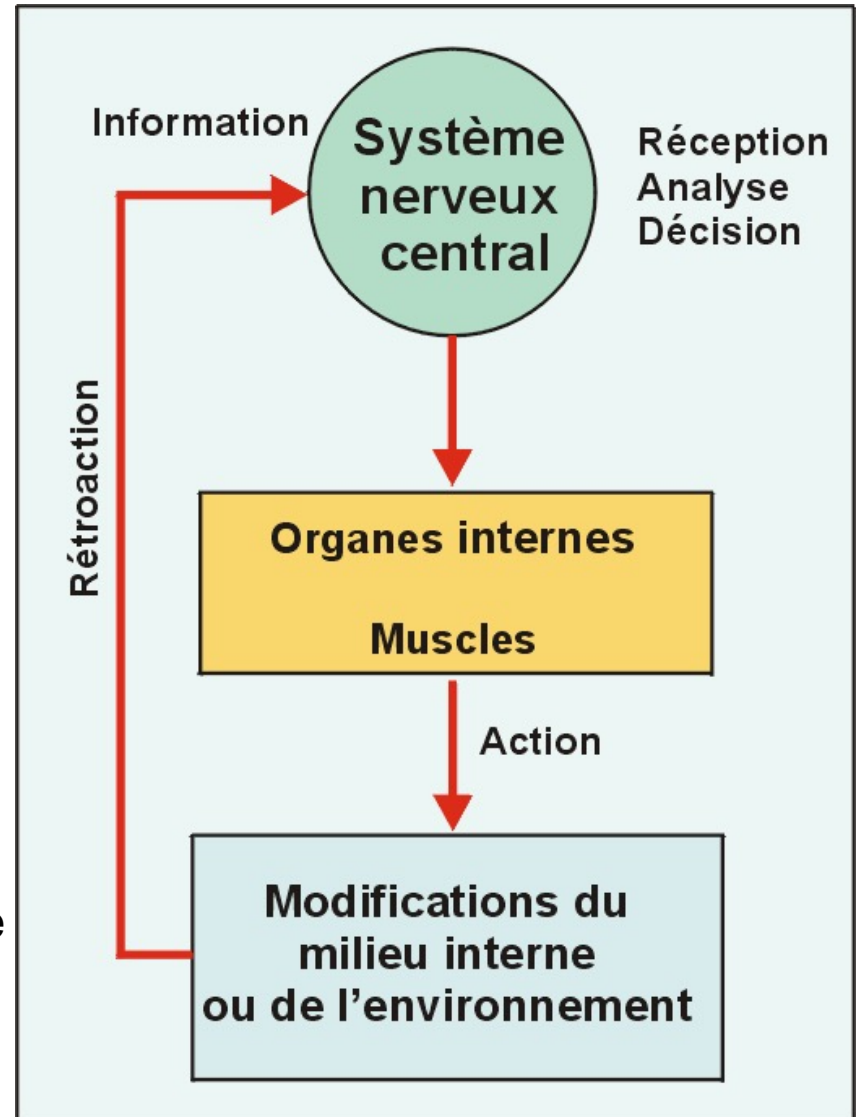
Analyse des stimuli

Prise de décision

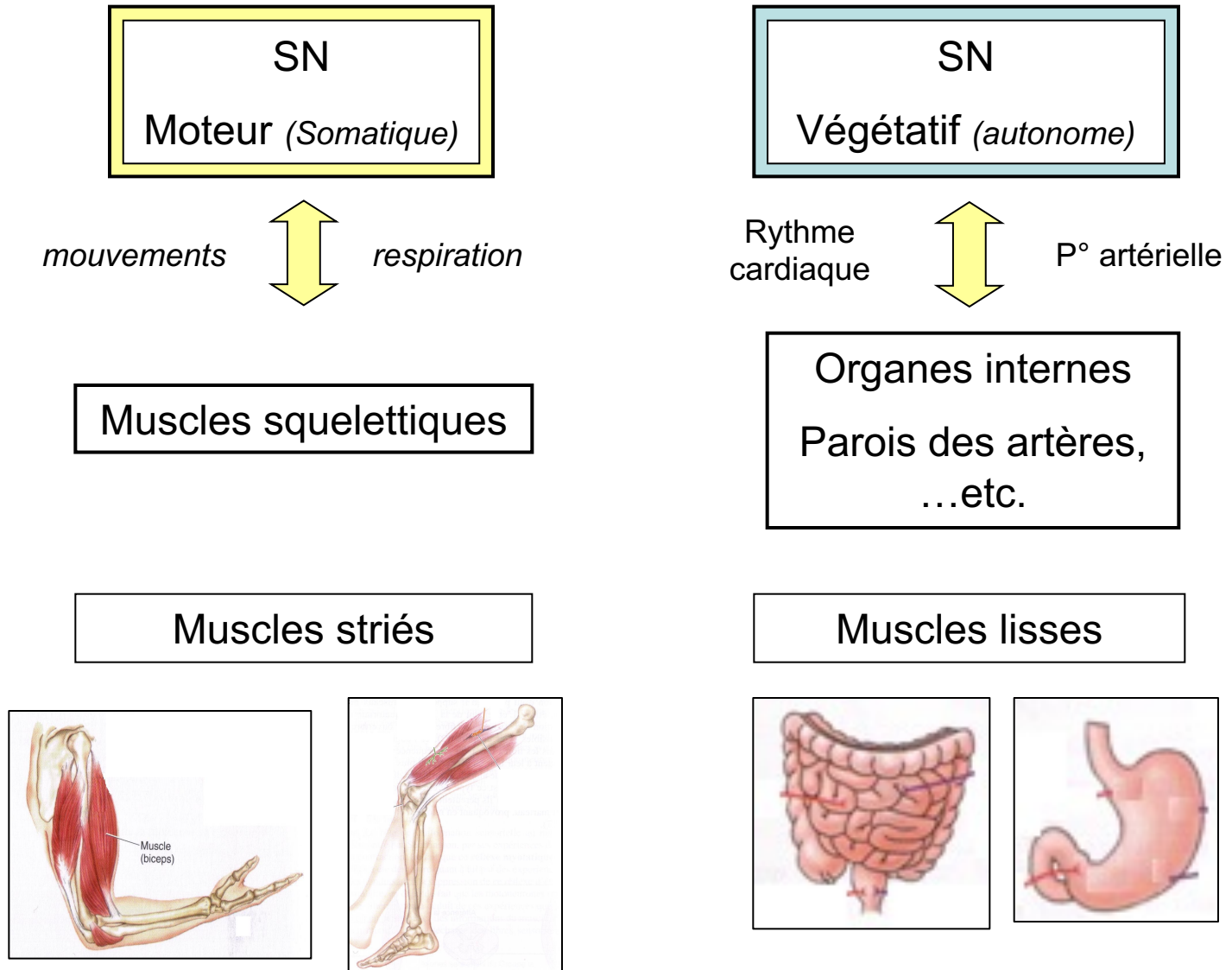
## 3. Réponse / Action

Organes végétatifs

Réponse comportementale  
(muscles)

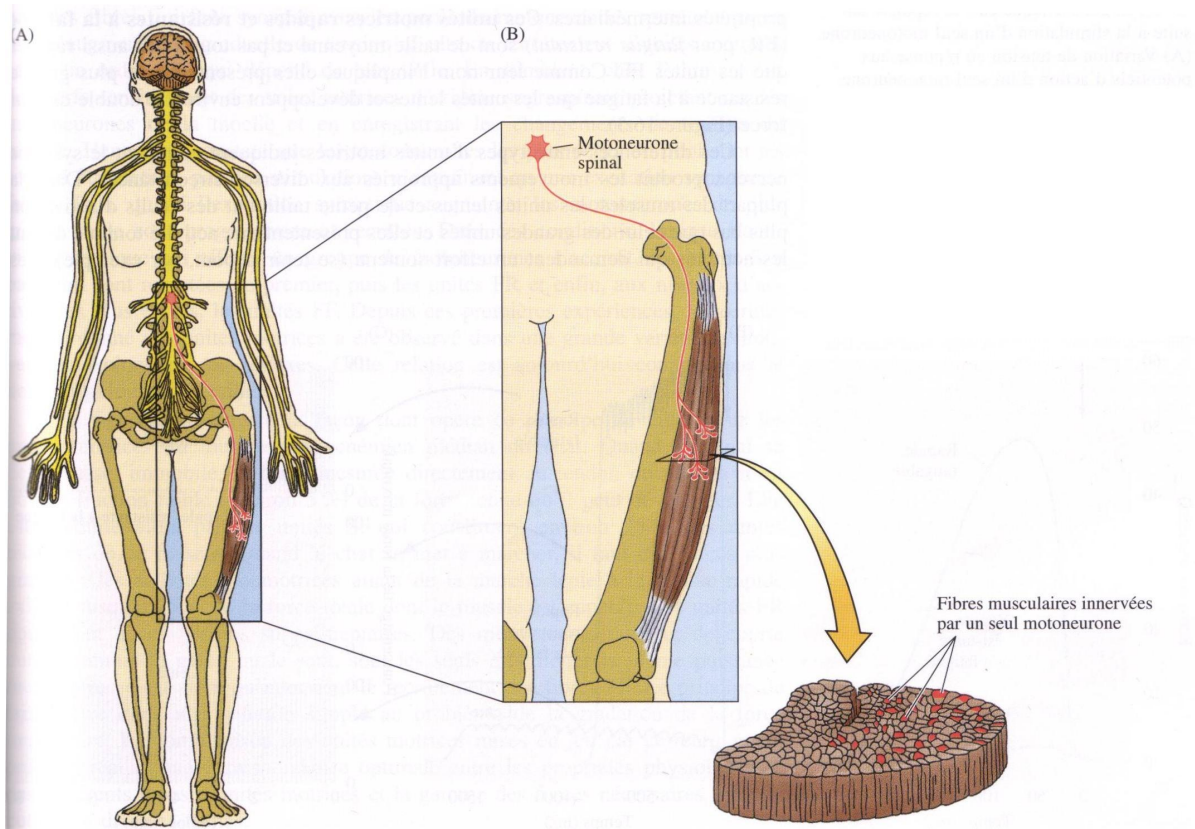


# A. Classification fonctionnelle



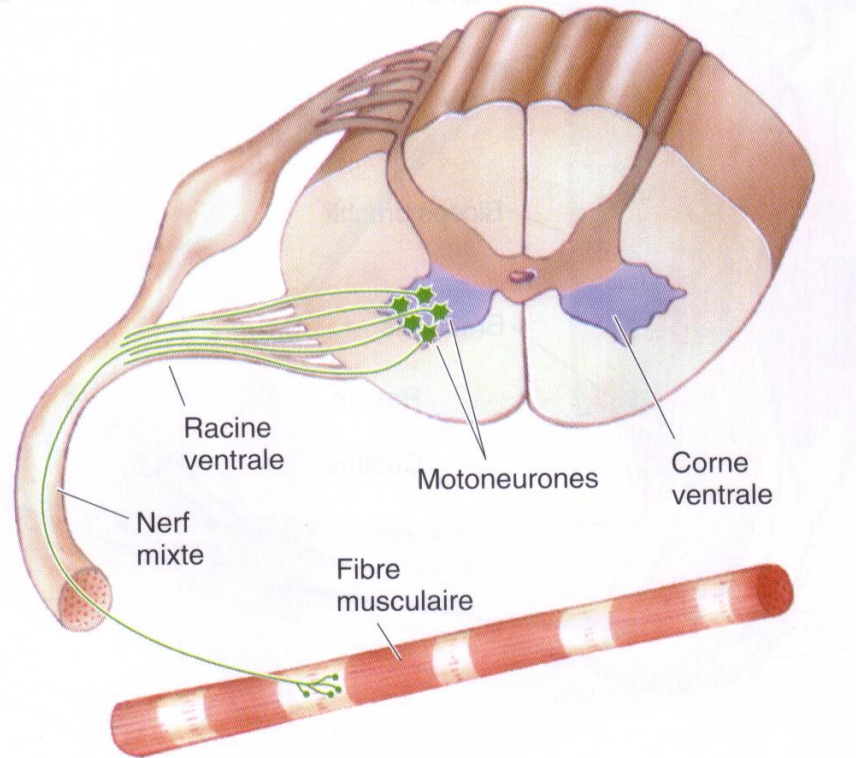
# 1. SN moteur somatique

- Il commande :
- Le Tonus
  - La contraction musculaire
  - Les mouvements des os
  - La parole, ...



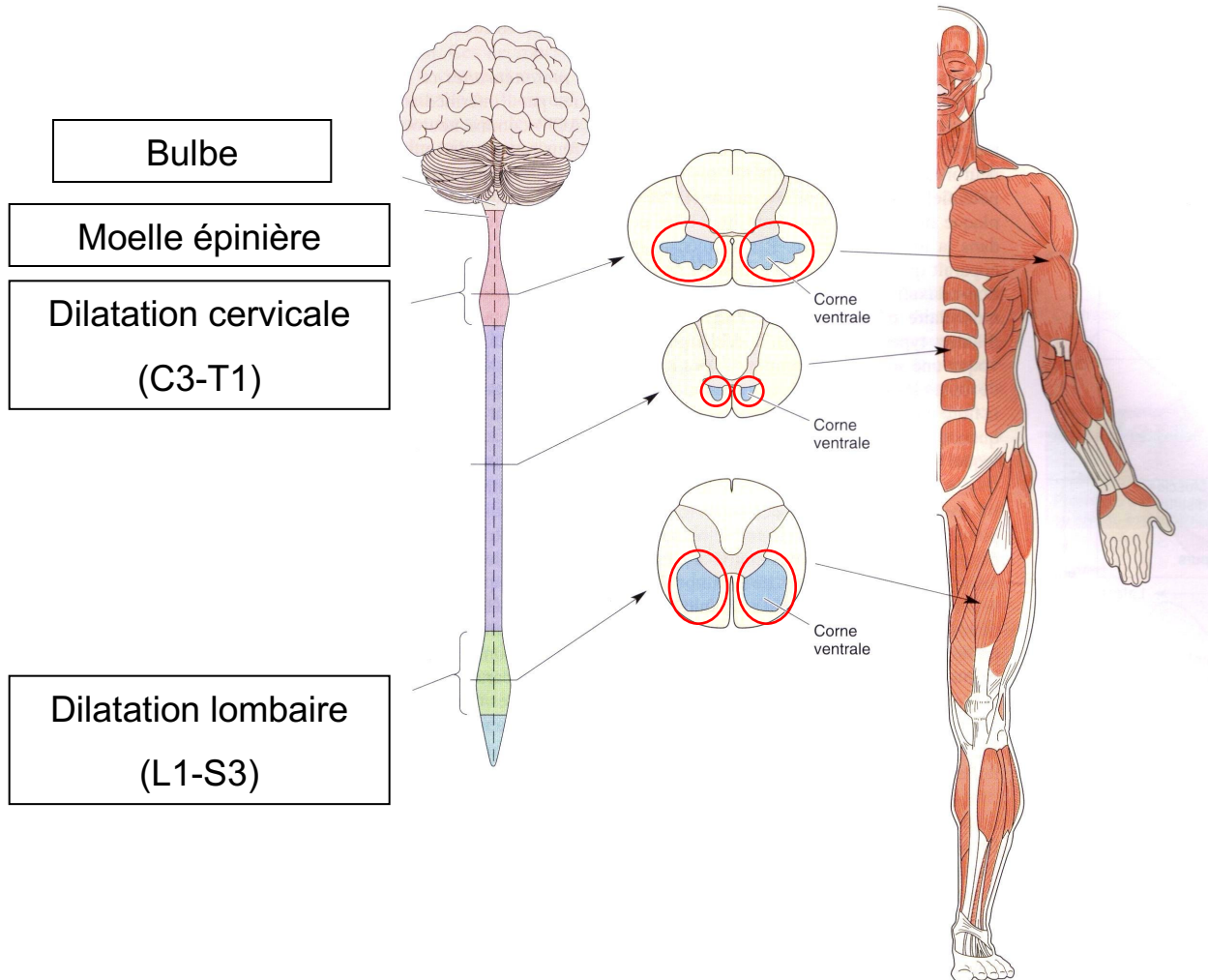
# Organisation du SN moteur somatique

- Muscles somatiques sont innervés par les motoneurones de la corne ventrale de la moelle épinière



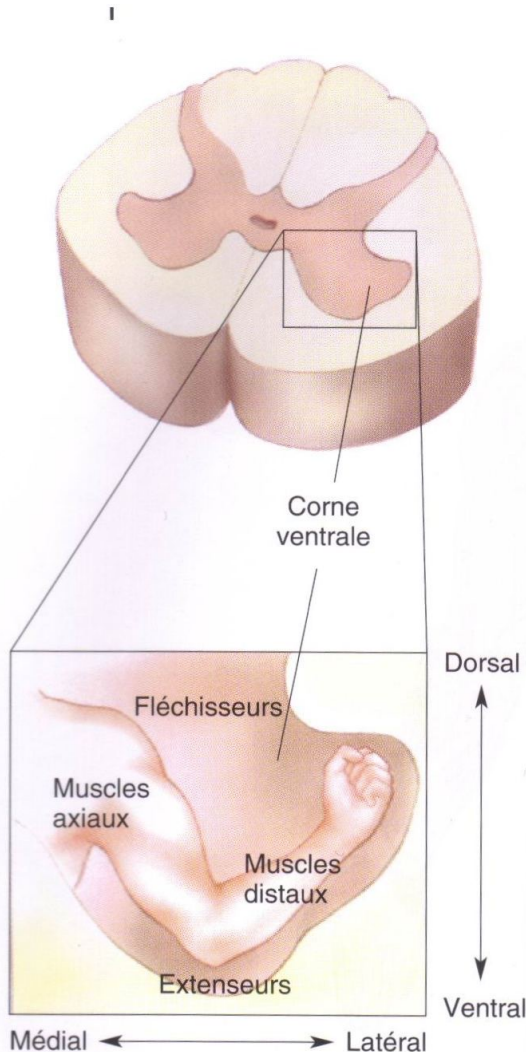
# Organisation du SN moteur somatique

Répartition des motoneurones au niveau de la moelle épinière



Répartition des motoneurones en rapport avec la musculature associée

# Distribution des motoneurones dans la corne ventrale



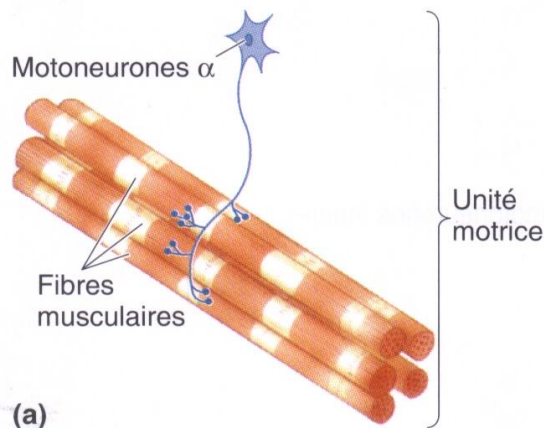
Les motoneurones de commande des muscles

- Fléchisseurs occupent une position dorsale
- Extenseurs occupent une position ventrale
- Axiaux occupent une position médiane

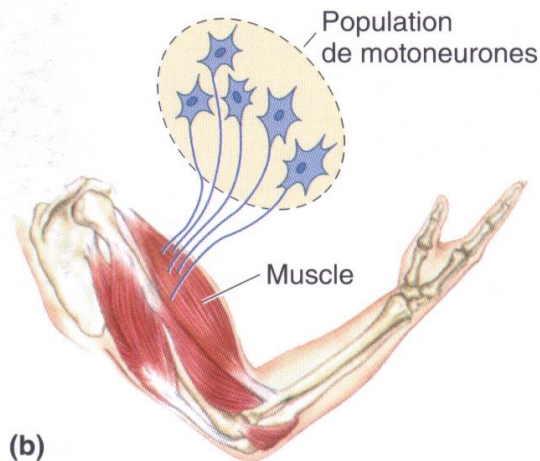
► il existe donc une répartition des motoneurones en rapport avec leurs fonctions



# Unité Motrice & Population de Motoneurones



(a)



(b)

Unité motrice =  
Motoneurone  $\alpha$  + Fibres musculaires innervées



Unité motrice  
rapide



Unité motrice  
lente

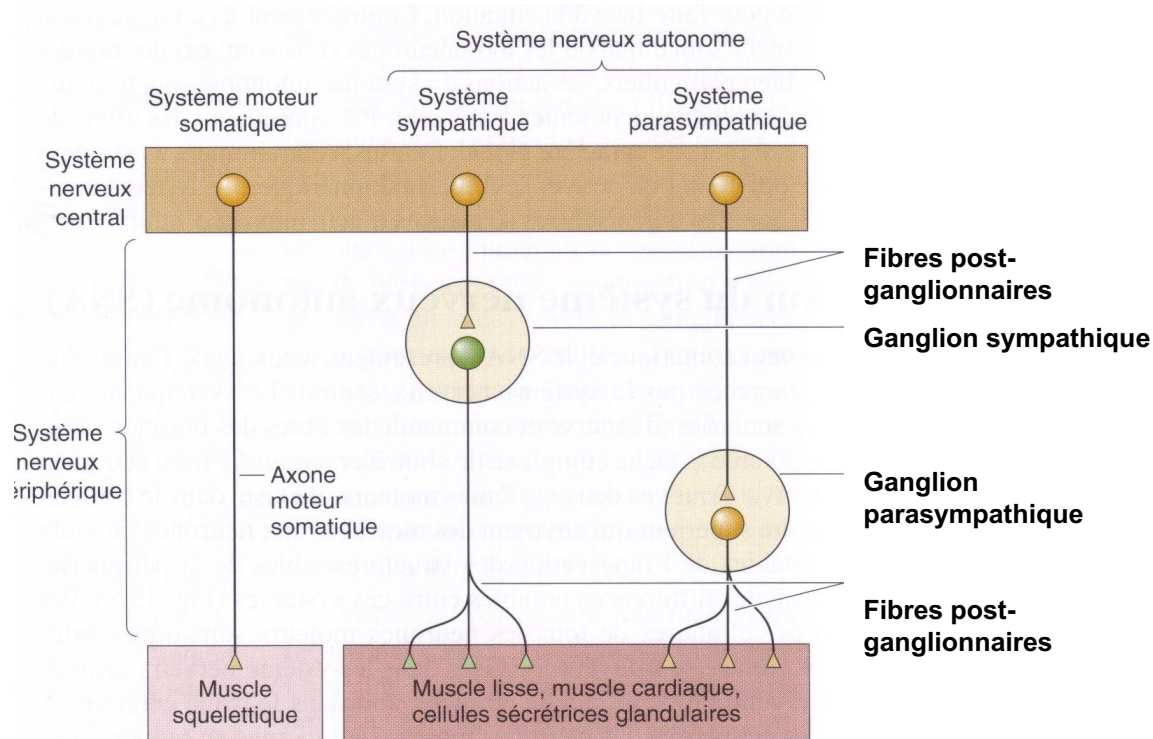
Fibre musculaire blanche  
Contraction rapide, forte  
mais fatigue vite

Fibre musculaire rouge  
Contraction lente, continue,  
sans fatigue

Population de motoneurones =  
Ensemble des motoneurones innervant 1 muscle

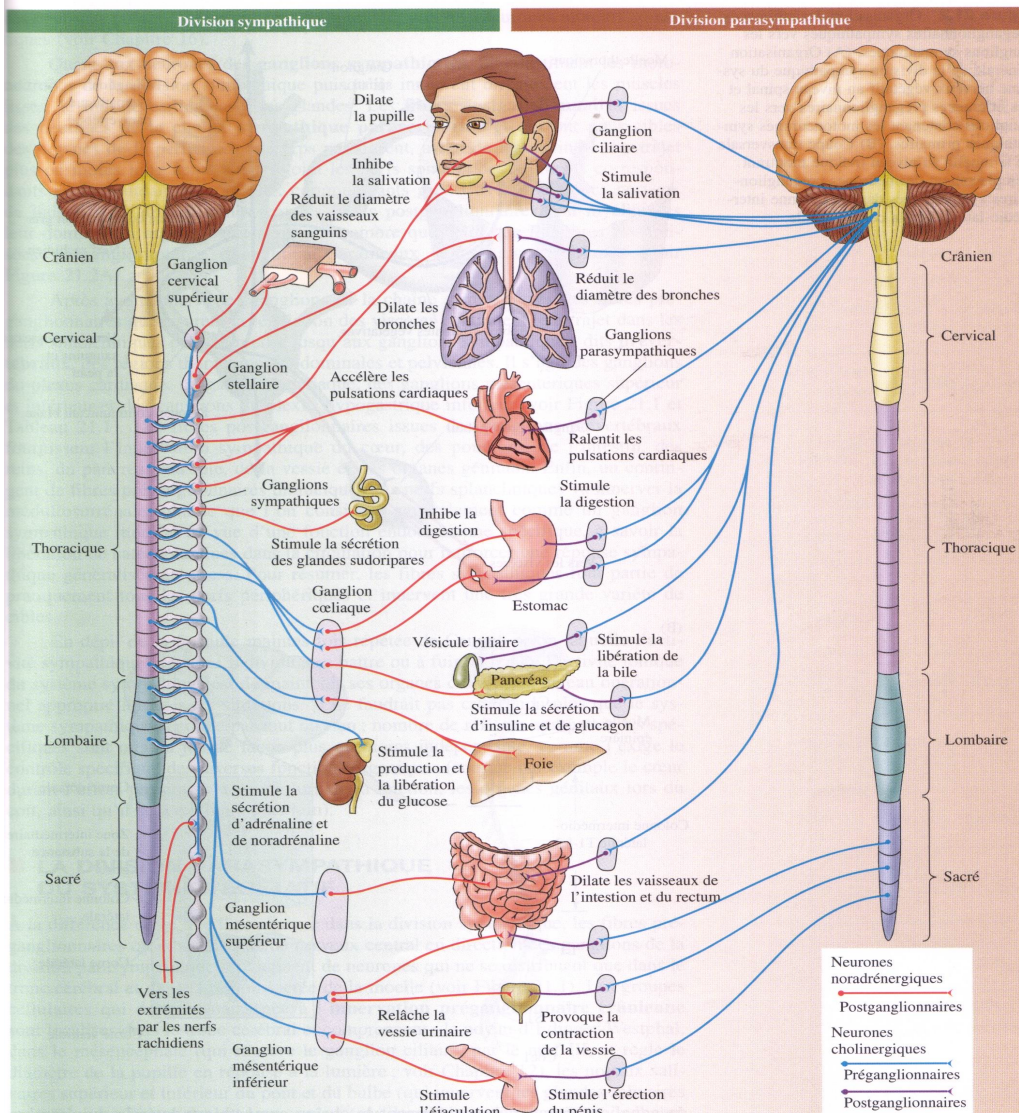
## 2. Système Nerveux Autonome

- Il est impliqué dans le contrôle des fonctions involontaires  
Ex: Respiration, digestion, vasodilatation(constriction), ...
- Il couvre quasiment toutes les régions du corps





# Organisation du SN autonome



- **Système sympathique (gauche)**

## Régions thoraciques & lombaires

- Mobilisation des ressources lors de situations particulières (ex: stress)

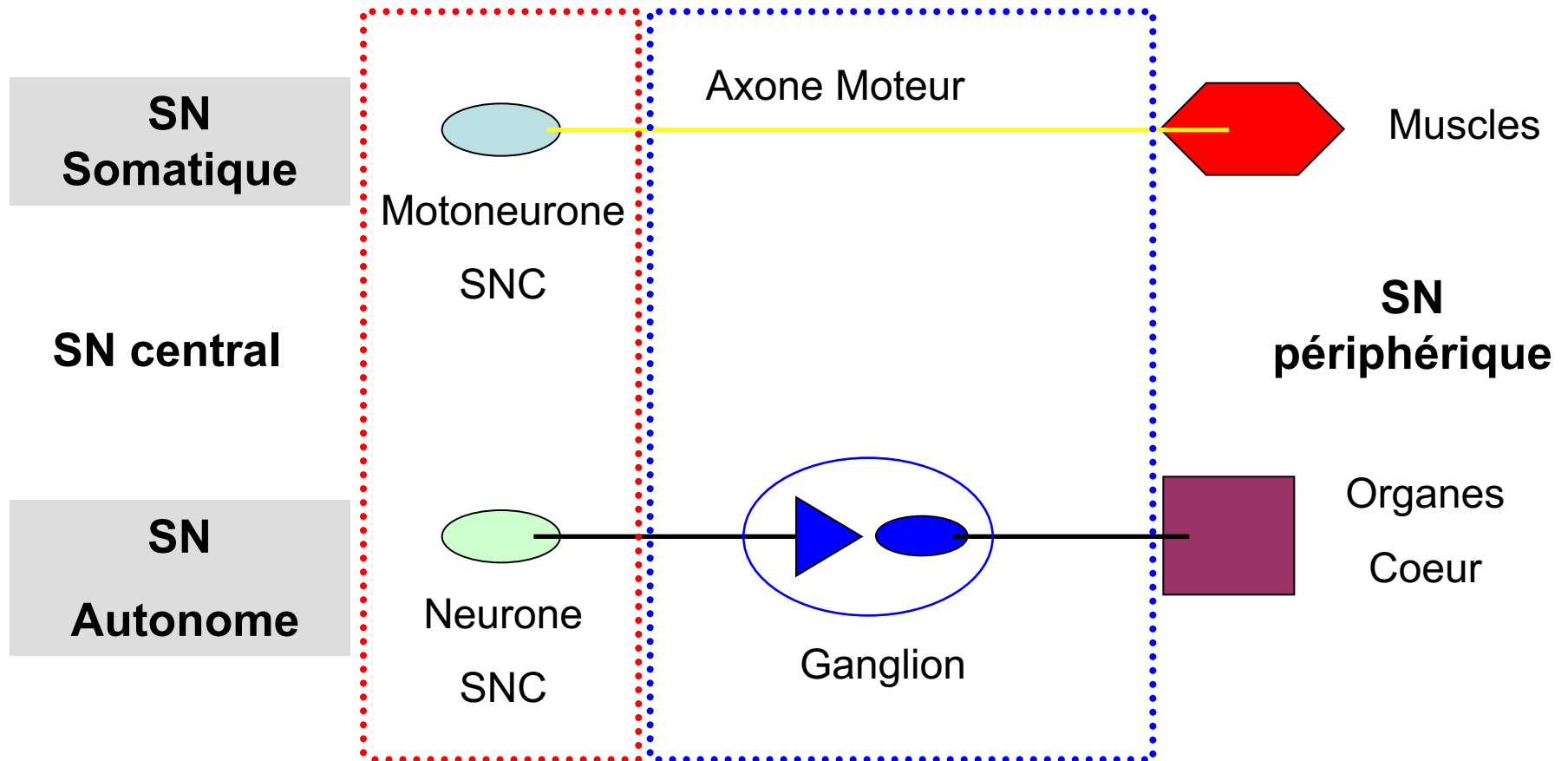
- **Système para-sympathique (droite)**

## Tronc cérébral & région sacré

- Restauration de l'énergie dépensée
- Retour à l'état de repos

# 3. Conclusion

2 grands systèmes fonctionnels :



# B. Classification anatomique

## SN Périphérique (SNP)



- Ganglions
- Nerfs crâniens (12 paires)
- Nerfs rachidiens (31 paires)  
+ ramifications



### Fonctions :

Relie le SNC au reste de l'organisme

Véhicule les informations sensibles  
ou afférentes (organes → SNC)

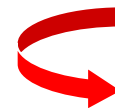
les informations motrices

ou efférentes (SNC → organes)

## SN Central (SNC)



- Cerveau
- Moelle épinière
- Cervelet

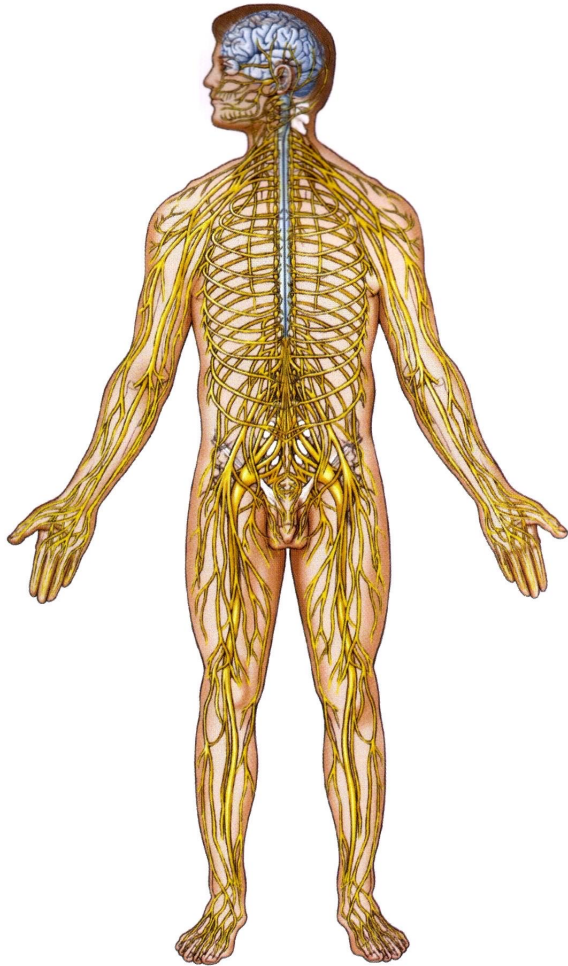


### Fonctions :

Reçoit et analyse les signaux  
corporels et environnementaux

Élabore puis déclenche des  
impulsions motrices assurant le bon  
fonctionnement de l'organisme et son  
adaptation à l'environnement

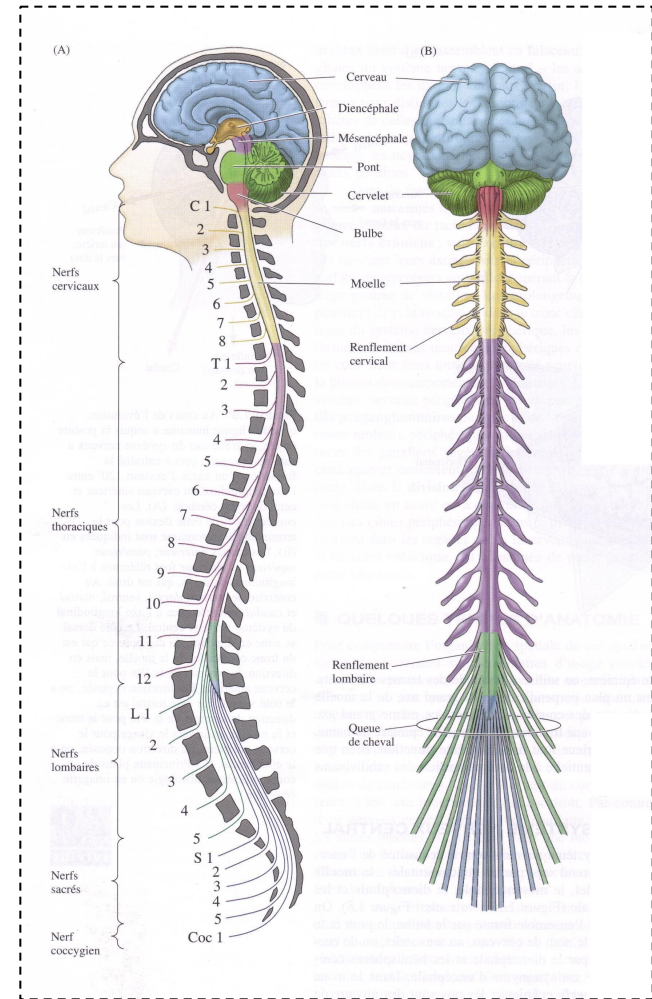
# Organisation du SN périphérique



Organisation segmentaire  
de la moelle épinière

4 grandes parties :

- Cervicale (C1 à C8)
- Thoracique (T1 à 12)
- Lombaire (L1 à L5)
- Sacrée (S1 à S5)
- + Nerf coccygien



Nerfs périphériques

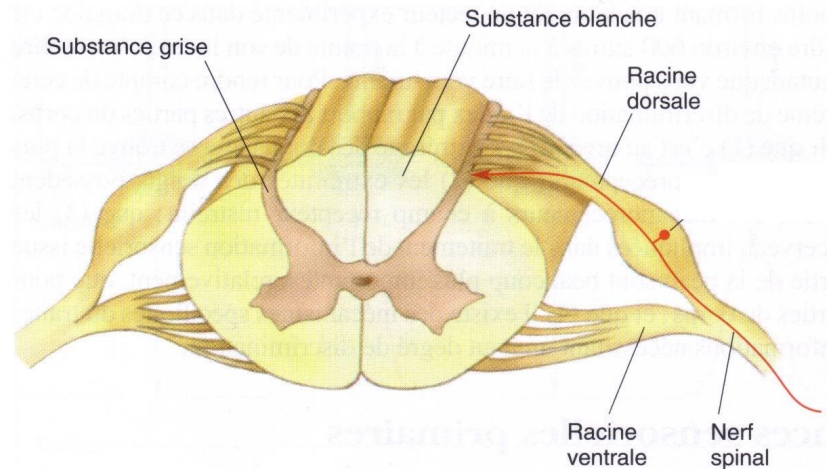
(en jaune)



# Nerfs rachidiens ou spinaux

Ils appartiennent au SN périphérique car ils ne sont pas contenus dans une capsule osseuse ( $\neq$  cerveau ou moelle).

Chaque nerf rachidien est formé d'une racine dorsale et ventrale



Système afférent : périphérie vers la moelle (sensitif)

→ Racines dorsales

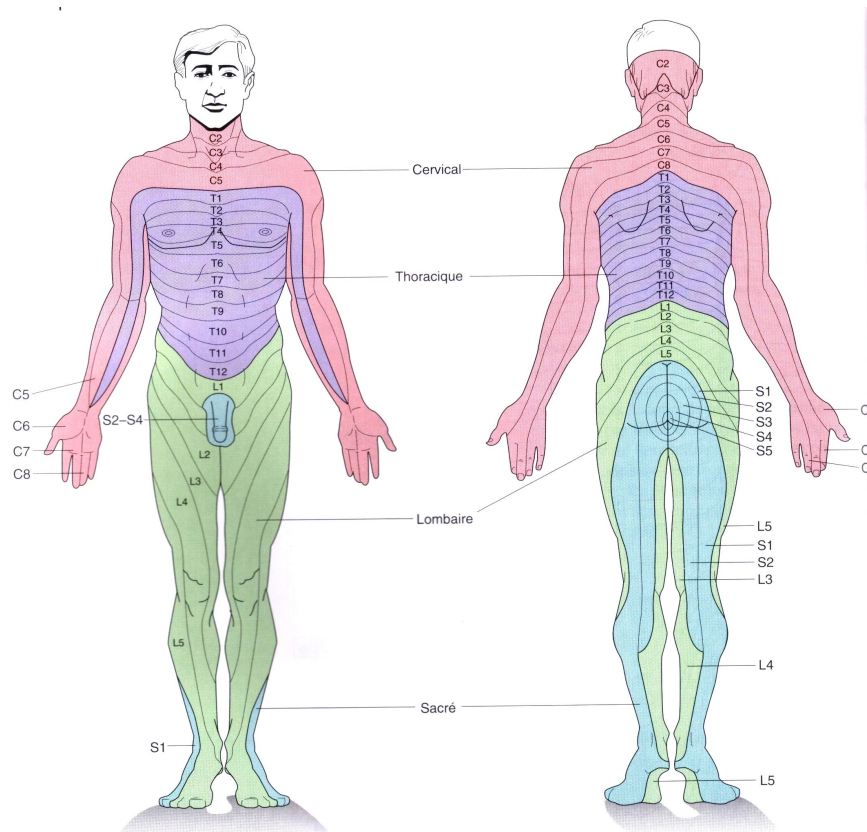
Système efférent : moelle vers la périphérie (moteur)

→ Racines ventrales

# Relation SN périphérique et système sensoriel

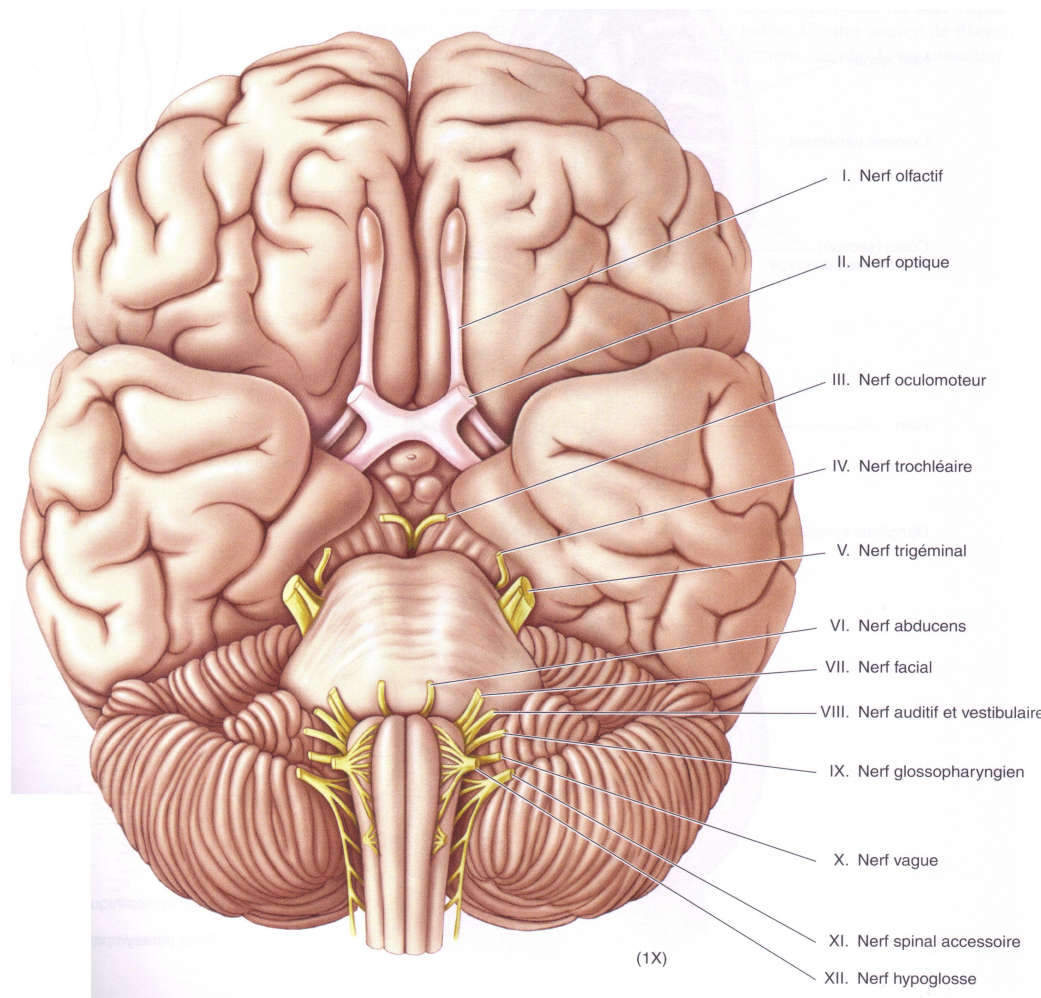
Organisation segmentaire des nerfs spinaux et celle de l'innervation sensorielle cutanée correspondent.

Région de la peau innervée par les racines dorsales d'un seul segment spinal est appelée dermatome.



Nbr de dermatomes =  
Nbr de segments spinaux





12 paires de nerfs crâniens

# Nerfs crâniens

| Numéro | Nom                          | Fonction                              |
|--------|------------------------------|---------------------------------------|
| I      | Nerf Olfactif                | Sensitif (odorat)                     |
| II     | Nerf Optique                 | Sensitif (vision)                     |
| III    | Nerf Oculomoteur             | Moteur (somatique)                    |
| IV     | Nerf Trochléaire             | Moteur (somatique)                    |
| V      | Nerf Trijumeau               | Sensitif et Moteur (somatique)        |
| VI     | Nerf Abducens                | Moteur (somatique)                    |
| VII    | Nerf Facial                  | Moteur (somatique) et Sensitif (goût) |
| VIII   | Nerf Vestibulaire et Auditif | Sensitif (ouïe et équilibre)          |
| IX     | Nerf Glossopharyngien        | Sensitif et Moteur (somatique)        |
| X      | Nerf Vague                   | Sensitif et Moteur (viscéral)         |
| XI     | Nerf Spinal Accessoire       | Moteur (somatique)                    |
| XII    | Nerf Hypoglosse              | Moteur (somatique)                    |

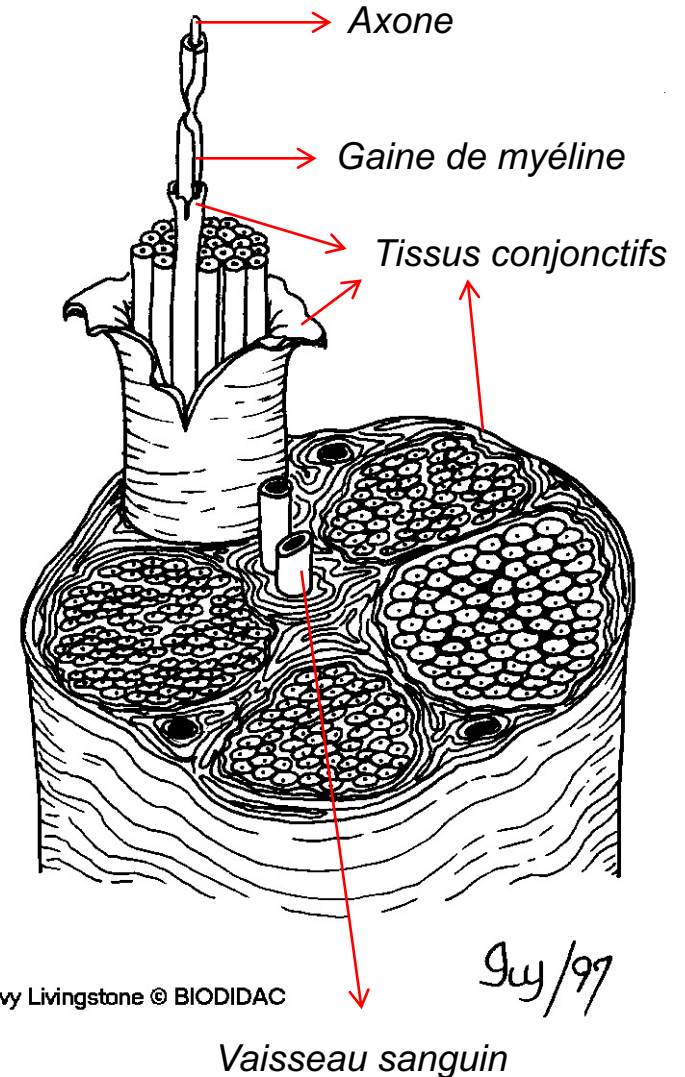
# Les Nerfs

Les nerfs sont formés d'axones

- de neurones moteurs
- de neurones sensitifs

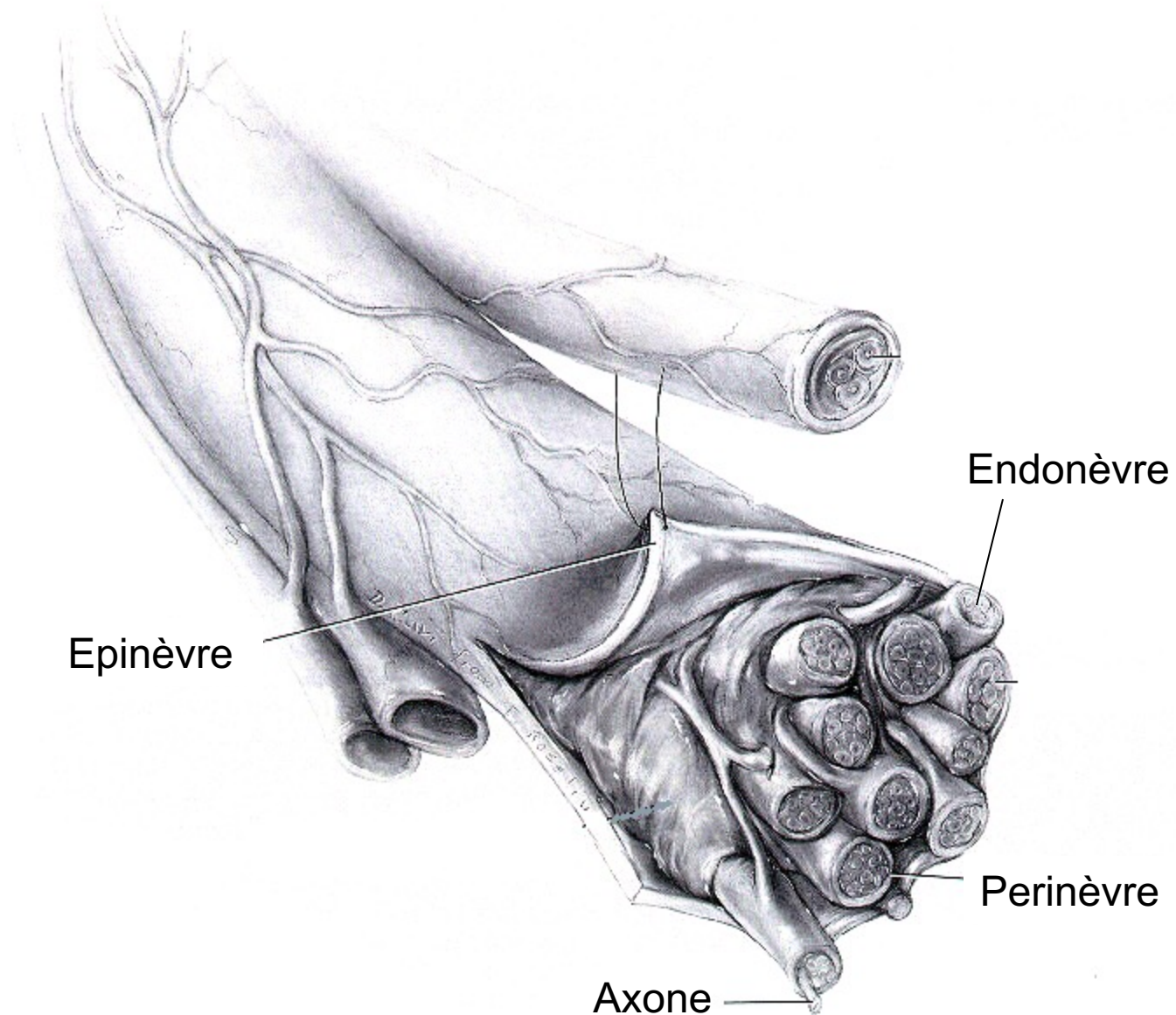
(certains ne contiennent que des fibres sensibles)

Ex: Nerf rachidien contient  
environ 600 000 fibres nerveuses



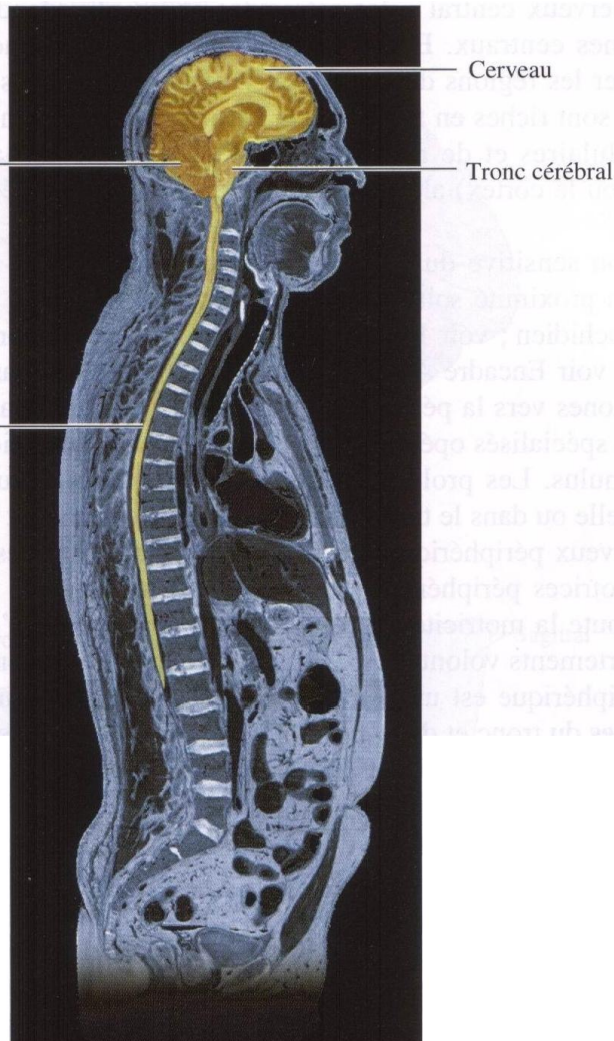
Ivy Livingstone © BIODIDAC

# Les tissus conjonctifs nerveux





# SN central (ou névraxe)



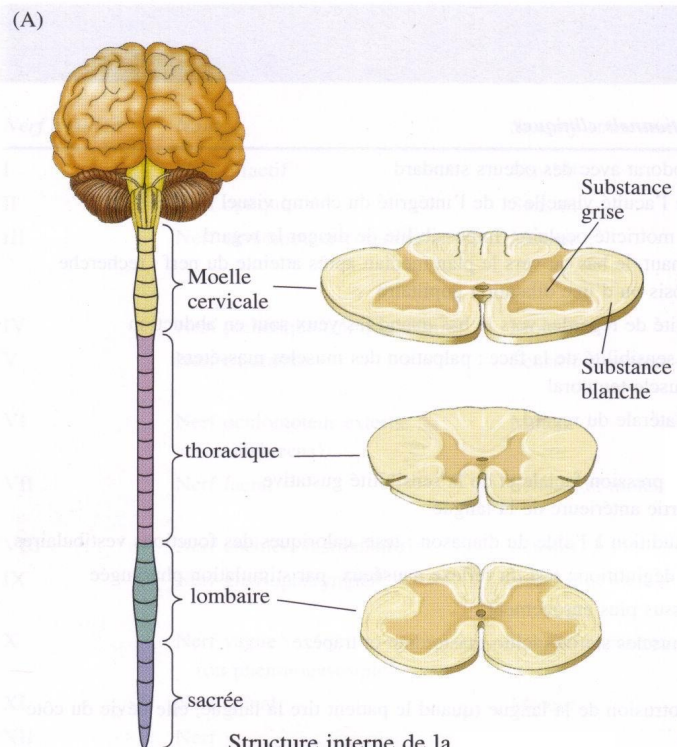
Composé de 7 parties fondamentales :

- La Moelle épinière
  - Le bulbe
  - Le pont
  - Le mésencéphale
  - Le diencéphale
  - Les hémisphères cérébraux
  - Le cervelet
- Tronc cérébral
- Cerveau



# A. La moelle épinière

*(voie principale de transfert de l'information)*



Structure interne de la moelle. (A) Coupes transversales à trois niveaux différents montrant la disposition caractéristique de la substance blanche et de la substance grise dans la moelle cervicale, thoracique et lombaire.

## Anatomie interne :

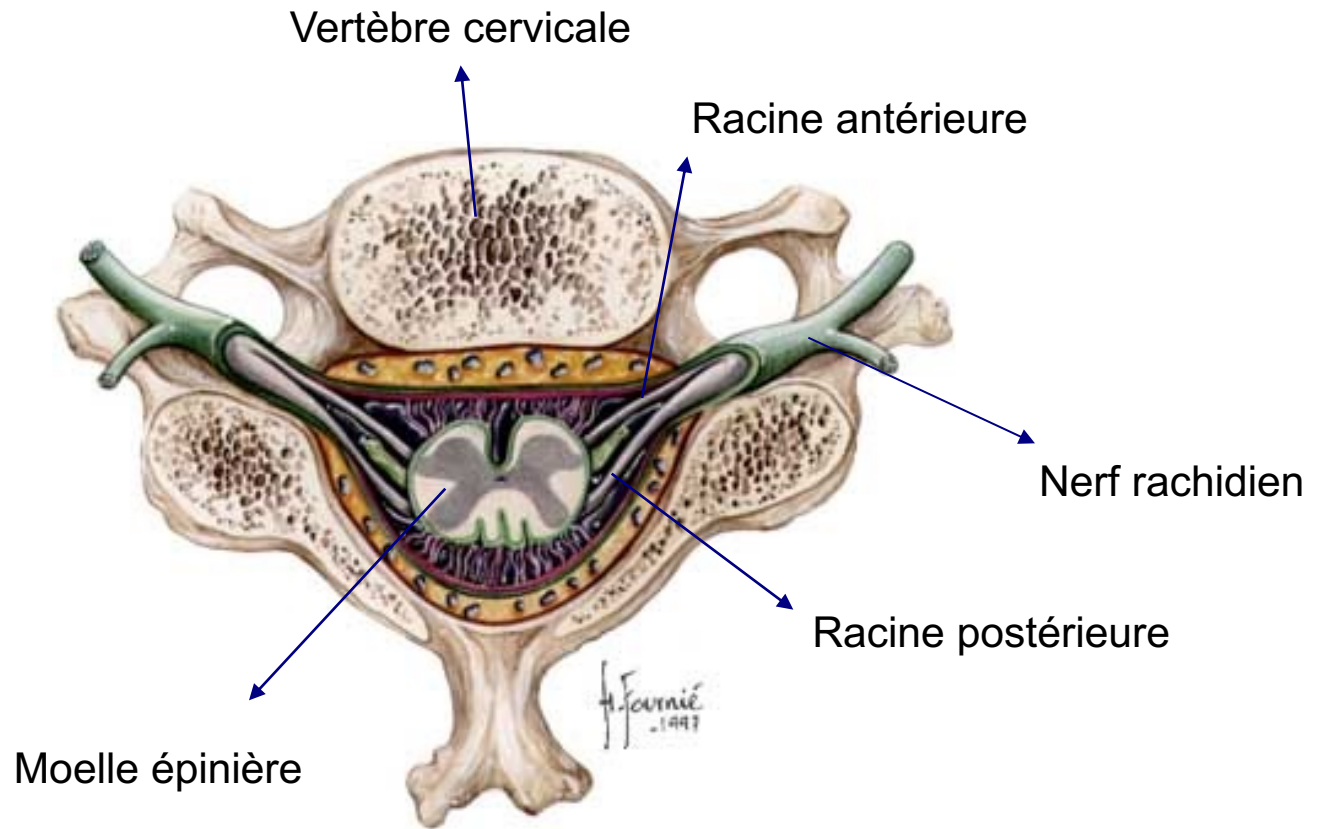
→ Substance grise (au centre) :

- cornes dorsales (ou postérieures)
- cornes ventrales/latérales (ou antérieures)

→ Substance blanche (en périphérie) :

- colonnes dorsales, latérales et ventrales

# Anatomie de la moelle épinière



# Différenciation de la moelle épinière

## **Substance grise**

Cellules de la corne dorsale reçoivent l'information sensorielle provenant des fibres des racines dorsales (voies afférentes).

Cellules de la corne ventrale projettent leurs axones dans les racines ventrales qui innervent les muscles (voies efférentes).

Zone intermédiaire contient des interneurons qui structurent les réponses motrices en réponse aux informations sensorielles et aux ordres venus du cerveau.

## **Substance blanche**

Elle constitue une « super autoroute » qui assure la transmission à grande vitesse provenant du même côté du corps jusqu'aux noyaux de la région bulbaire.

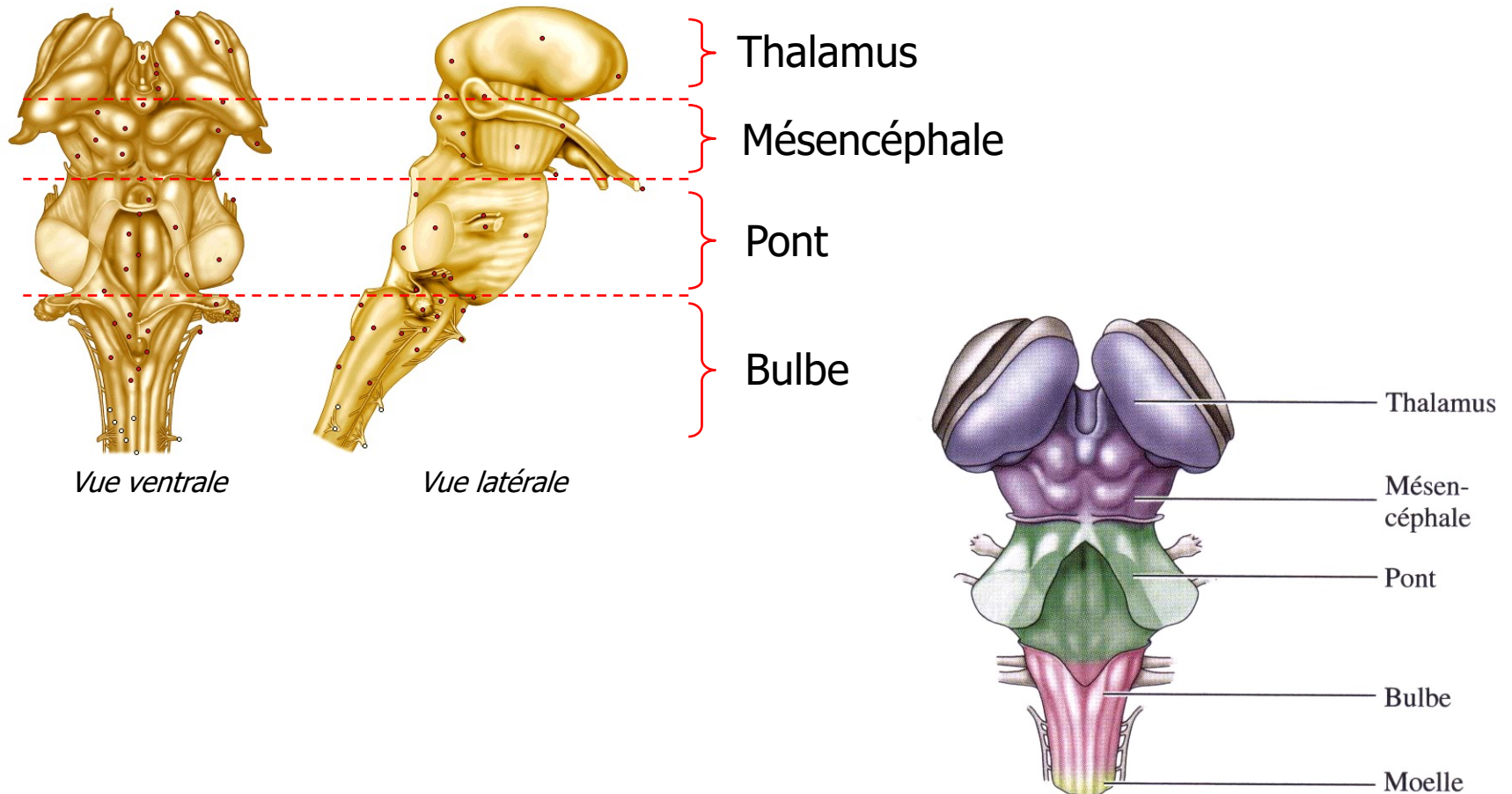
## **Conclusion :**

Voie principale de l'information transmise par la peau, les articulations et les muscles au cerveau et vice versa.

+ réalise 1<sup>ère</sup> analyse de l'info sensorielle (Neurones subs. grise), coordination des mvts, réflexes simples.

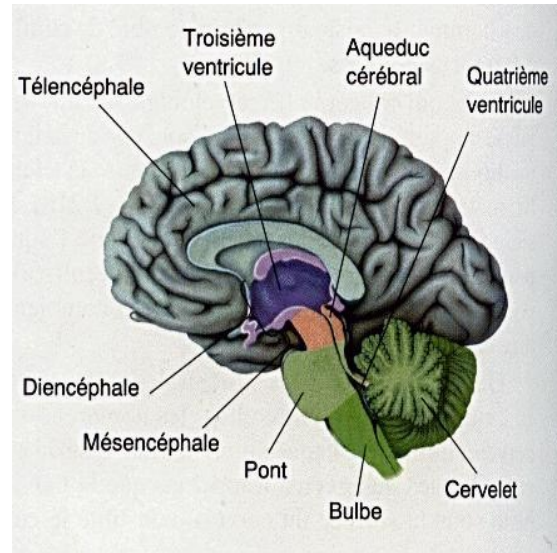
# B. Le tronc cérébral

Le tronc cérébral est constitué de 4 grandes parties :



# Le tronc cérébral

Situé au dessus de la moelle épinière, en dessous du cerveau et en avant du cervelet



Il est composé d'un réseau de fibres et de cellules qui permettent en partie de transmettre les informations du cerveau vers la moelle et le cervelet et vice-versa

Joue aussi un rôle dans la régulation de certaines fonctions vitales :

respiration, conscience,  $t^{\circ}\text{C}$ .

Partie la plus primitive du cerveau de mammifères mais aussi la plus vitale.

% Survie Lésion cerveau ou cervelet bien >>> Lésion tronc cérébral.

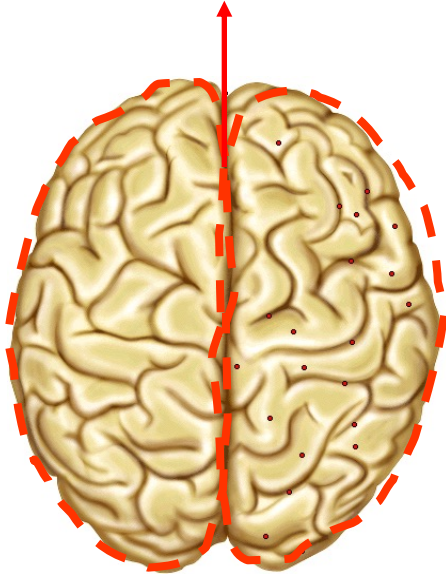


# C. Le cerveau

Il est constitué de **deux hémisphères** cérébraux, d'aspect plissé dont la **substance blanche**, interne, est recouverte d'un cortex cérébral gris, d'épaisseur variable.

Trois sillons plus accentués (scissure de Sylvius, sillon de Rolando, sillon perpendiculaire) divisent chaque hémisphère en **quatre lobes** : frontal, temporal, pariétal et occipital.

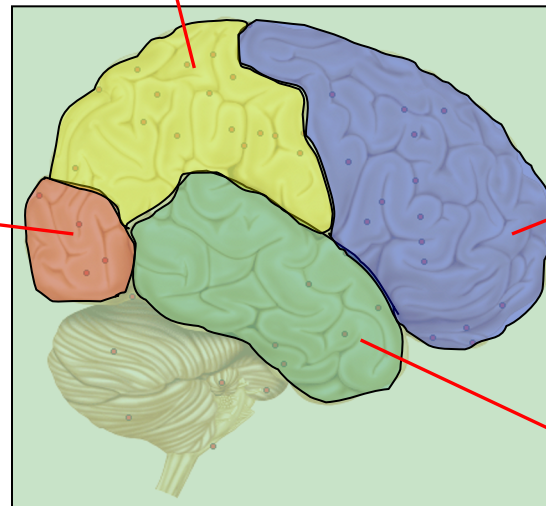
*Scissure inter-hémisphérique  
ou médiane*



*Vue supérieure*

*Lobe Pariétal*

*Lobe Occipital*



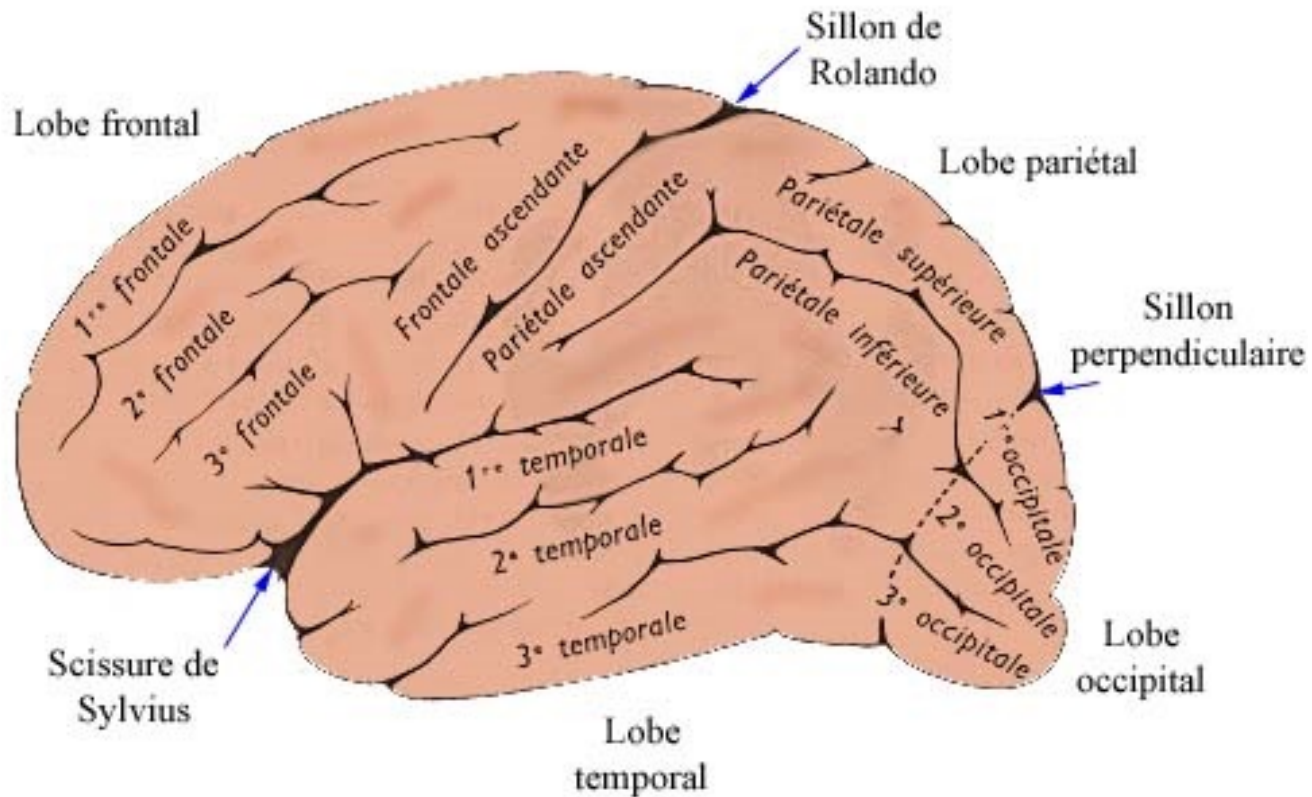
*Lobe Frontal*

*Lobe Temporal*

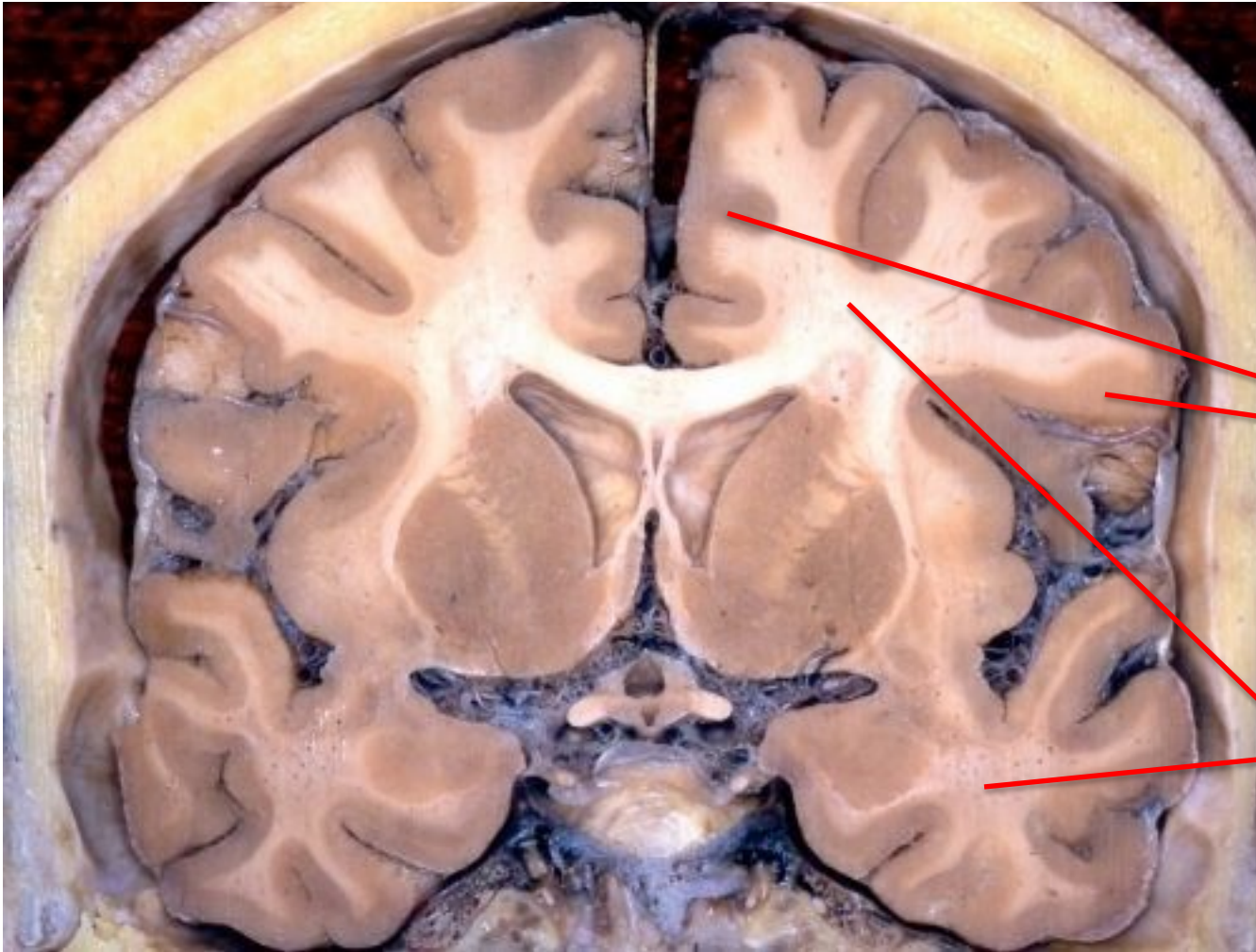
*Vue latérale droite*

# Lobes et Circonvolutions

## Lobes et circonvolutions de l'hémisphère cérébral gauche



# Anatomie cérébrale



Substance grise

Substance blanche

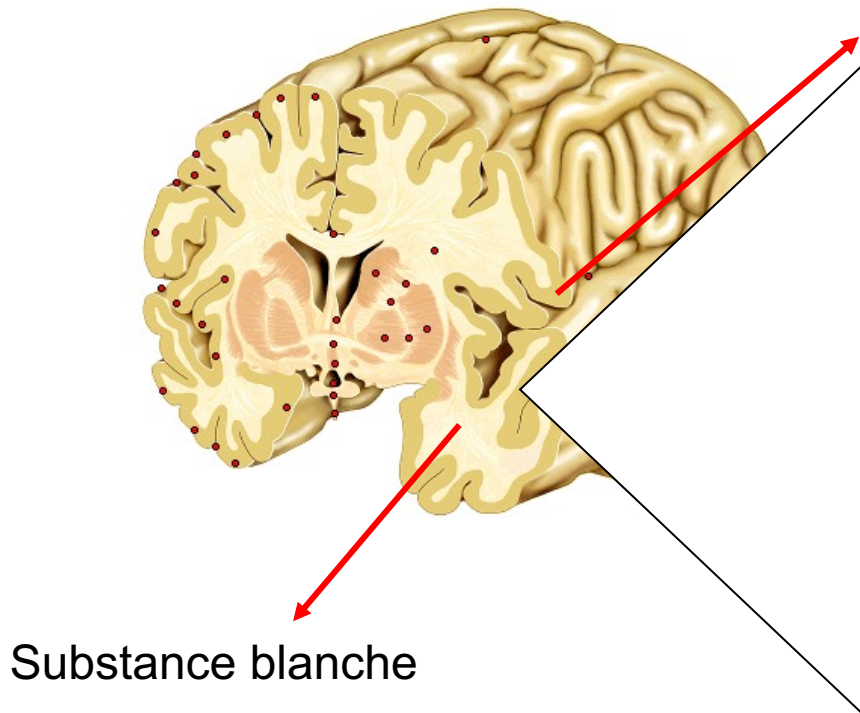


# Cortex cérébral

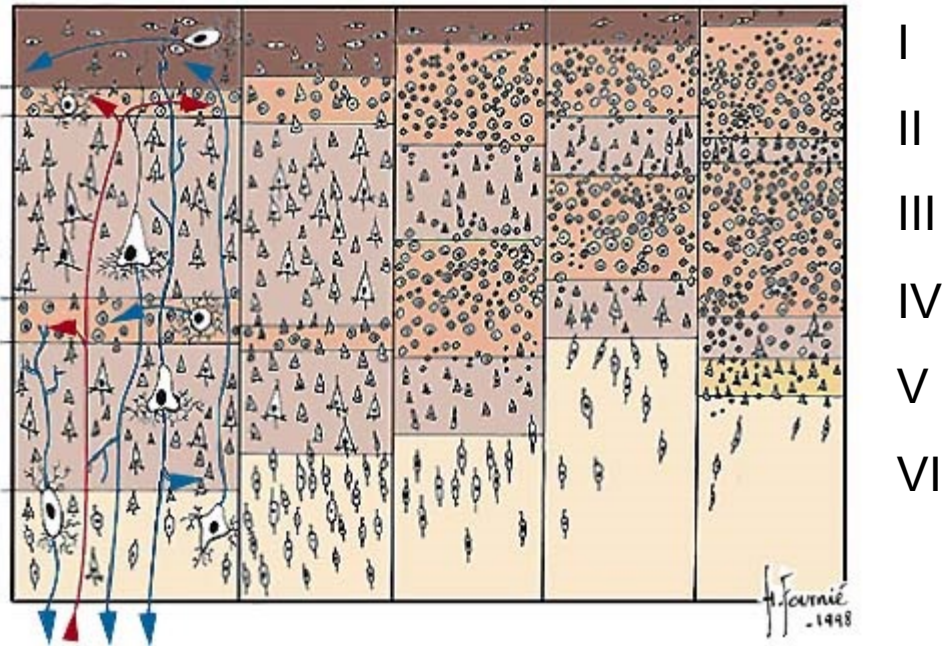
**Cortex** (« écorce » lat.) : ensemble de neurones qui forment une mince couche à la surface du cerveau.

Constitué de 6 couches :

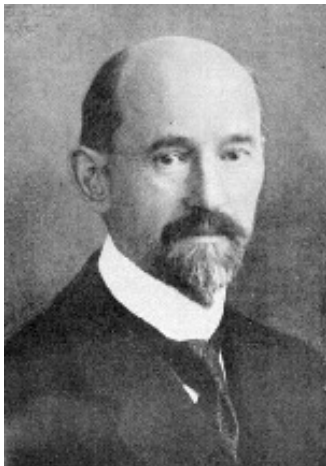
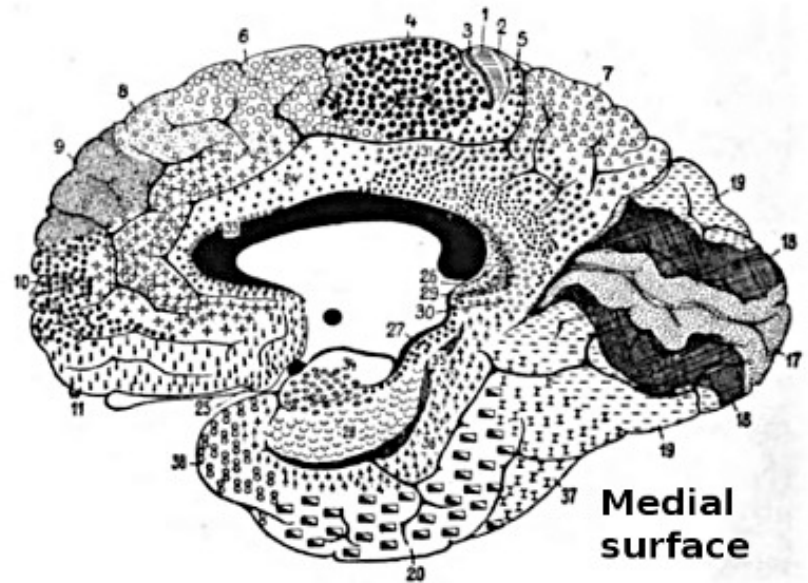
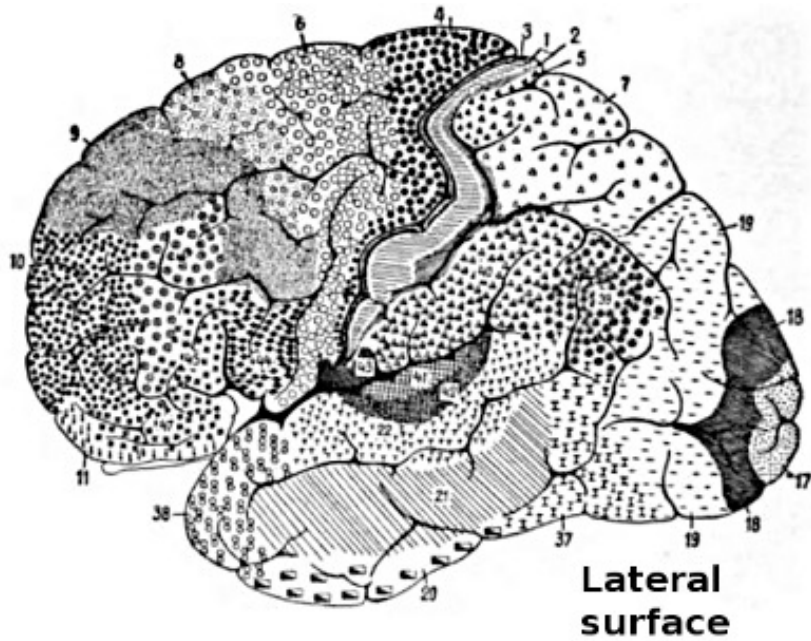
- I. Couche moléculaire (fibres: axones et dendrites)
- II. Couche granulaire externe (Neurones granulaires) : couche réceptrice
- III. Couche pyramidale externe (Cellules pyramidales) : couche effectrice
- IV. Couche granulaire interne : couche réceptrice
- V. Couche pyramidale interne : couche effectrice
- VI. Couche fusiforme (polymorphe)



Substance grise (cortex cérébral)

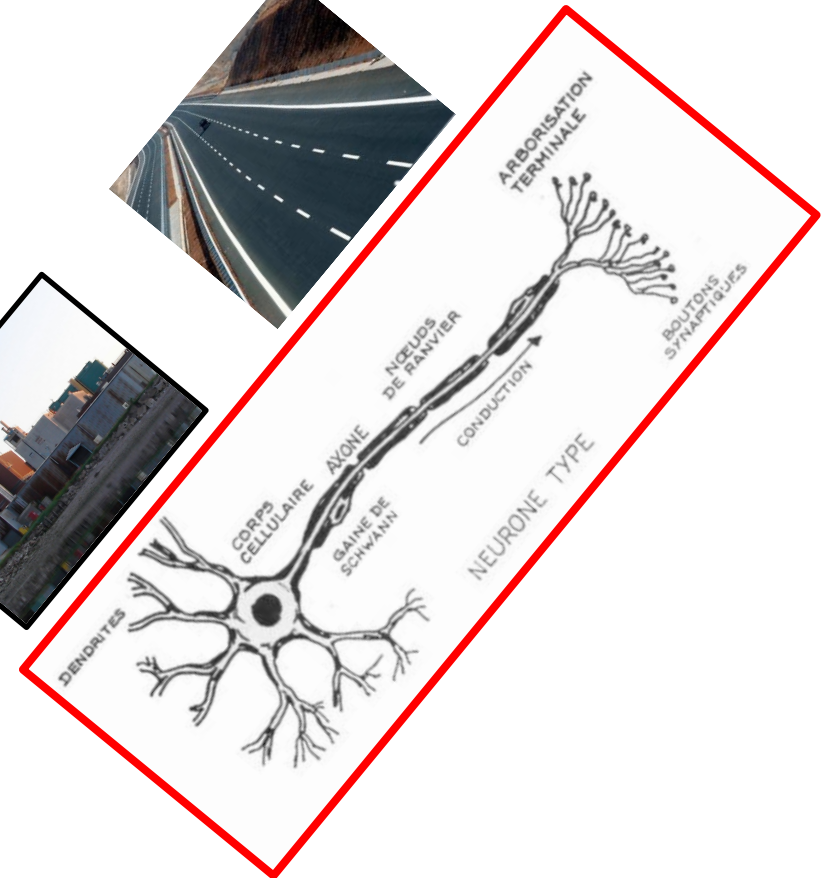
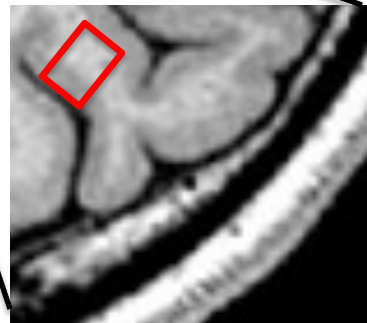
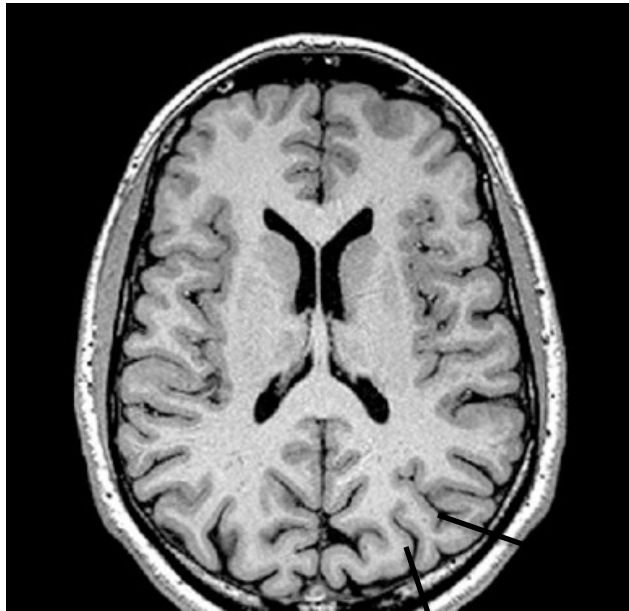


# Classification cytoarchitectonique

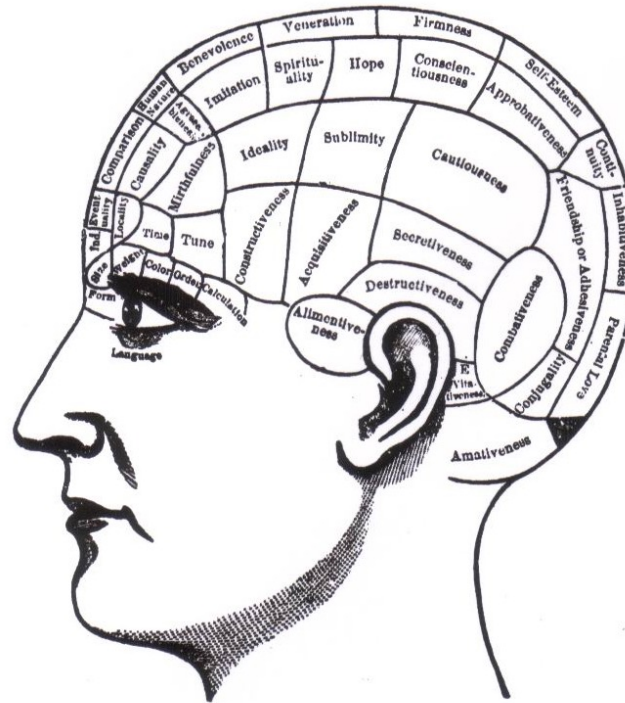




# Substance grise/blanche



# Relation structure - fonction



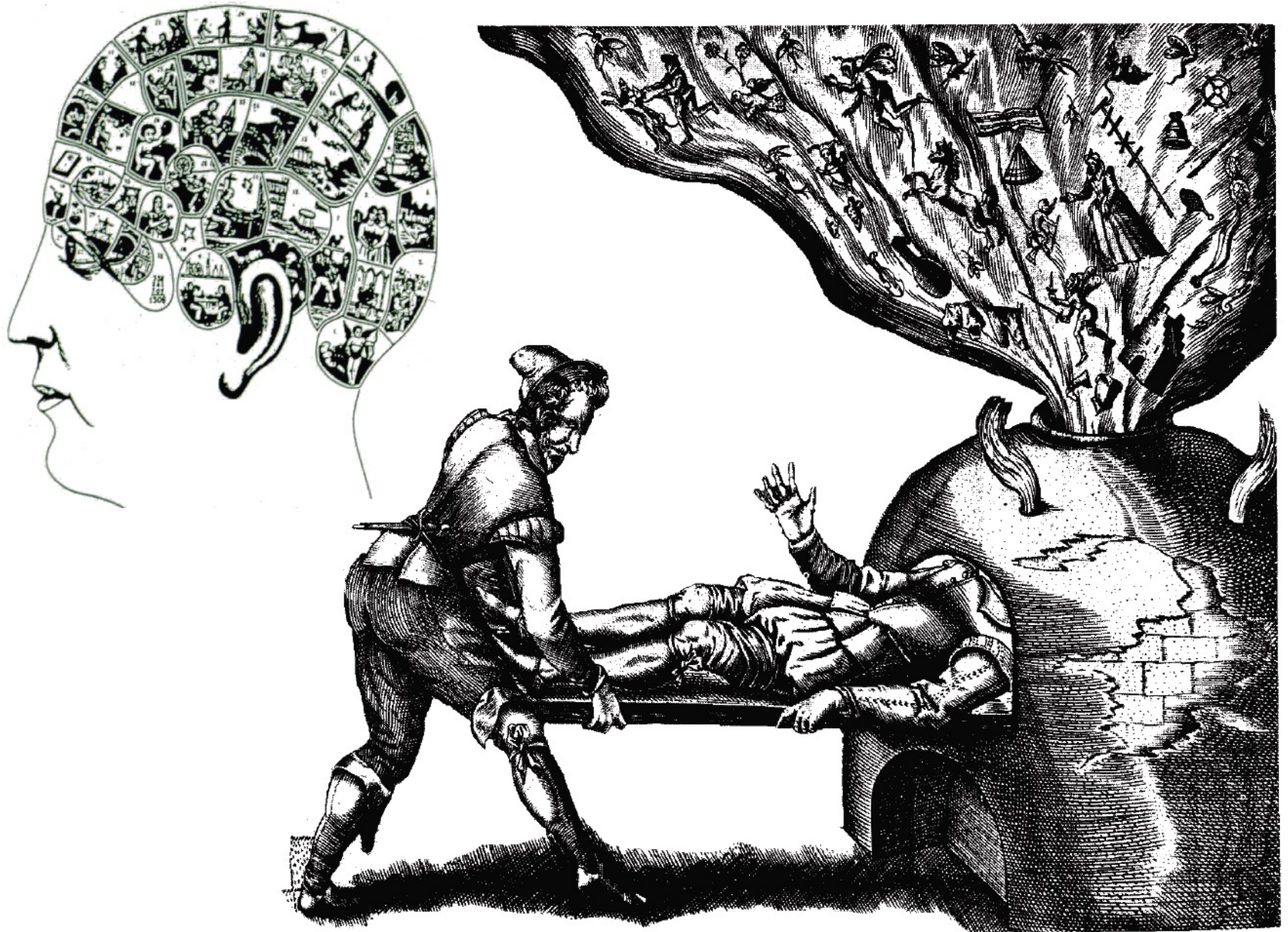
*F. Gall. 1809*

Correspondance entre les bosses du crâne et les circonvolutions cérébrales

Traits de caractère en fonction de la forme de la tête!

Phrénologie

# Relation structure - fonction

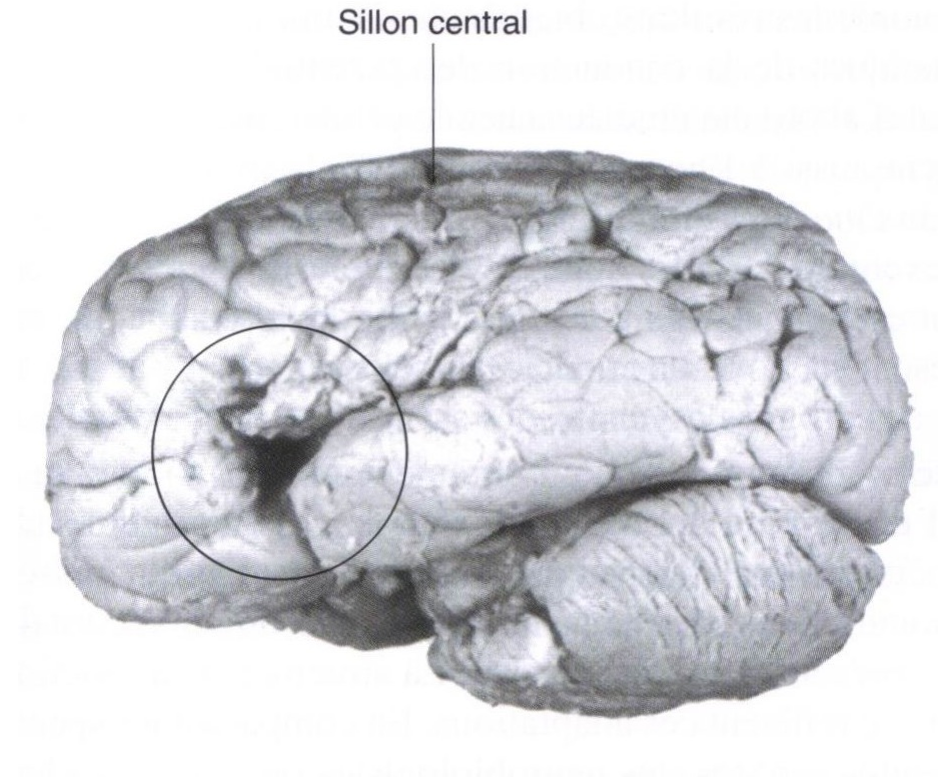




# Relation structure - fonction



*Broca (1824-1880)*



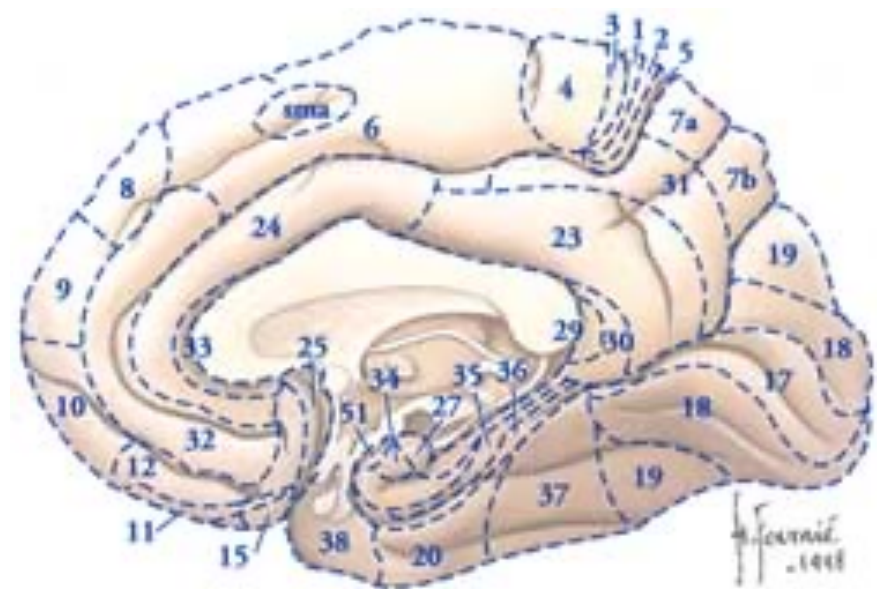
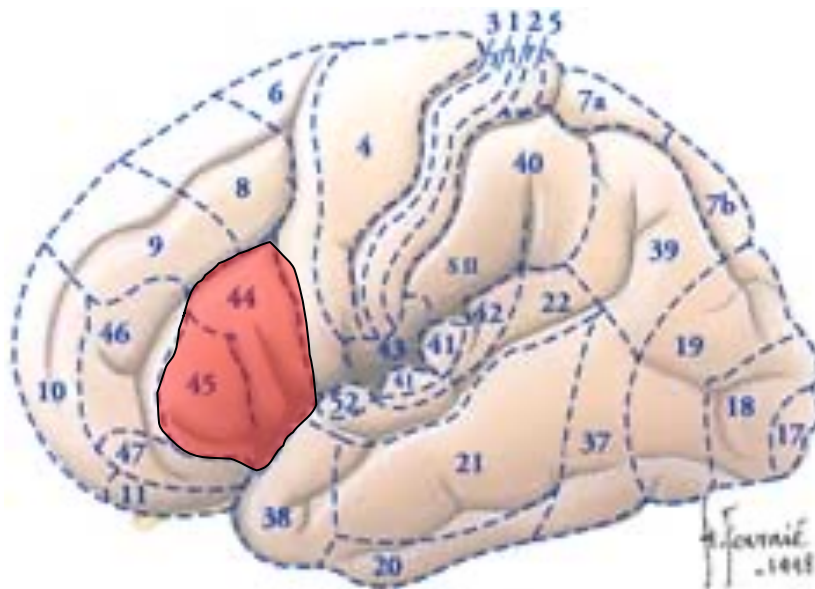
*Lésion frontale gauche*

Travaux en 1861 sur cerveau d'un patient qui comprenait les mots  
mais ne pouvait pas parler.

Zone du Langage (Aires 44-45)

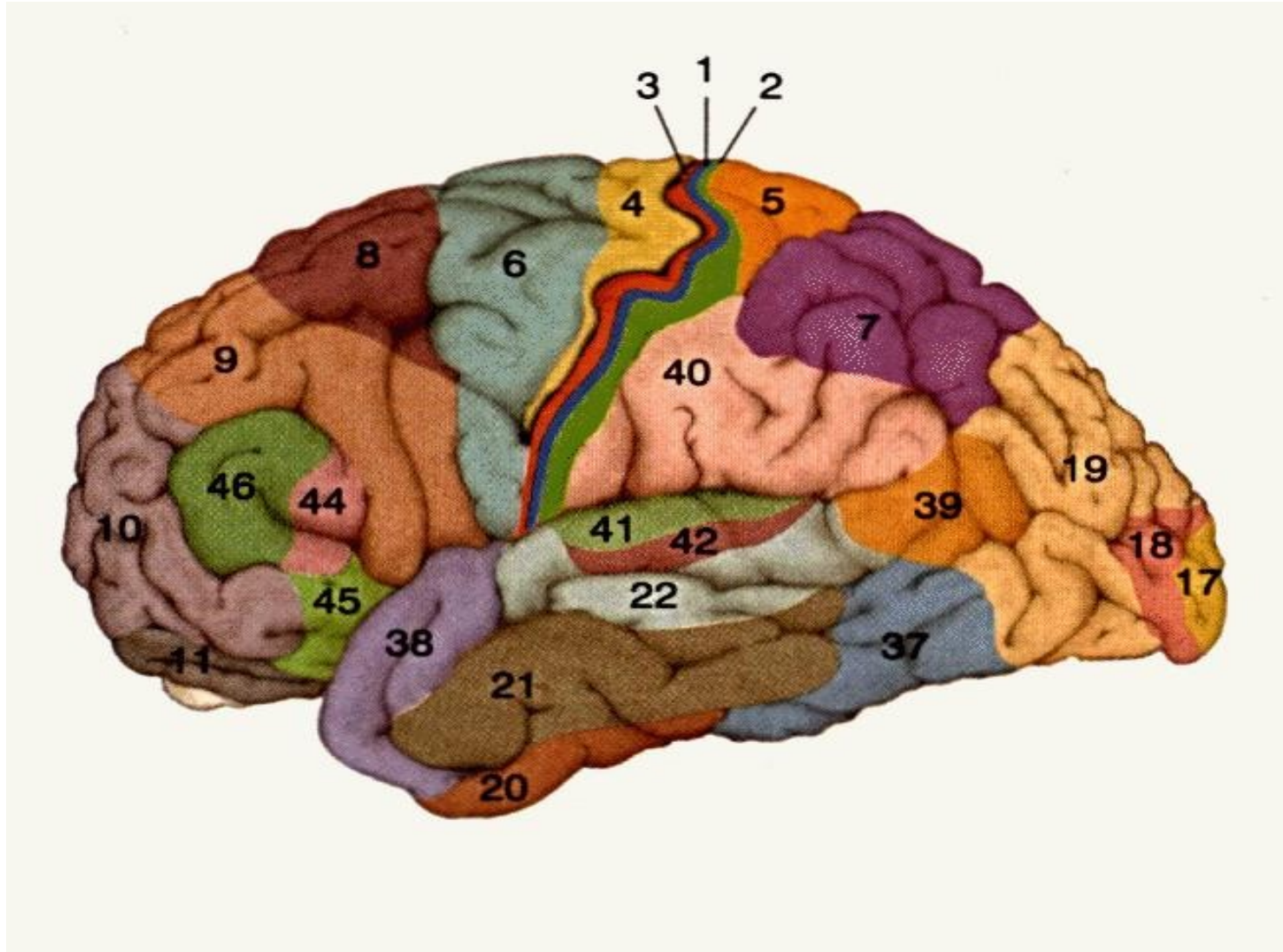
# Relation structure - fonction

| <u>Aires</u>   | <u>Fonctions</u>               |
|----------------|--------------------------------|
| 17-18-19       | Vision                         |
| 6-4<br>1-2-3   | Motricité<br>Sensori-motricité |
| 41-42          | Auditive                       |
| 44-45<br>39-40 | Langage                        |





# Aires de Brodman



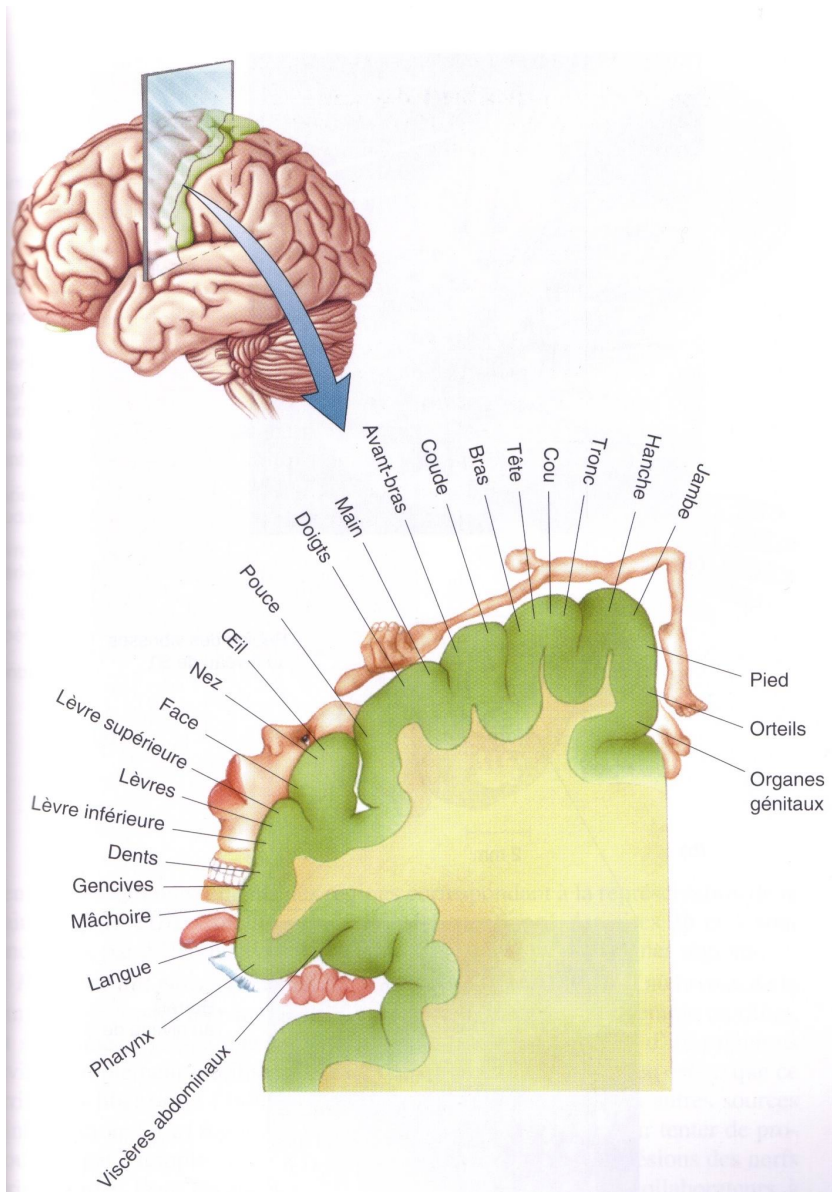
# Somatotopie corticales des aires sensorielles

Coupe frontale du cortex somatosensoriel.

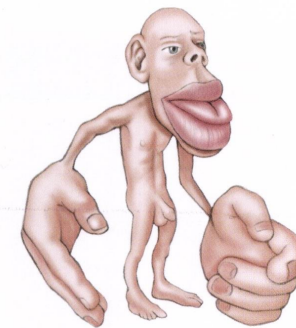
(Aires 1,2,3)

- Relation fonctionnelle entre les neurones de chaque zone cérébrale et les différentes parties du corps
- Distribution inhomogène de l'information sensorielle des différentes parties du corps

Info sensorielle doigt >> coude

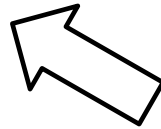
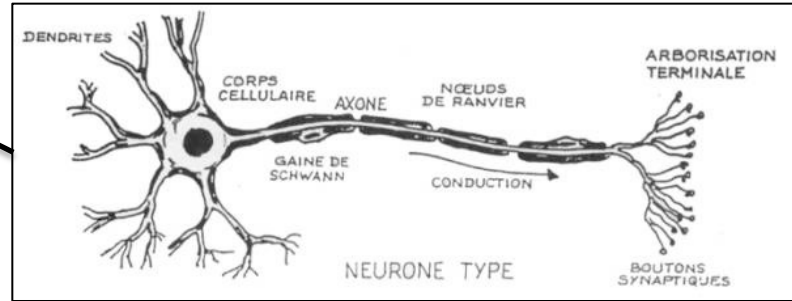
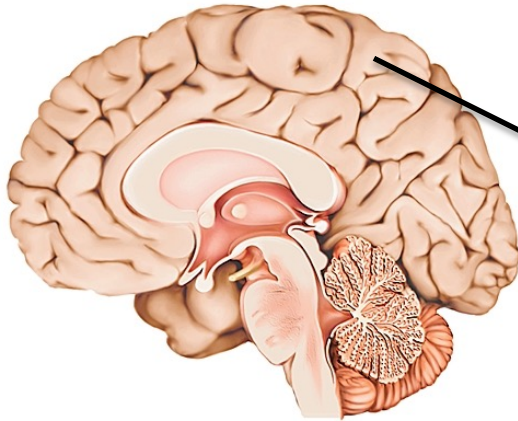


Penfield et Rasmussen, 1952



Homunculus

# 1.b Fonctionnement métabolique



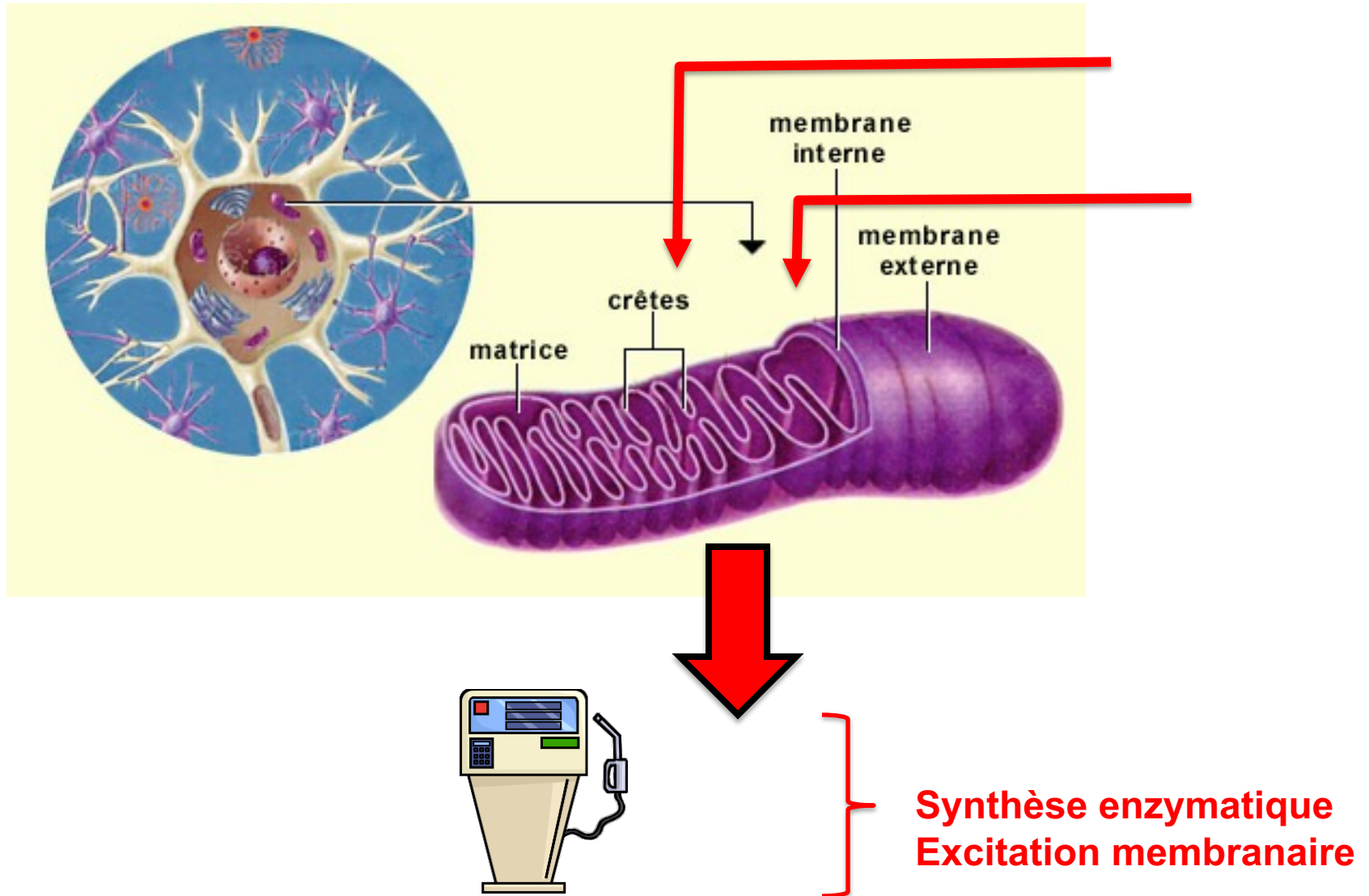
?



Stock 10min, conso : 60% au repos !

Conso : 20% au repos vs  
2% poids du corps

# 1.b Fonctionnement métabolique

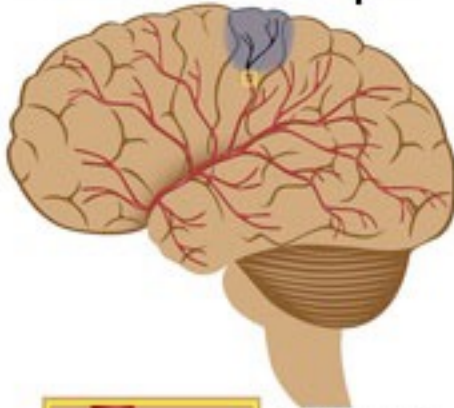




# 1.b Fonctionnement métabolique

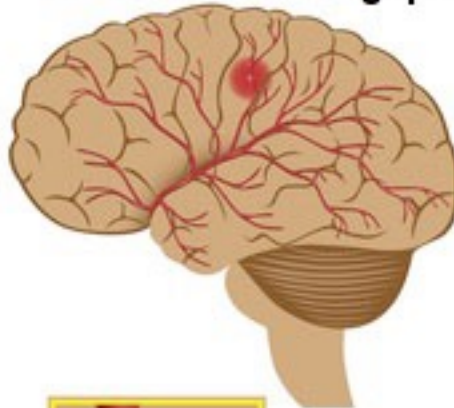
## AVC: accident vasculaire cérébral

### Accident ischémique



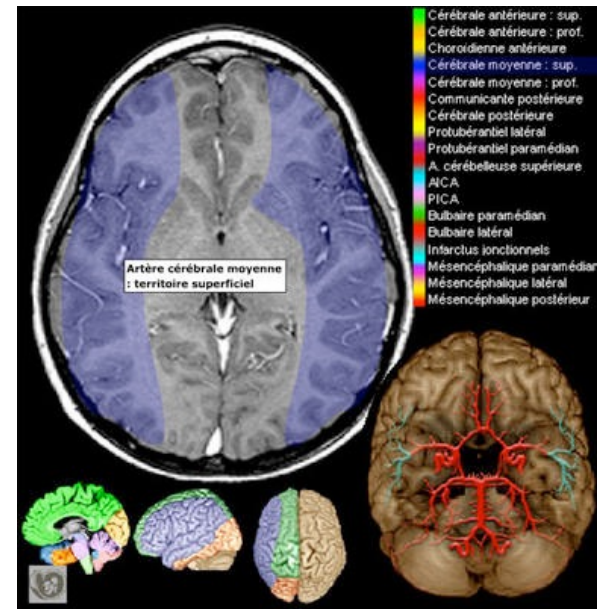
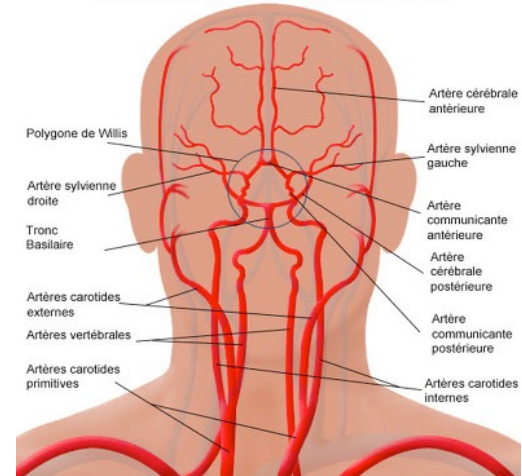
Vaisseaux bouchés, interruption du flux sanguin dans la zone affectée

### Accident hémorragique

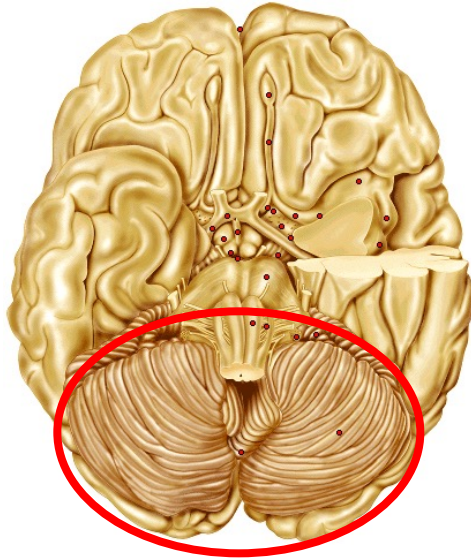


Rupture des vaisseaux, fuites de sang

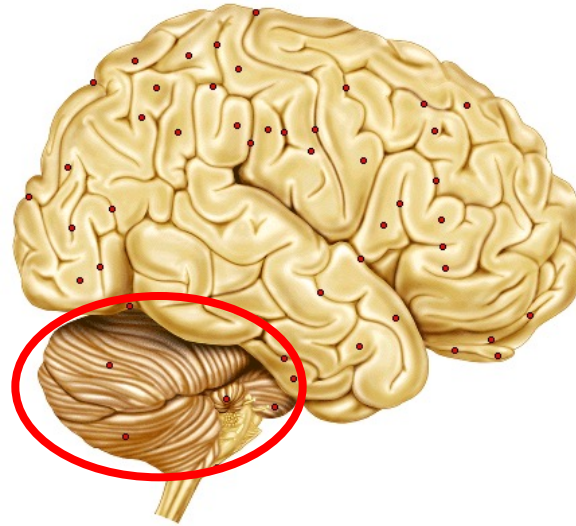
Circulation artérielle cervicale et cérébrale



# D. Le cervelet



*Vue inférieure*



*Vue latérale*

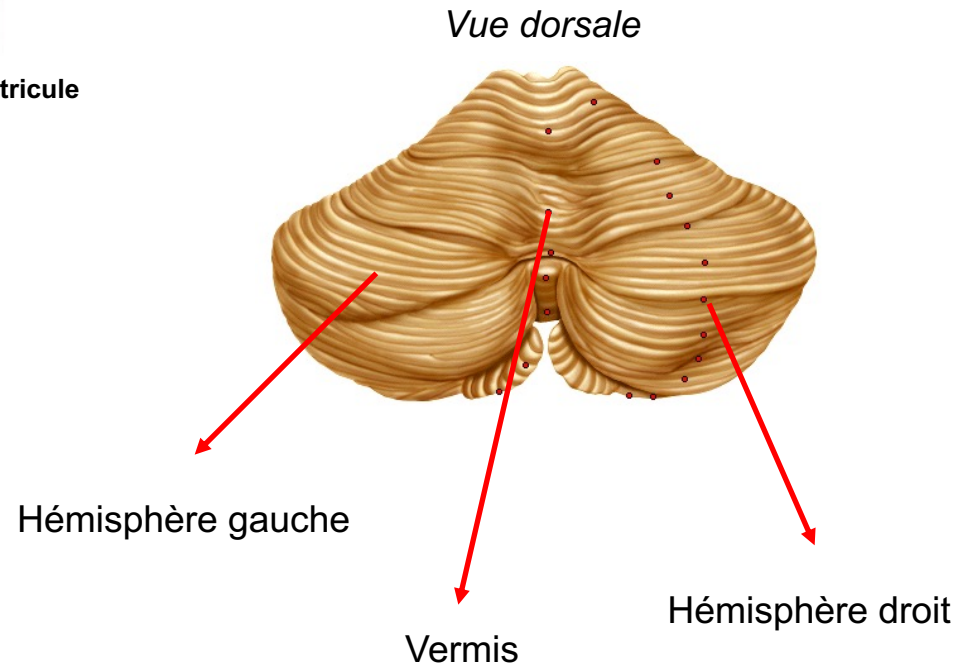
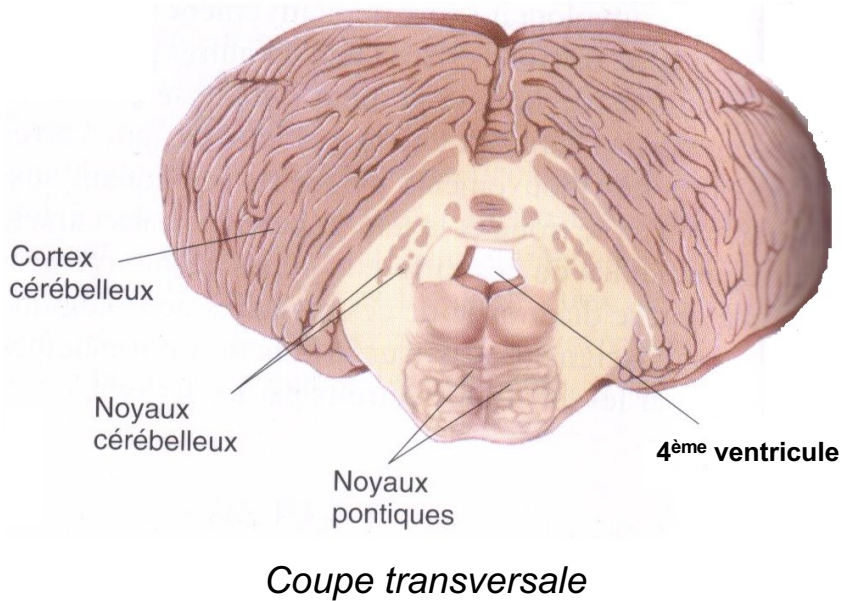
Il est situé en dessous du cerveau et en arrière du tronc cérébral

Il représente 1/10 du volume total du cerveau

Il contient 50% du total des neurones de l'encéphale

# Le cervelet

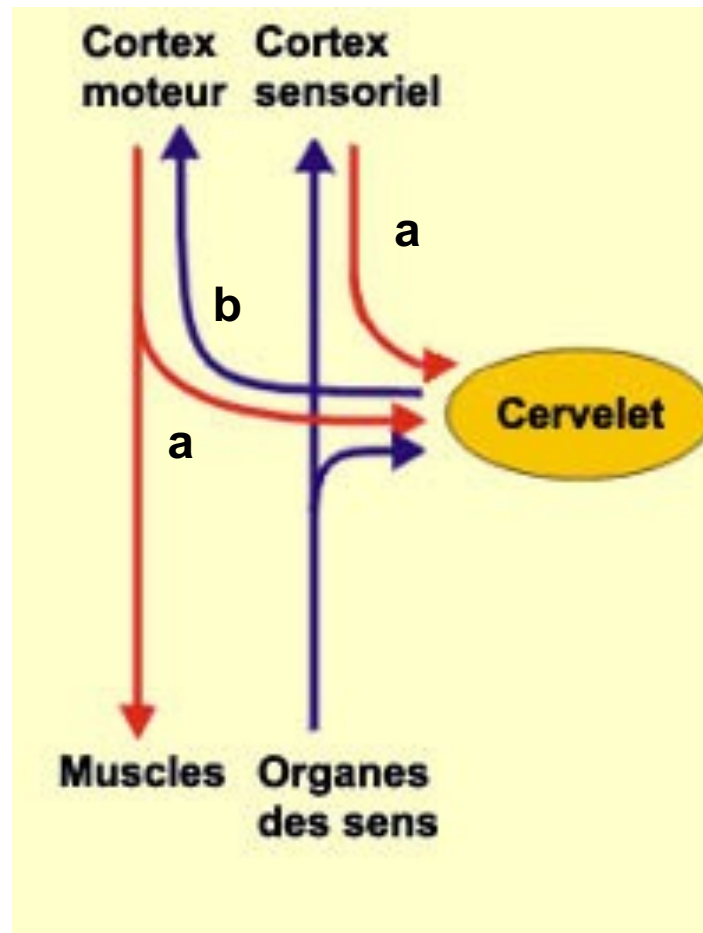
Constitué de 2 hémisphères et d'une région médiane : vermis cérébelleux



# Le cervelet

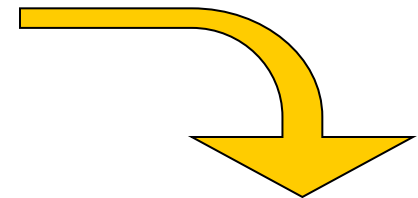
Il intervient dans le contrôle du mouvement et plus précisément dans la coordination motrice = horloge interne.

Lésion du cervelet peut entraîner une ataxie : perte de la coordination des mouvements



a : intention du mvt

b : carac du mvt  
(direction, force,  
durée.)



Intégration de la  
commande motrice  
(calcul de la vitesse de  
déplacement)



# Les enveloppes du SN central

2 grands types de protection :

- Enveloppes osseuses

- Le crâne
- Les vertèbres

- Enveloppes conjonctives :

- Les méninges

Organisation des différentes structures selon leurs résistances :

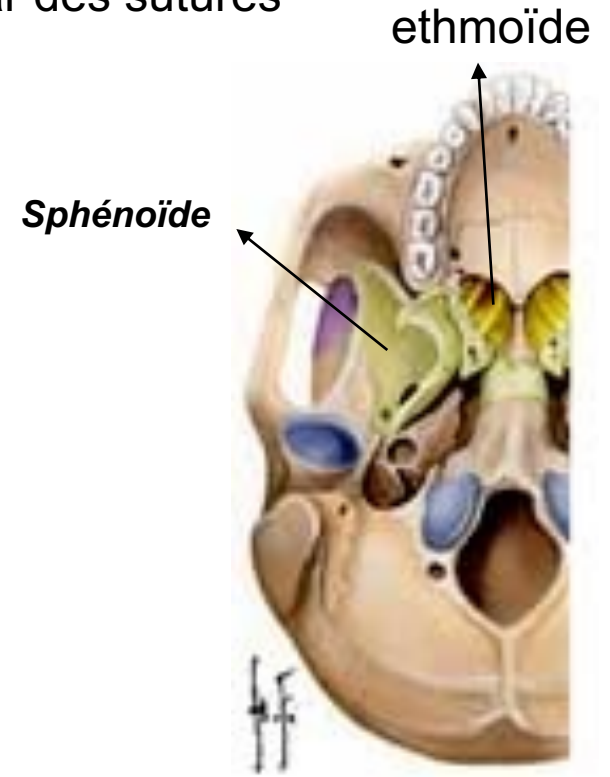
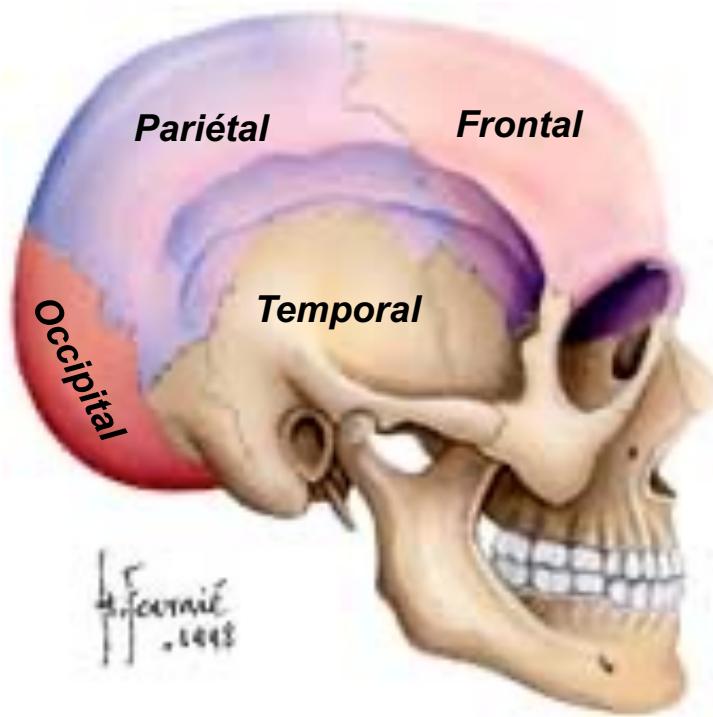
Les plus durs vers l'extérieur, les plus fines en dedans.

# Le crâne

La tête = Crâne + Massif faciale

Le crâne est constitué d'une partie supérieure appelée voûte  
partie inférieure appelée la base du crâne

Voûte = ensemble d'os plats réunis par des sutures



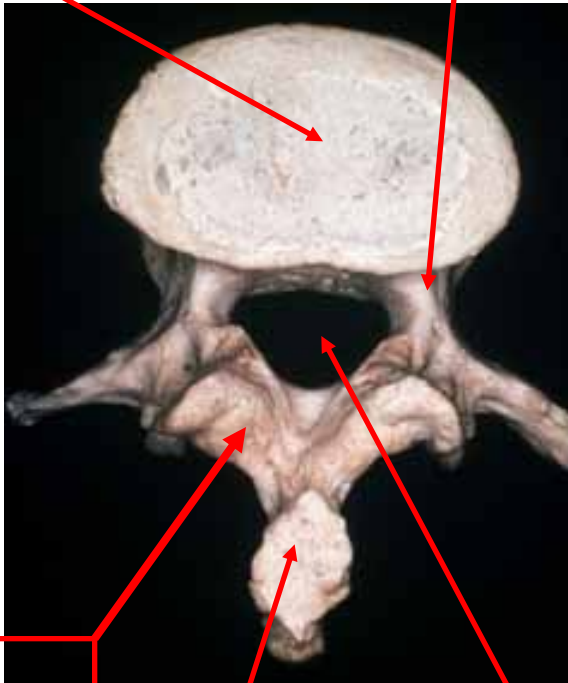


# Les vertèbres

Corps vertébral

Pédicules

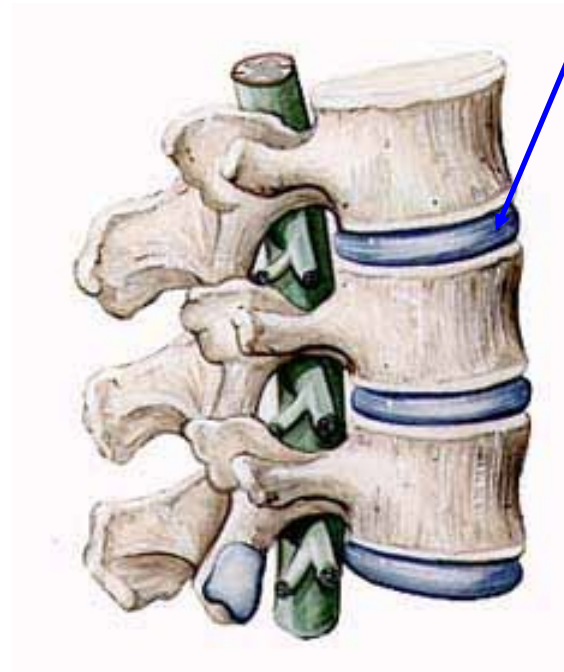
Disque intervertébral



Lames  
vertébrales

Apophyse épineuse

Canal rachidien





# Les vertèbres

Ce sont des os impairs, symétriques et rayonnés

Nbr : 32

7 vertèbres cervicales

12 vertèbres thoraciques

5 vertèbres lombaires

5 vertèbres sacrées

3 à 4 vertèbres coccygiennes

Elles s'articulent entre elles (des cervicales aux lombaires) par l'intermédiaire d'un disque artriculaire.

Les vertèbres thoraciques s'articulent avec les côtes par les facettes costales.

Les vertèbres sacrées et coccygiennes sont soudées.

# Les méninges

*Méninges (du grec menigx: recouvrir)*

Les méninges forment les enveloppes conjonctives du névraxe.  
Avec le crâne et le rachis, elles protègent le système nerveux central.

On distingue 3 feuillets :

- La dure-mère

Un feuillet épais et superficiel. C'est une enveloppe rigide qui entoure le cerveau et la moelle épinière.

- La membrane arachnoïdienne

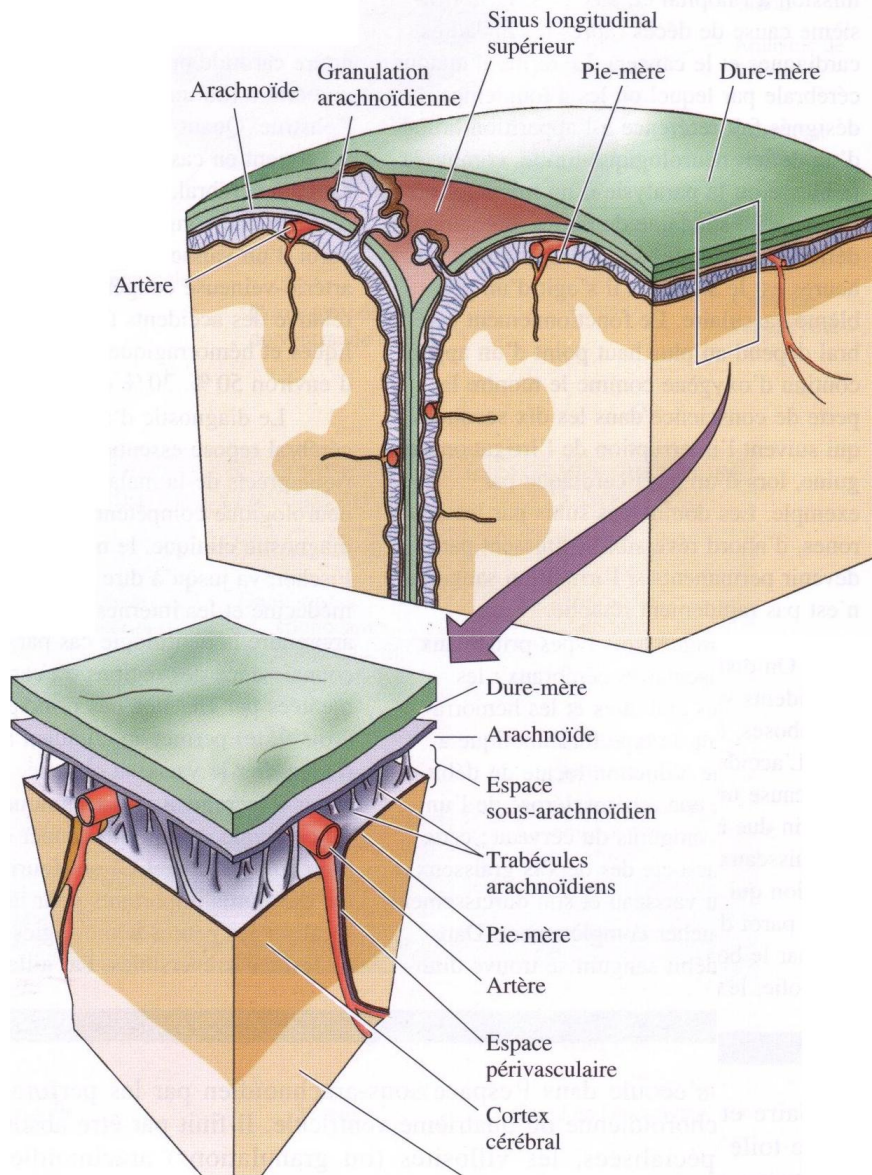
Ressemble à une toile d'araignée. Pas d'espace entre la dure-mère et cette membrane.

- La pie-mère

Membrane fine et profonde. Elle soutient les vaisseaux sanguins.

Présence de LCR entre la pie-mère et la membrane arachnoïdienne : espace sous-arachnoïdien

# Les méninges



Crâne



Dure-mère



Arachnoïde



Espace sous-arachnoïdien



Pie-mère



Cortex

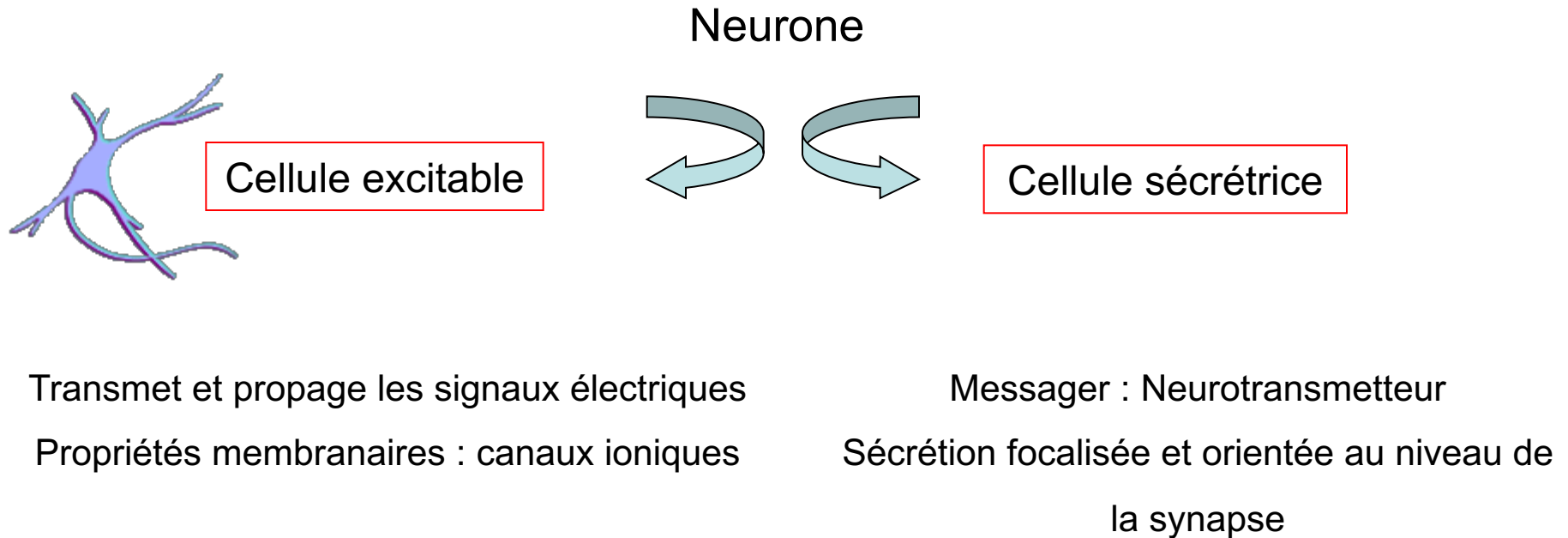
# RAPPELS

## La cellule nerveuse : le Neurone

C'est l'unité fonctionnelle du système nerveux

Cellules nerveuses : 90 % Cellules gliales 10 % Neurones

Responsable de l'intégration et de la propagation du message nerveux





# Le Neurone

Spécificité du Neurone :



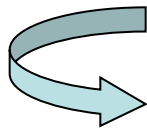
Ne se reproduit pas (amitotique)



Longévité importante



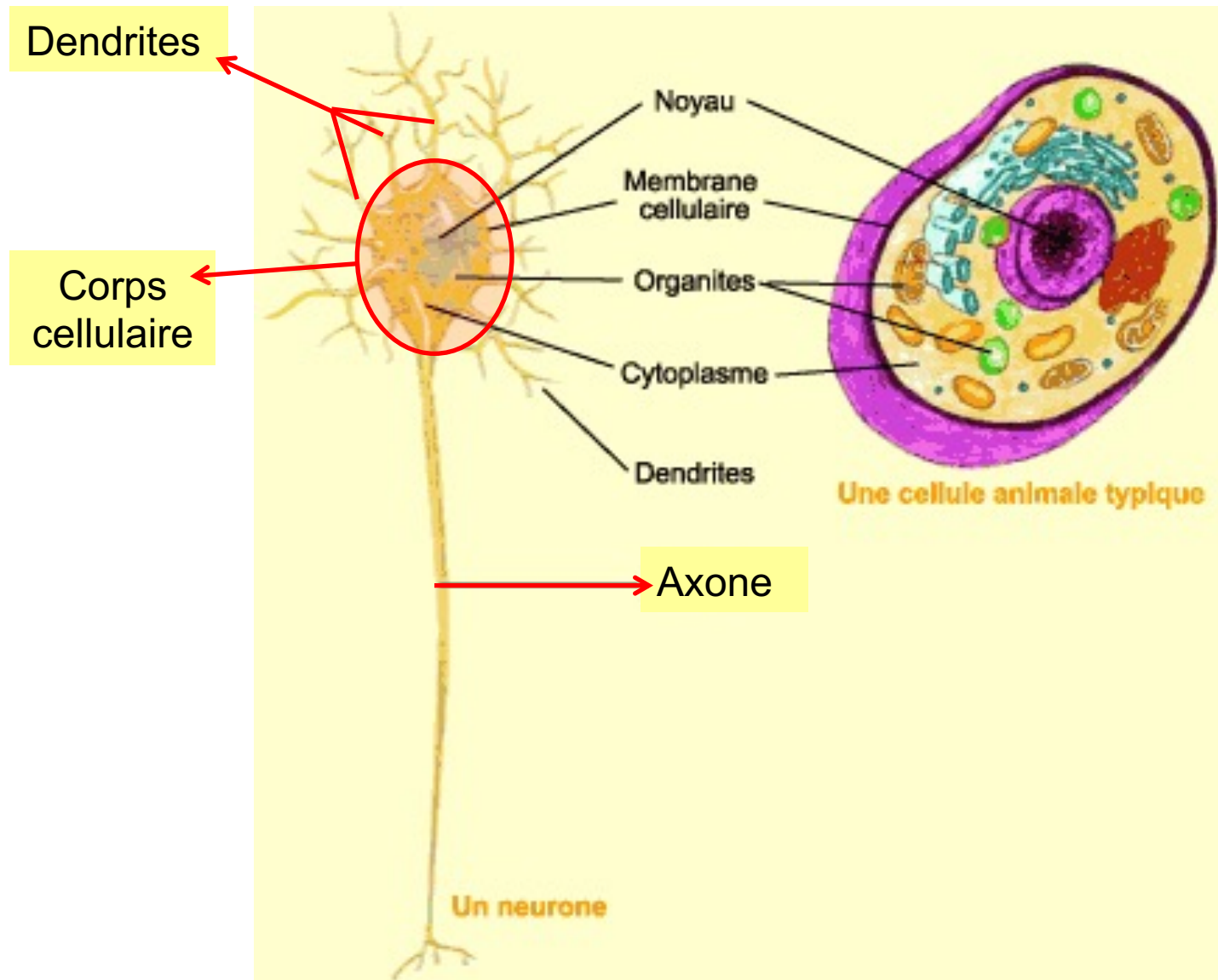
Métabolisme élevé



grande consommation en O<sub>2</sub> et en Glucose

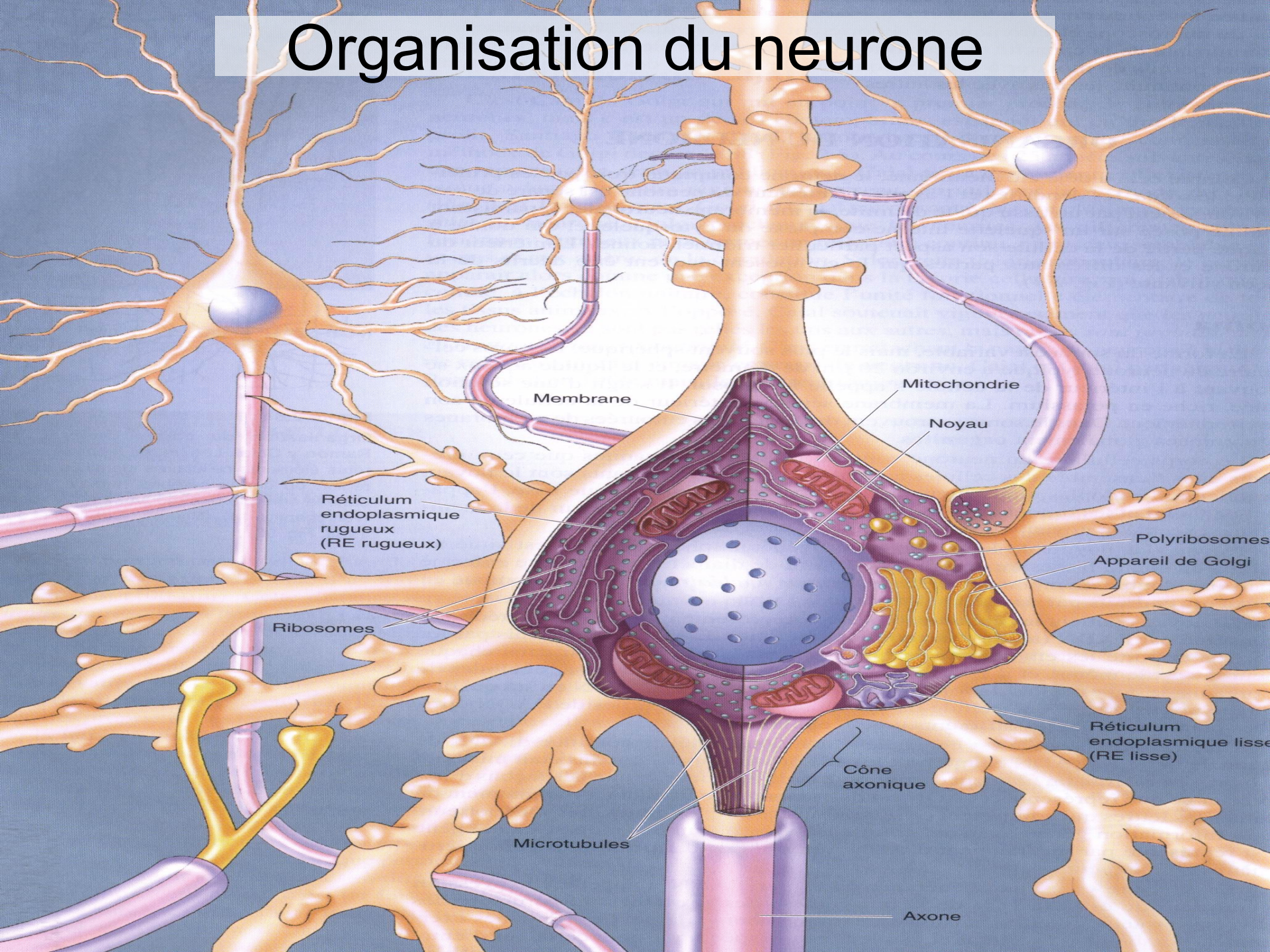


# Structure du neurone





# Organisation du neurone





# Organisation du neurone

- Comprend 3 parties principales :
- Le soma
  - Les dendrites
  - L'axone

## I. Le soma (ou péricaryon) :

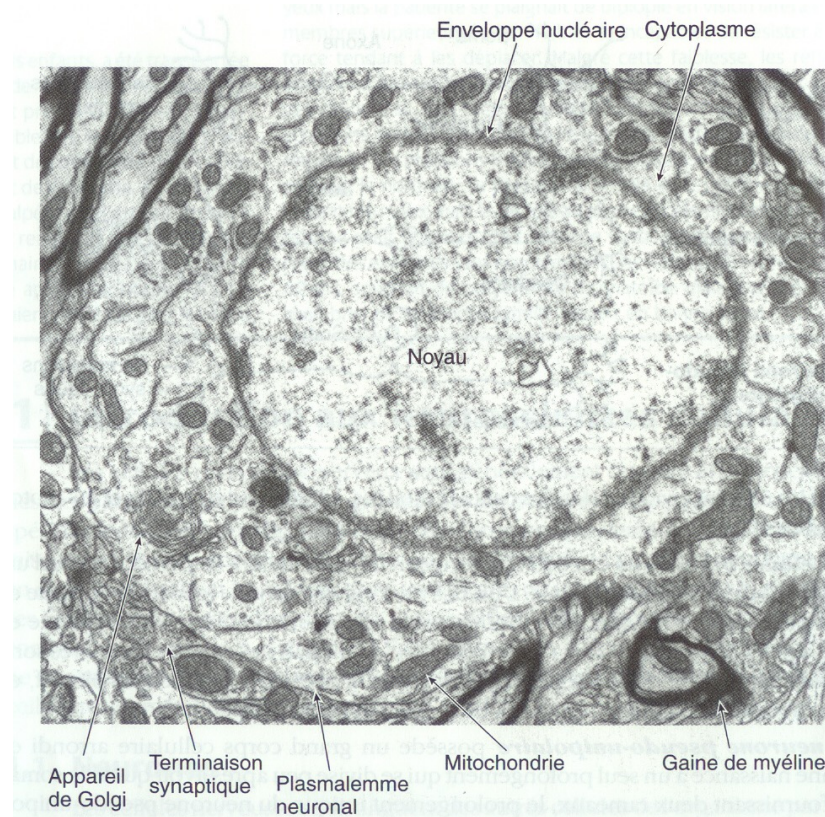
- Forme variable mais souvent sphérique
- Ø : 20 µm
- Liquide aqueux à l'intérieur de la Cellule : le cytosol  
→ solution riche en K<sup>+</sup>
- Contient des structures entourées de membranes : les organites (idem C animale)
- Organites : Noyau, RE rugueux, RE lisse, App. de Golgi, Mitochondries
- Tout ce qui se trouve à l'intérieur de la membrane plasmique sauf noyau = *cytoplasme*

Soma = centre métabolique du neurone

# I. Le soma (suite) :

- Le noyau

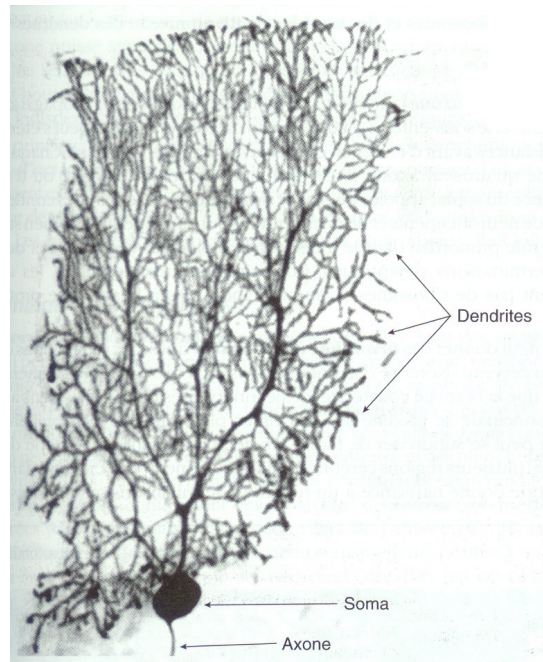
- De forme sphérique, Ø 5 à 10 µm
- Entouré par une double membrane : membrane nucléaire
- Possède au moins un nucléole
- Grande concentration en ARN : soma très basophile





## II. Les dendrites :

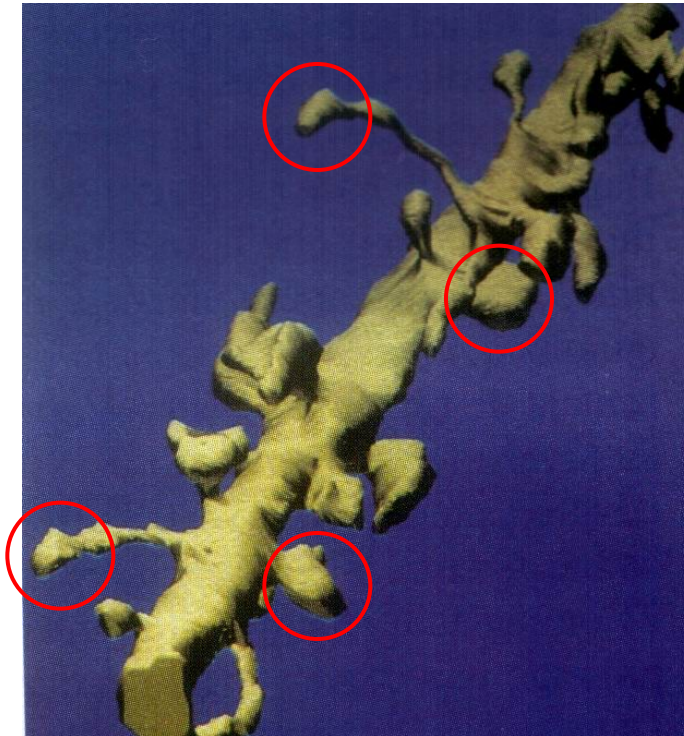
- Corps cellulaire de la plupart des neurones donne naissance à un nombre variable de prolongements fins appelés dendrites (*arbre* en grec)
- Les dendrites qui émergent directement à partir du soma sont appelées dendrites primaires qui se subdivisent en dendrites secondaires puis tertiaires ....
- Elles forment une surface réceptrice servant à intégrer les signaux provenant d'autres neurones : sorte d'antenne du neurone
- Communication entre neurones a lieu sur des sites spécifiques de l'arborescence dendritique : les synapses



## II. Les dendrites (suite) :

- La membrane dendritique possède de nombreuses molécules protéiques spécialisées, les récepteurs, qui représentent les sites d'action spécifiques des neurotransmetteurs.
- Présence à la surface des dendrites de structures particulières, les épines dendritiques, qui reçoivent certains types de courants synaptiques.
- Épines = petits diverticules couverts de synapses, disposés préférentiellement sur la partie distale des dendrites

*Reconstruction 3D  
d'un segment dendritique*



### III. L'axone :

- Différences avec le soma :

Ne contient ni RE rugueux, ni (ou peu) de ribosomes libres (pas de synthèse protéique)

Composition protéique membranaire  $\neq$  donc fonction physiologique  $\neq$

- Prolongement qui peut s'étendre sur de grandes distances
- Chaque neurone ne possède qu'un seul axone qui naît du soma et plus précisément d'une petite proéminence du soma appelée segment (ou cône) initial
- Fonction principale : conduire les influx électrochimiques appelés potentiels d'action du soma vers les terminaisons synaptiques

### III. L'axone (suite) :

- Longueur de l'axone :  $<1\text{mm}$  et  $>1\text{m}$  !

- Le diamètre de l'axone: 1 à  $25\mu\text{m}$  chez l'homme ( $1\text{mm}$  chez le calmar)

Plus le diamètre est grand plus la vitesse de conduction de l'influx est rapide

- L'axone est électriquement excitable grâce :

  - aux propriétés biophysiques de leurs membranes

  - à la différence des concentrations d'ions spécifiques entre les liquides intra- et extra-cellulaires

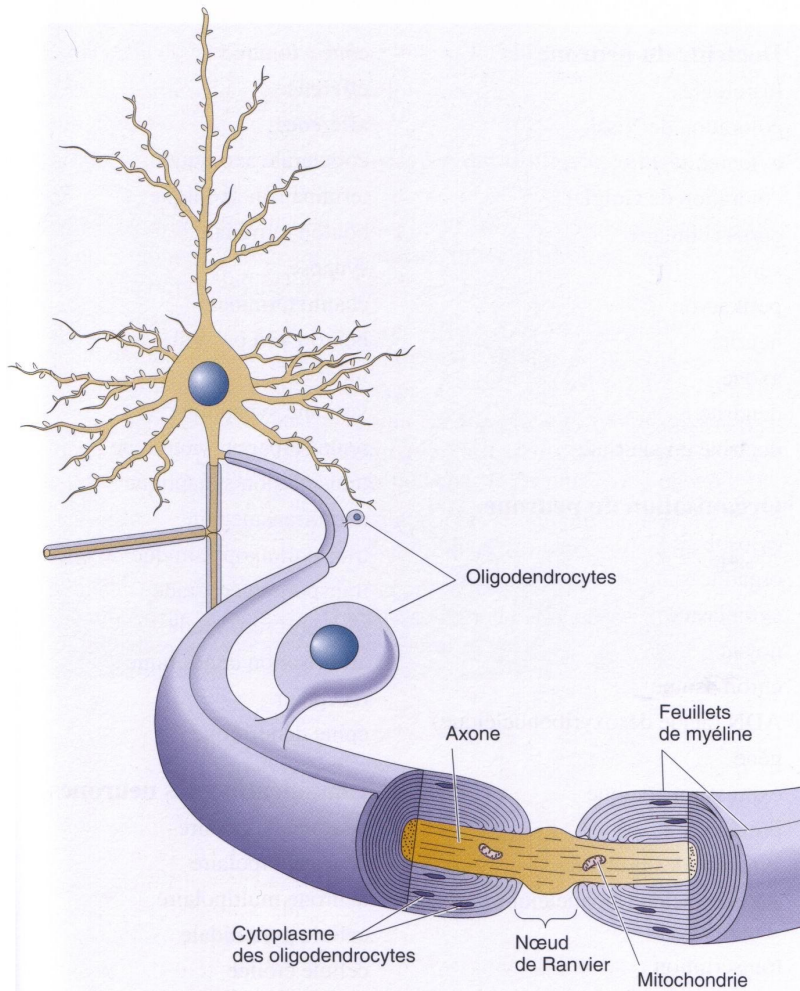
- L'axone qui s'éloigne du neurone dont il est issu représente une efférence

- L'axone qui contacte un neurone particulier et apporte une information s'appelle une afférence.



# La myéline

Recouvrir l'axone de la plupart des neurones

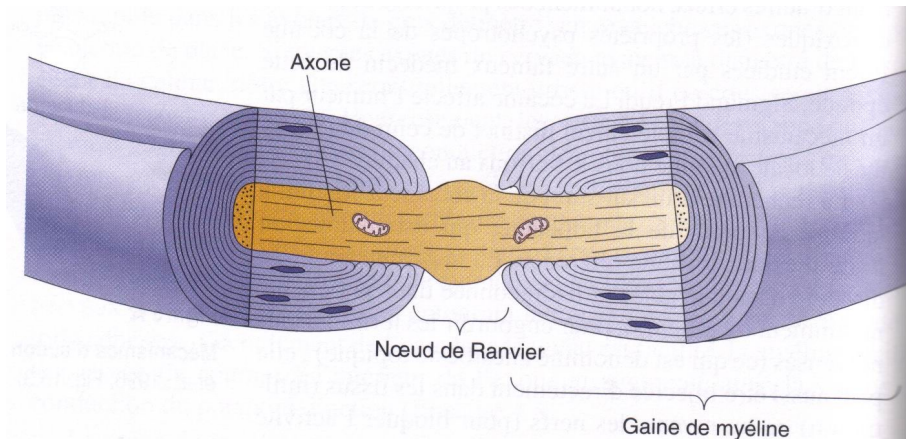


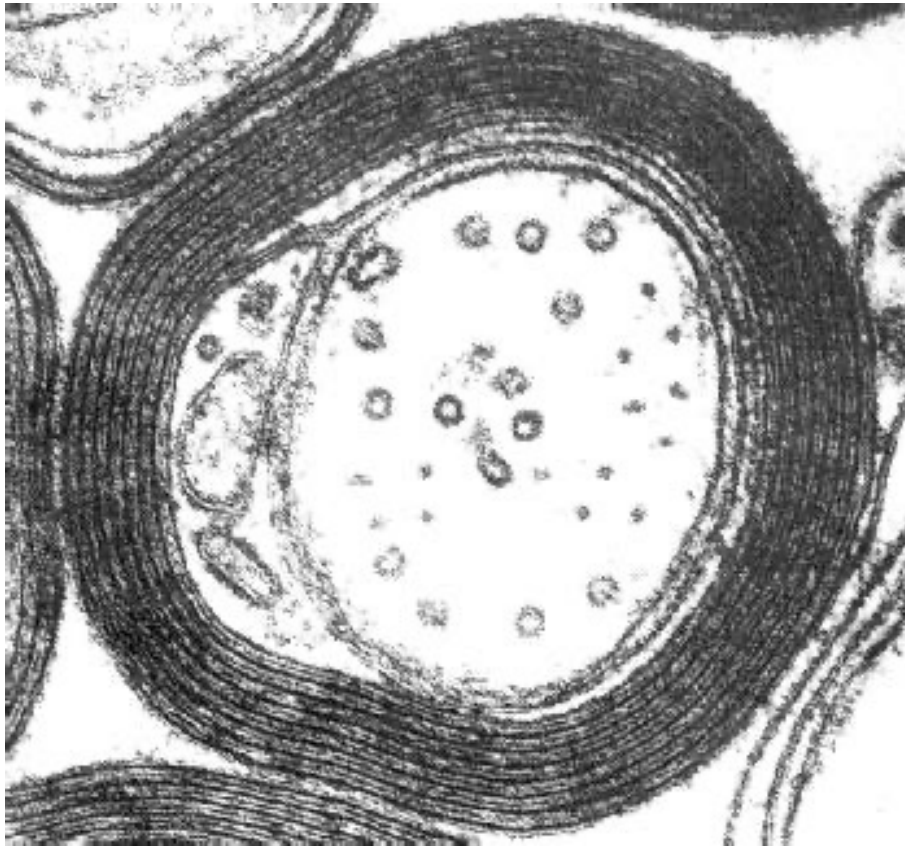
Cellules

- Oligodendrocytes = SN central

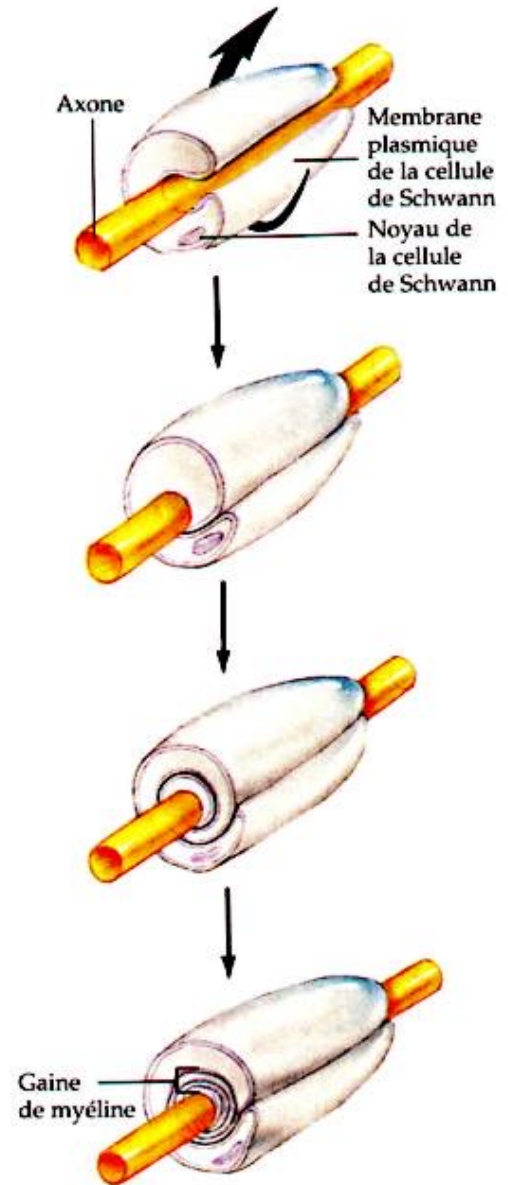
Gliales

- Cellules de Schwann = SN périphérique
- Myéline = isolant puissant = vitesse de conduction +++
- Interruption de la myéline = nœud de Ranvier (passage des ions)





*Vue en coupe au Microscope électronique à balayage*



*Formation de la gaine de myéline*

# Transport axonal

Transport le long de l'axone de molécules protéiques et d'organites cellulaires nécessaires à l'entretien de l'axone

Processus obligatoire car les axones ne renferment ni ribosomes, ni REG

Les diverses particules sont transportées à des vitesses différentes et dans les deux sens le long de l'axone.

2 types de mouvements :

Antérograde (du soma vers les terminaisons synaptiques)

Rétrograde (des terminaisons synaptiques vers le soma)

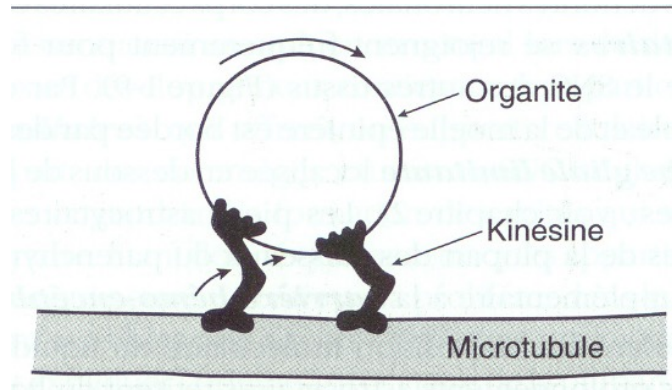
| Direction          | Vitesse (mm/j) | Matériau transporté                                             |
|--------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Antérograde</b> |                |                                                                 |
| Rapide             | 200-400        | Vésicules, neurotransmetteurs, membranes protéiques, lipides    |
| Intermédiaire      | 50-100         | Mitochondries                                                   |
| Lent-a             | 0,2-1,0        | Sous-unités protéiques pour neurofilaments et microtubules      |
| Lent-b             | 2-8            | Clathrine, calmoduline, et enzymes                              |
| <b>Rétrograde</b>  |                |                                                                 |
| Rapide             | 150-300        | Enzymes enfermés dans des lysosomes et facteurs neurotrophiques |



# Transport axonal

## Mouvement antérograde :

Transport rapide assuré par une série de molécules de kinésine (= ATPase) qui alternativement s'attachent à un organite et le déplacent sur une courte distance avant de le relâcher



## Mouvement rétrograde :

Ce processus permet le recyclage et la réutilisation des matériaux dégradés

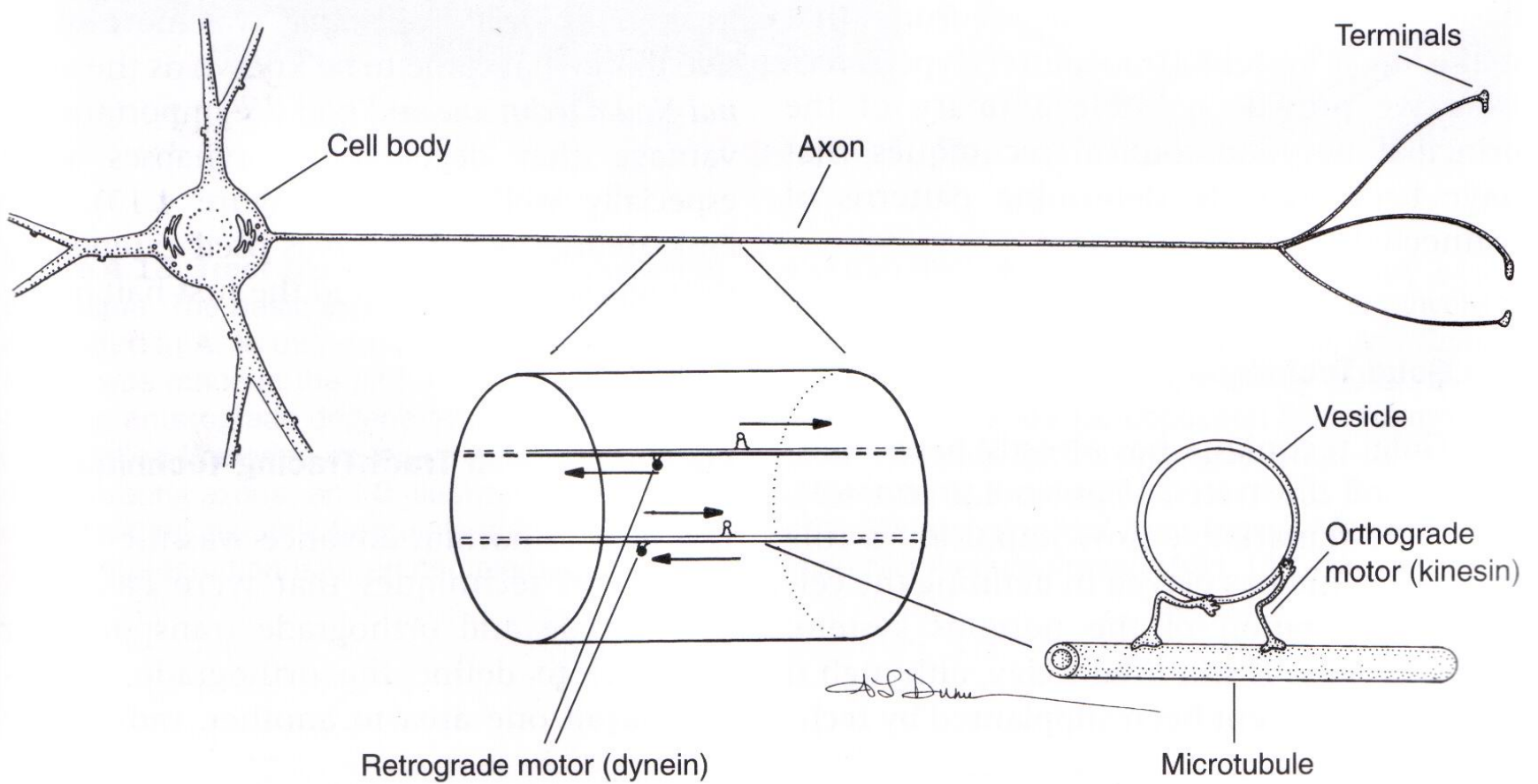
Ce transport intervient rapidement et il est effectué grâce à la dynéine (= ATPase)

Rôle important dans les processus de développement et de régulation

Joue aussi un rôle dans la propagation de nombreux virus et toxines



# Transport axonal



Mouvement antérograde



Mouvement rétrograde

# Terminaisons synaptiques (ou jonctionnelles)

Ce sont des structures spécialisées qui permettent au neurone de communiquer avec d'autres neurones ou avec des effecteurs (ex: muscles, glandes,...)

L'extrémité terminale d'un axone forme une structure particulière appelée le bouton synaptique

Le bouton synaptique s'applique étroitement avec la membrane plasmique de la cellule cible.

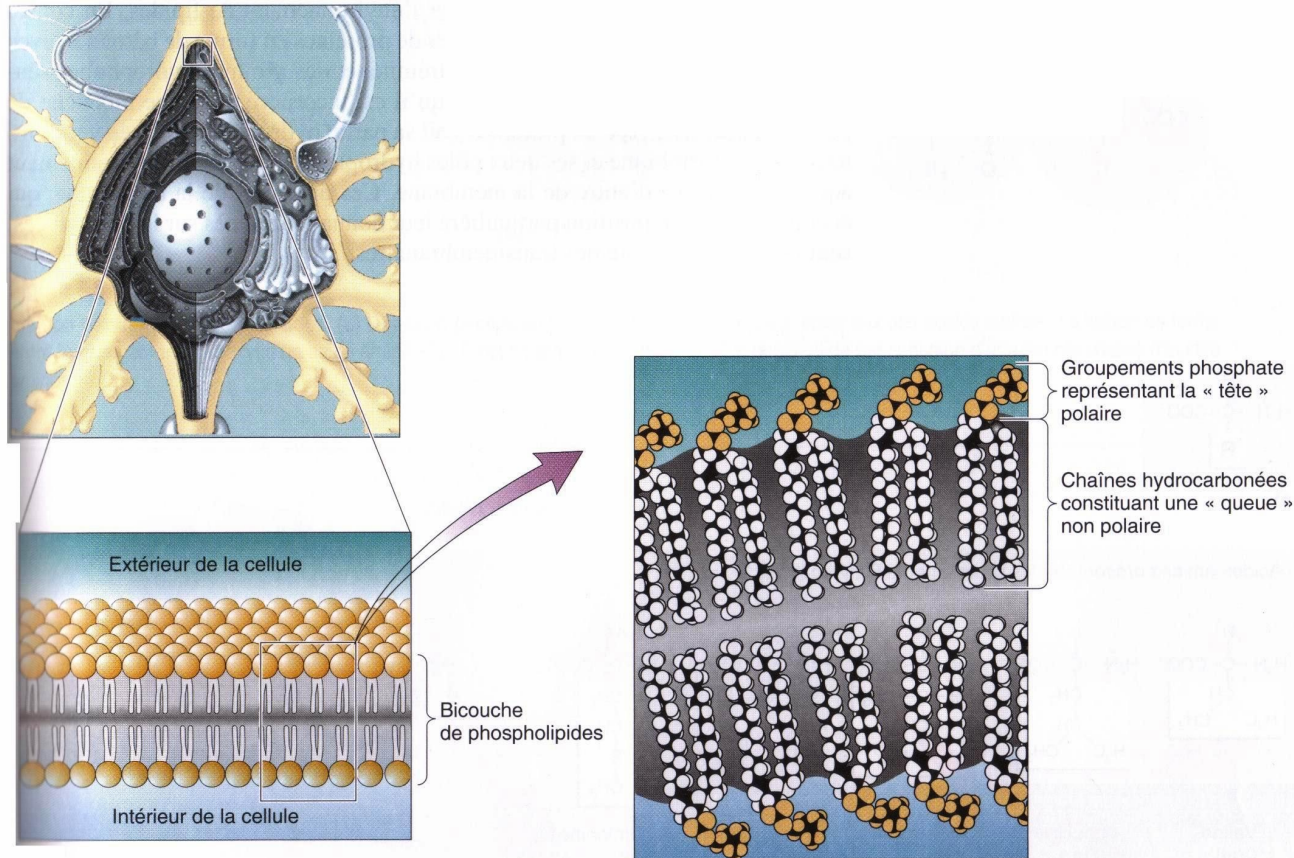
$\varnothing$  bouton  $>$   $\varnothing$  axone

Il contient des mitochondries (Energie), des vésicules synaptiques, des enzymes, ...

Les vésicules synaptiques contiennent des molécules de neurotransmetteurs qui sont libérées dans la fente synaptique lors de l'arrivée des influx électrochimiques

# Neurophysiologie à l'échelle cellulaire

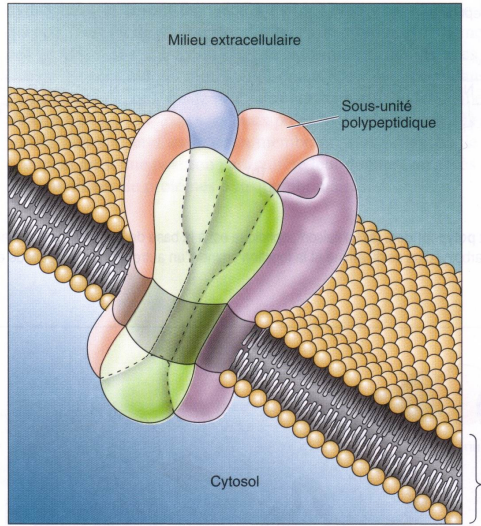
## La membrane plasmique



Bicouche phospholipidique (barrière de passage aux ions solubles)

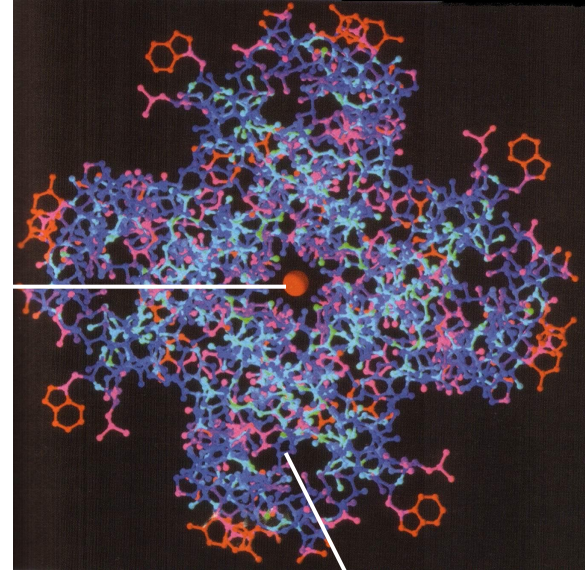
# Protéines membranaires

Canal ionique (x sous-unités)



Ions  $K^+$

Représentation atomique d'un canal  $K^+$



- Canaux ioniques

Il existe une sélectivité ionique en fonction :

- du diamètre du pore du canal
- la nature des groupements R d'acides aminés à l'intérieur du pore
- la structure géométrique

1 sous-unité



- Canaux ioniques (suite) :

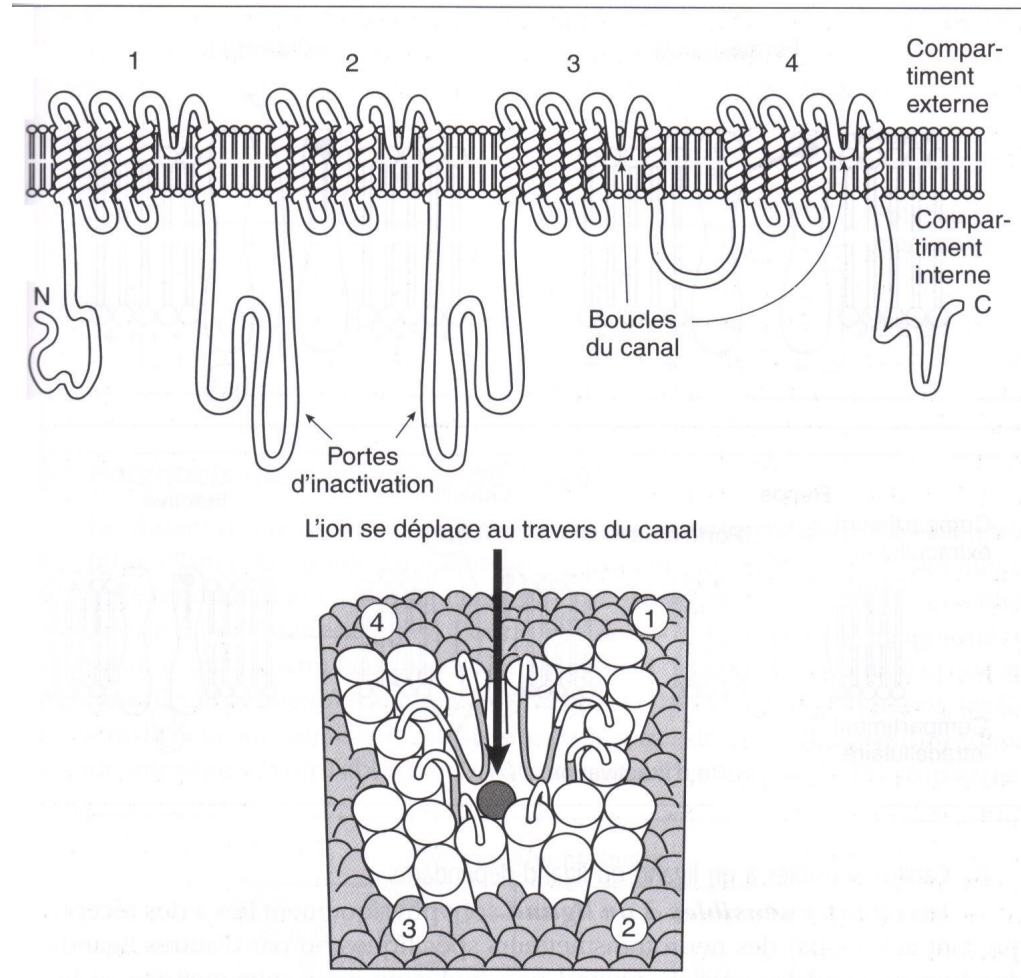
- Chaque sous-unité est une molécule glycoprotéique formée de plusieurs domaines transmembranaires reliés les uns aux autres par des boucles d'acides aminés intra- et extra-cellulaires.

### Perméabilité

aux ions  $K^+$  : canaux potassiques

aux ions  $Na^+$  : canaux sodiques

aux ions  $Ca^{2+}$  : canaux calciques



On distingue deux types de canaux ioniques :

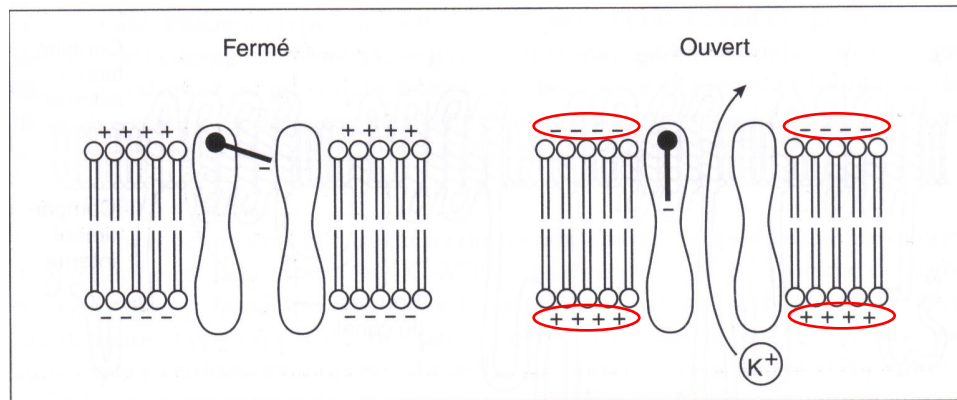
- Canaux sensibles au voltage ou voltage-dépendants

Ils se situent sur toute la membrane du neurone y compris au niveau de l'axone.

Ils sont nécessaires à la propagation du potentiel d'action vers les terminaisons synaptiques

Ils sont contrôlés par l'amplitude et la polarité de la différence de potentiel membranaire car les boucles du pore contiennent des charges électriques qui sont soit repoussées soit attirées par les charges ioniques à la surface de la membrane

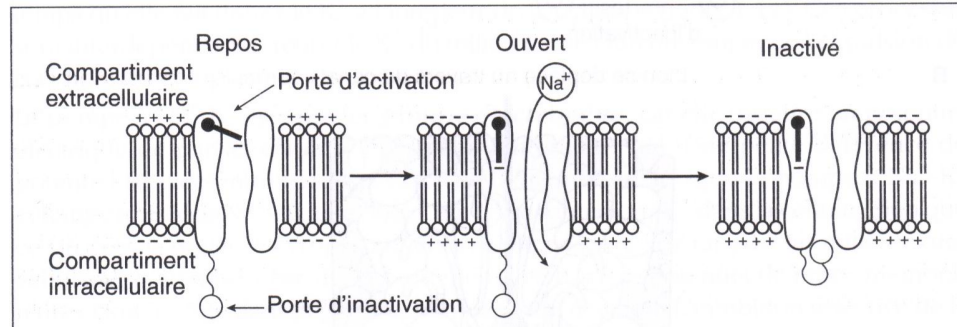
*Canal  $K^+$ : porte unique*



*Canal  $Na^+$ : porte double*

*3 états possibles*

*Fermé - Ouvert - Inactivé*



- Canaux sensibles au ligand ou ligand-dépendants

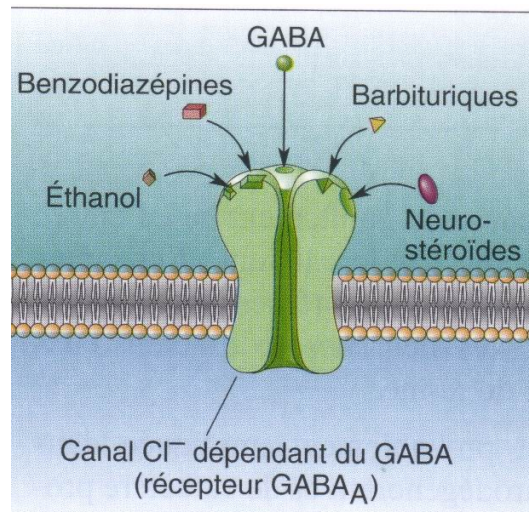
Ils sont physiquement liés à des récepteurs qui sont activés par des neurotransmetteurs spécifiques ou par d'autres ligands de structure moléculaire voisine.

Quand un ligand se fixe au récepteur d'un canal, la structure conformationnelle du canal ionique se modifie afin de permettre aux portes de passer de la position fermée à la position ouverte

La concentration de ces canaux est forte au niveau des sites qui reçoivent des contacts synaptiques et qui interviennent dans l'induction de PPSE ou PPSI

Ces canaux sont présents dans la membrane du soma, des dendrites ou des boutons synaptiques mais absents au niveau des axones.

*Ex: Canal  $\text{Cl}^-$  dépendant du GABA*

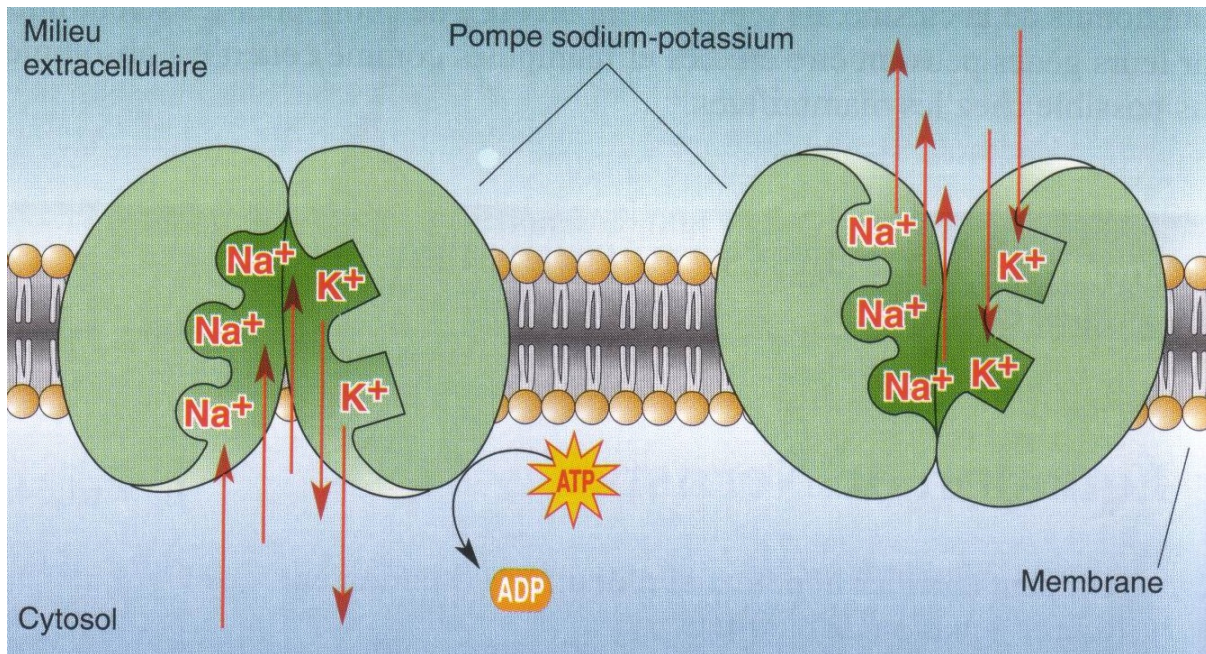




# Protéines membranaires

- Pompes ioniques :

- Ce sont des enzymes qui utilisent de l'énergie (ATP) pour faire passer des ions au travers de la membrane : pompes à ATPase
- Permettent le transport des ions contre le gradient de concentration
- Sont responsables du gradient de concentration ionique

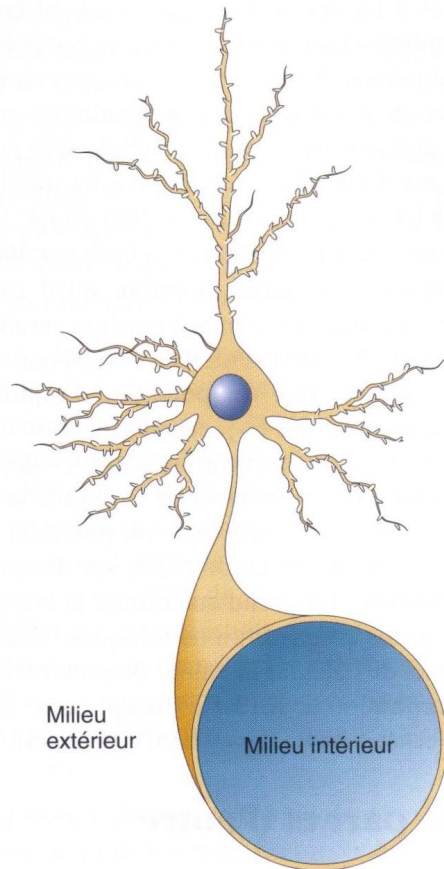


*Pompe à sodium-potassium (consomme 70% qtité d'ATP au niveau du cerveau)*

*Pompe électrogène : instaure le potentiel membranaire*



# Gradient de concentration ionique



Milieu extérieur

$[K^+]_e = 5 \text{ mM}$   
 $[Na^+]_e = 150 \text{ mM}$   
 $[Ca^{2+}]_e = 2 \text{ mM}$   
 $[Cl^-]_e = 150 \text{ mM}$

Milieu intérieur

$[K^+]_i = 100 \text{ mM}$   
 $[Na^+]_i = 15 \text{ mM}$   
 $[Ca^{2+}]_i = 0,0002 \text{ mM}$   
 $[Cl^-]_i = 13 \text{ mM}$

Rapport  
extérieur/intérieur

$1:20$   
 $10:1$   
 $10\,000:1$   
 $11.5:1$

Potentiel de membrane ( $V_m$ ) dépend de la concentration ionique de part et d'autre de la membrane neuronale

Potentiel d'équilibre d'un ion :

Équation de Nernst

$$E_{\text{ion}} = 2,303 (RT/zF) \log \frac{[\text{ion}]_e}{[\text{ion}]_i}$$

$R$ : Cste gazeuse,  $T$ : température abs

$z$ : charge de l'ion,  $F$ : Cste de Faraday

$$E_K = 61,54 \log ([K^+]_e / [K^+]_i)$$

Comme  $([K^+]_e / [K^+]_i) = 1/20$

$$\rightarrow E_K = -80 \text{ mV}$$

$$E_{Na^+} = 62 \text{ mV}$$

$$E_{Ca^{2+}} = 123 \text{ mV}$$

$$E_{Cl^-} = -65 \text{ mV}$$

# Potentiel membranaire au repos

- Potentiel membranaire :

- Dépend de la perméabilité relative (P) à certains ions

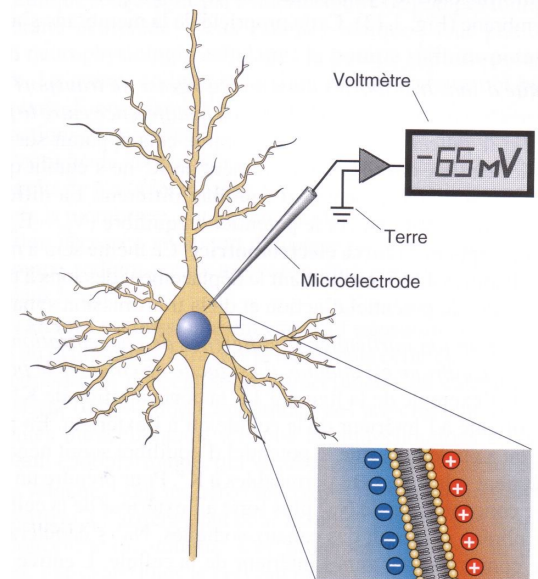
Équation de Goldman

$$V_m = 61,54 \log \frac{P_K[K^+]_e + P_{Na}[Na^+]_e}{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i}$$

Au repos :  $P_K = 40 * P_{Na}$  et  
 $[K^+]_e = 5\text{mM}$ ,  $[K^+]_i = 100\text{mM}$ ,  
 $[Na^+]_e = 150\text{mM}$ ,  $[Na^+]_i = 15\text{mM}$

$$V_m = 61,54 \log ( (40*5 + 1*150) / ( 40*100 + 1*15) )$$
$$V_m = - 65\text{mV}$$

en considérant que la membrane n'est perméable qu'aux ions  $Na^+$  et  $K^+$



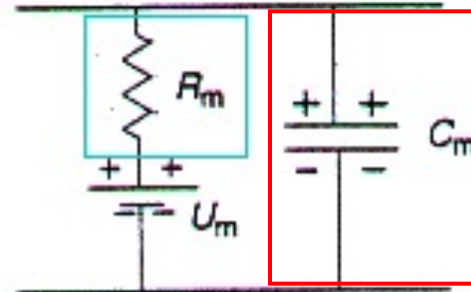
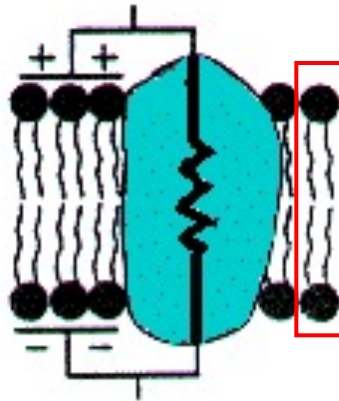
# Propriétés électriques de la membrane

La membrane : bicouche phospholipidique avec des protéines intégrées

Ces protéines sont chargées électriquement, elles peuvent donc conduire un courant électrique. Cette propriété peut être symbolisée soit par une conductance  $G$  soit par une résistance membranaire transversale  $R_m$  ( $R_m = 1/G$ )

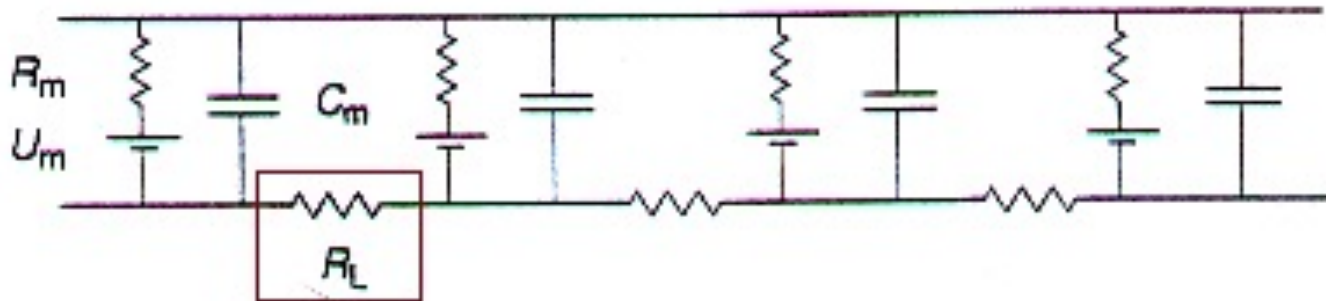
Circuit électrique équivalent :

- générateur de courant (pile) «  $U_m$  » de 65mV dont le pôle positif est au niveau extra-cellulaire et le pôle négatif au niveau du cytoplasme
- résistance membranaire «  $R_m$  » dépendante de la qtité de protéines incluses
- condensateur «  $C_m$  » lié à la présence des phospholipides non conducteurs



# Propriétés électriques de la membrane

- La bicouche lipidique, donnant à la membrane des propriétés capacitives, constitue un réservoir de charges qui absorbe les variations instantanées de ddp
- Les deux milieux, intra- et extracellulaire, ne sont pas des conducteurs parfaits. Ils présentent une résistance vis à vis du passage du courant électrique, qui peut être schématisée par une résistance longitudinale «  $R_L$  »



Si l'on tient compte des propriétés résistives de la membrane neuronale (résistance transversale  $R_m$ ), l'injection d'un courant  $I$  au travers de cette membrane (courant transmembranaire  $I_m$ ) fait apparaître, aux bornes de cette membrane, une tension  $U_m$  telle que :

$$U_m = R_m \times I_m \text{ (loi d'Ohm)}$$



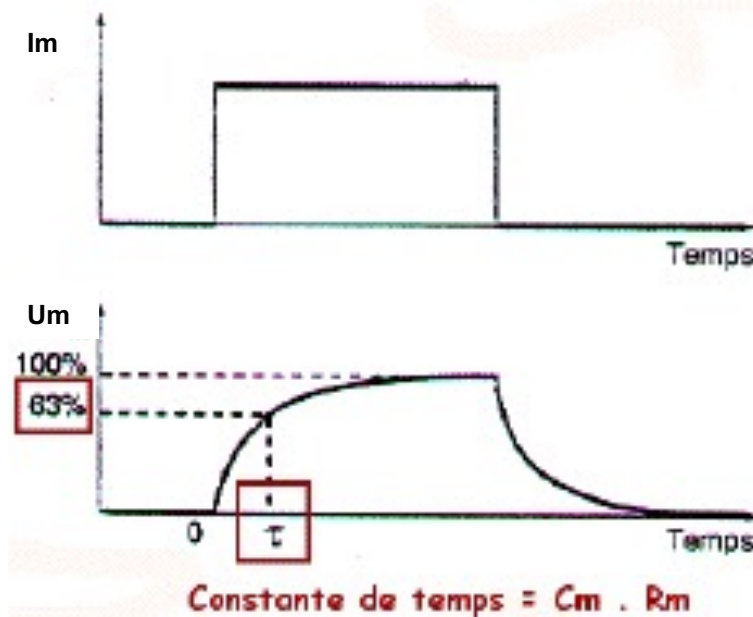
# Propriétés électriques de la membrane

En réalité, si la variation du courant est rapide, la variation du potentiel de membrane suit une courbe exponentielle, du fait des propriétés capacitives ( $C_m$ ) de la membrane.

La résistance transversale  $R_m$  et la capacité  $C_m$  conjuguent leurs effets pour déterminer l'évolution dans le temps de l'installation de la tension  $U_m$  aux bornes de la membrane.

Le produit  $R_m * C_m$  est la constante de temps du circuit ( $\tau$ ).

Ce produit indique, en secondes, le temps nécessaire pour que la tension aux bornes de la membrane atteigne 63,2% de sa valeur maximum.

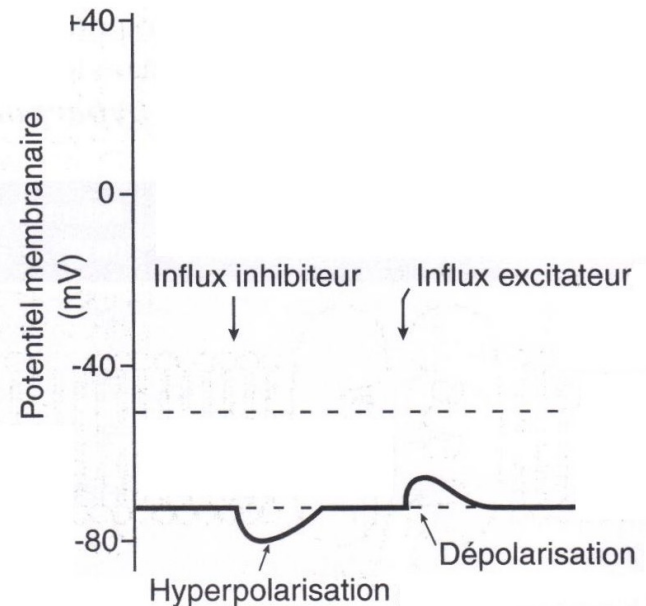


# Potentiel membranaire

Quand la différence de charge de part et d'autre de la membrane diminue à cause de l'entrée d'ions positifs dans le cytoplasme (ou lorsque des ions négatifs en sortent) le potentiel de membrane se rapproche de zéro : dépolarisation

Quand le potentiel de membrane devient encore plus négatif en raison de l'entrée d'ions négatifs dans le cytoplasme (ou lorsque des ions positifs en sortent) le phénomène est appelé : hyperpolarisation

*Propriétés membranaires du neurone*



# La synapse

Sherrington (1897) : Zone de contact et de transmission de l'information entre les neurones.

Elles lient également les cellules réceptrices aux neurones et les neurones aux cellules effectrices (jonction neuromusculaire).

Plusieurs types de synapses :

- Synapse **chimique** : fente intersynaptique (éléments pré-post synaptique), Transmetteur = Molécule chimique.
- Synapse **électrique** ou jonctions communicantes ("gap junctions"), pas de fente (connexons), transmission directe de l'information électrique
- Synapse **mixte**

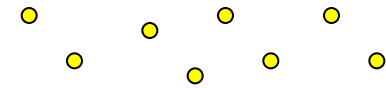


# La synapse chimique

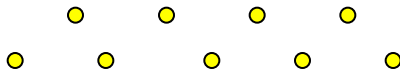
(3 parties)

Axone

Élément pré-synaptique

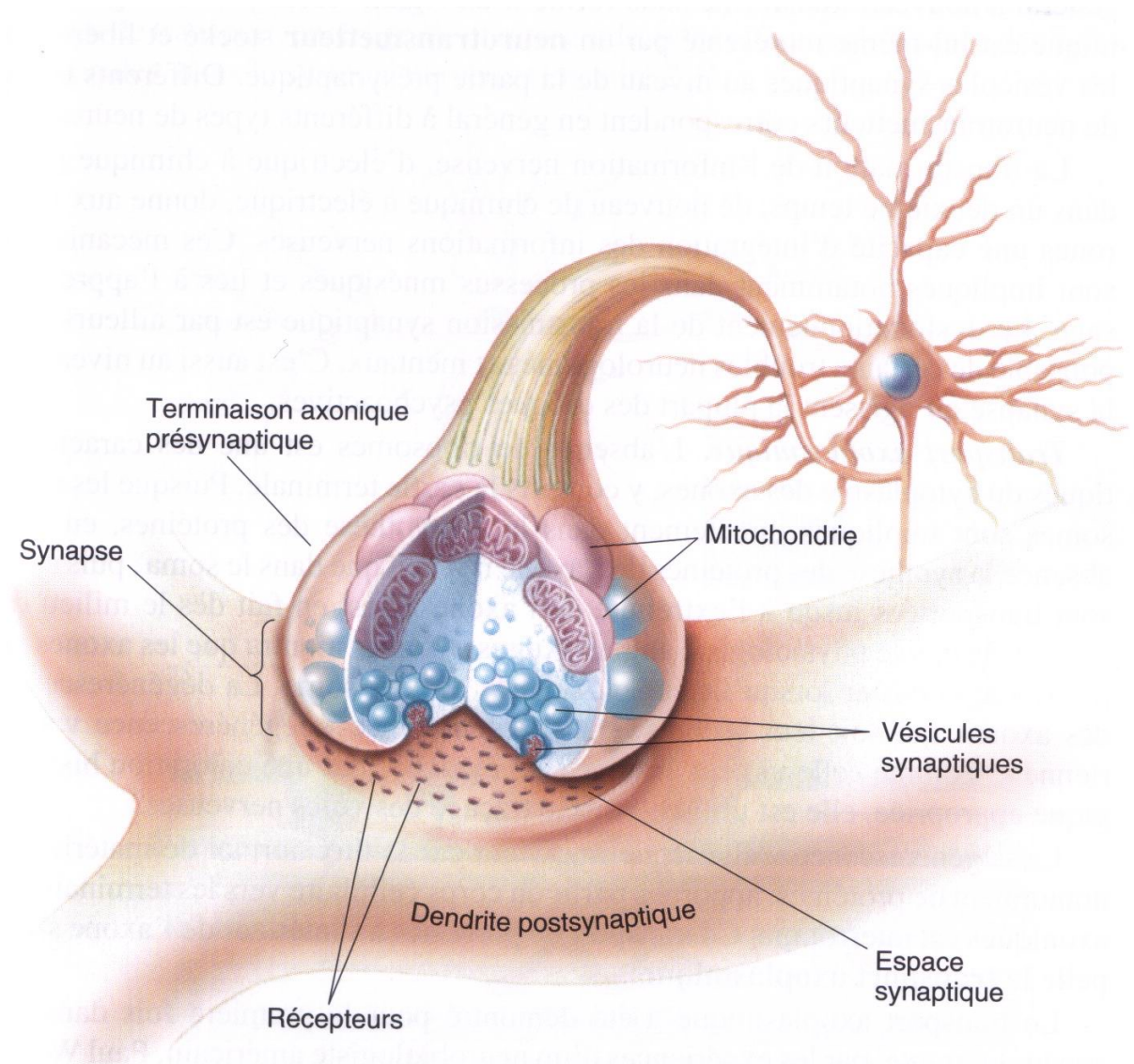


Fente synaptique



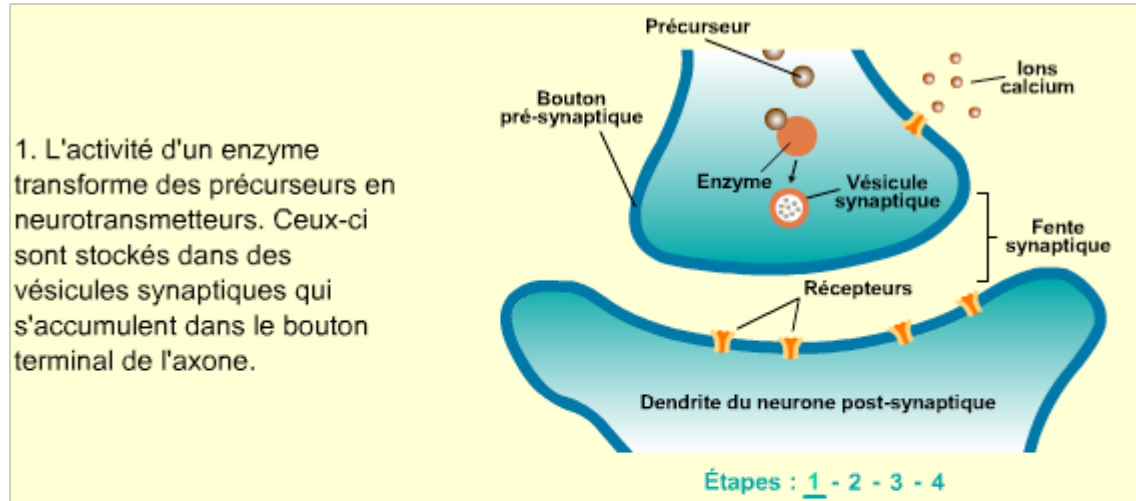
Élément post-synaptique

Dendrite





# La transmission synaptique



1. Activation enzymatique → vésicules synaptiques (Neurotransmetteurs)
2. Entrée ions  $\text{Ca}^{2+}$  → fusion vésicules - mb.p → libération neurotransmetteurs
3. Fixation Neurotransmetteurs →  $\Delta^\circ$  pot. Mb → PPSE ou PPSI
4. Recyclage Neurotransmetteurs

## Neurotransmetteur

## Exemple de désordre où il est impliqué



L'**acétylcholine** est un neurotransmetteur **excitateur** très répandu qui déclenche la contraction musculaire et stimule l'excrétion de certaines hormones. Dans le système nerveux central, il est entre autres impliquée dans l'éveil, l'attention, la colère, l'agression, la sexualité et la soif.



La **dopamine** est un neurotransmetteur qui est impliqué dans le contrôle du mouvement et de la posture. Il module aussi l'humeur et joue un rôle central dans le **renforcement positif** et la **dépendance**.



Le **GABA (pour acide gamma-aminobutyrique)** est un neurotransmetteur **inhibiteur** très répandu dans les neurones du cortex. Il contribue au contrôle moteur, à la vision et à plusieurs autres fonctions corticales. Il **régule aussi l'anxiété**.

La "**maladie d'Alzheimer**" est associée à un manque d'acétylcholine dans certaines régions du cerveau.

La perte de dopamine dans certaines parties du cerveau entraîne la rigidité musculaire typique de la maladie de Parkinson.

Des drogues qui augmentent le niveau de GABA dans le cerveau sont utilisées pour traiter les crises d'épilepsie et pour calmer les tremblements des gens atteints de la maladie d'Huntington.



Le **glutamate** est un neurotransmetteur **excitateur** majeur associé à l'apprentissage et la mémoire.



La **noradrénaline** est un neurotransmetteur important pour l'attention, les émotions, le sommeil, le rêve et l'apprentissage. La noradrénaline est aussi libérée comme une **hormone** dans le sang où elle contracte les vaisseaux sanguins et augmente la fréquence **cardiaque**.



La **sérotonine** contribue à diverses fonctions comme la régulation de la température, le sommeil, l'humeur, l'appétit et la douleur.

Il serait aussi associé à la maladie d'Alzheimer dont les premiers symptômes se font sentir au niveau de la mémoire.

La noradrénaline joue un rôle dans les troubles de l'humeur comme la maniaque-dépression.

La dépression, le suicide, les comportements impulsifs et l'agressivité impliqueraient tous certains déséquilibres de la sérotonine.

# Les récepteurs des neurotransmetteurs

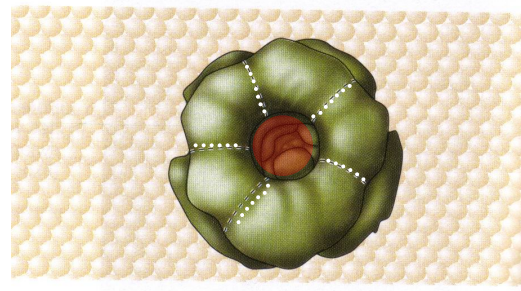
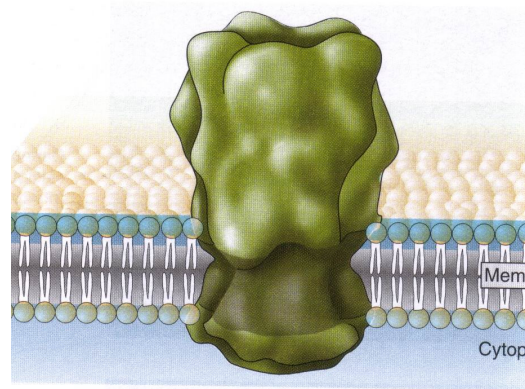
2 grandes catégories de récepteurs :

## A. Les récepteurs-canaux :

Ce sont des protéines transmembranaires constituées de 4 ou 5 sous-unités qui se regroupent pour former un pore.

Celui-ci en l'absence de neurotransmetteur est toujours fermé

*Ex: Récepteur cholinergique nicotinique*



## A. Les récepteurs-canaux (suite) :

Quand il y a libération et fixation du neurotransmetteur sur la partie extracellulaire du récepteur-canal, il y a changement de conformation (légère torsion des sous-unités) qui en qq  $\mu\text{sec}$  provoque l'ouverture du pore.

La nature des ions qui passent à travers le pore influence sa fonction

- Si perméabilité aux ions  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  : dépolarisation de la membrane post-synaptique

Ex: récepteurs à l'Acétylcholine (ACh)

- Si perméabilité aux ions  $\text{Cl}^-$  : hyperpolarisation de la membrane post-synaptique

Ex: récepteurs au GABA et à la glycine



# Les récepteurs des neurotransmetteurs

## B. Les récepteurs couplés aux protéines G :

Engendrent des effets post-synaptiques plus lents, plus durables et plus variés que les canaux ioniques.

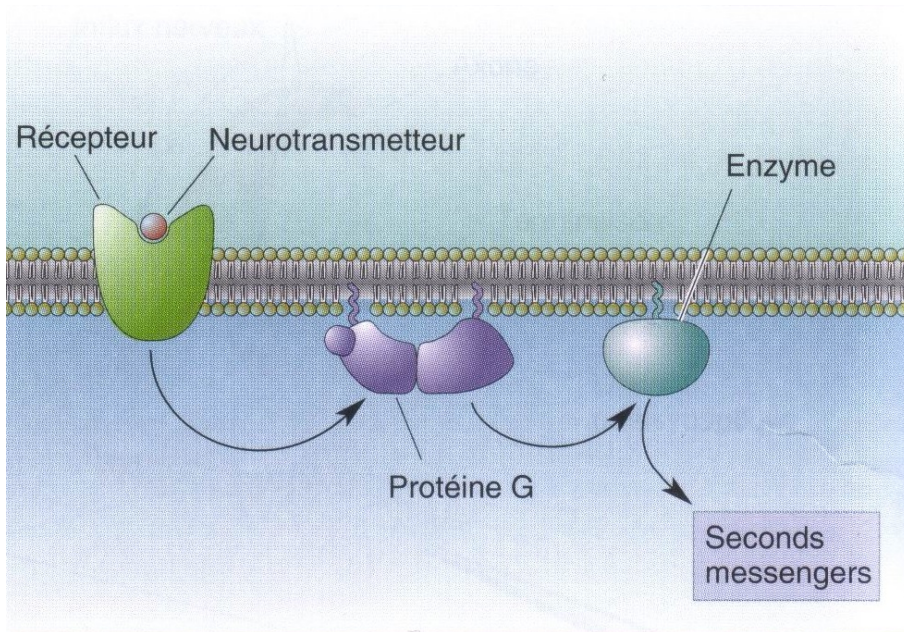
Ce type de transmission comporte 3 phases :

1. Les molécules de neurotransmetteur se fixent aux protéines du récepteur post-synaptique
2. Les protéines du récepteur activent de petites molécules protéiques, les protéines G, qui se déplacent librement sur la face intracellulaire de la membrane post-synaptique
3. Les protéines G activent les protéines représentant les « effecteurs » de la réponse du récepteur

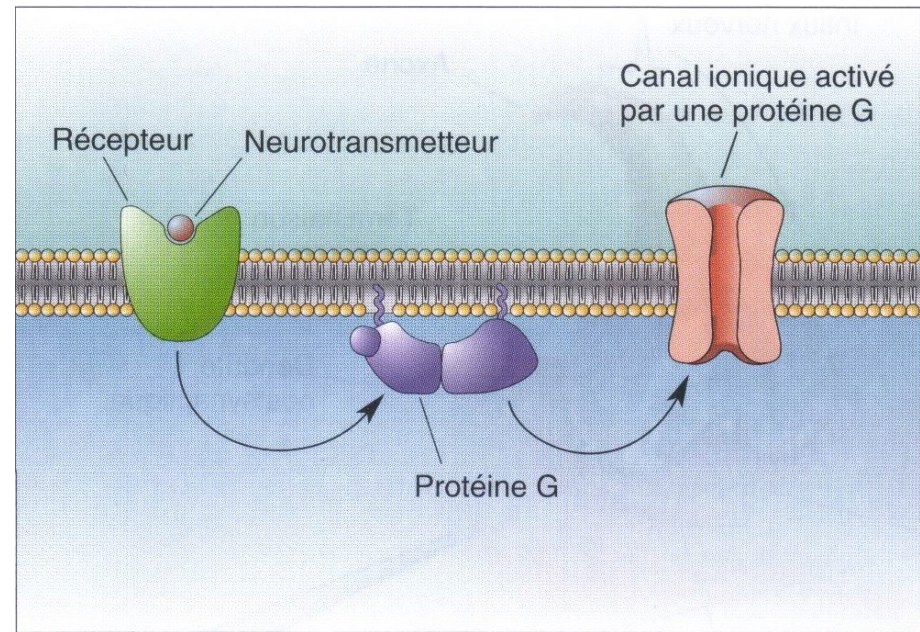
## B. Les récepteurs couplés aux protéines G (suite) :

Les protéines effectrices sont :

- Soit des enzymes assurant la synthèse de molécules particulières dénommées seconds messagers qui diffusent plus loin dans le cytosol (fig. 1)
- Soit des canaux ioniques enchâssés dans la membrane directement sensibles aux protéines G (fig. 2)



*Figure 1*



*Figure 2*

# Potentiels postsynaptiques

## Mécanismes :

- Fixation des neurotransmetteurs sur des récepteurs protéiques spécifiques
- Changement de conformation de la protéine
- Ouverture des pores → Passage des ions

## 2 cas :

Soit canaux perméables aux ions  $\text{Na}^+$  : dépolarisation

→ Potentiel postsynaptique excitateur : PPSE

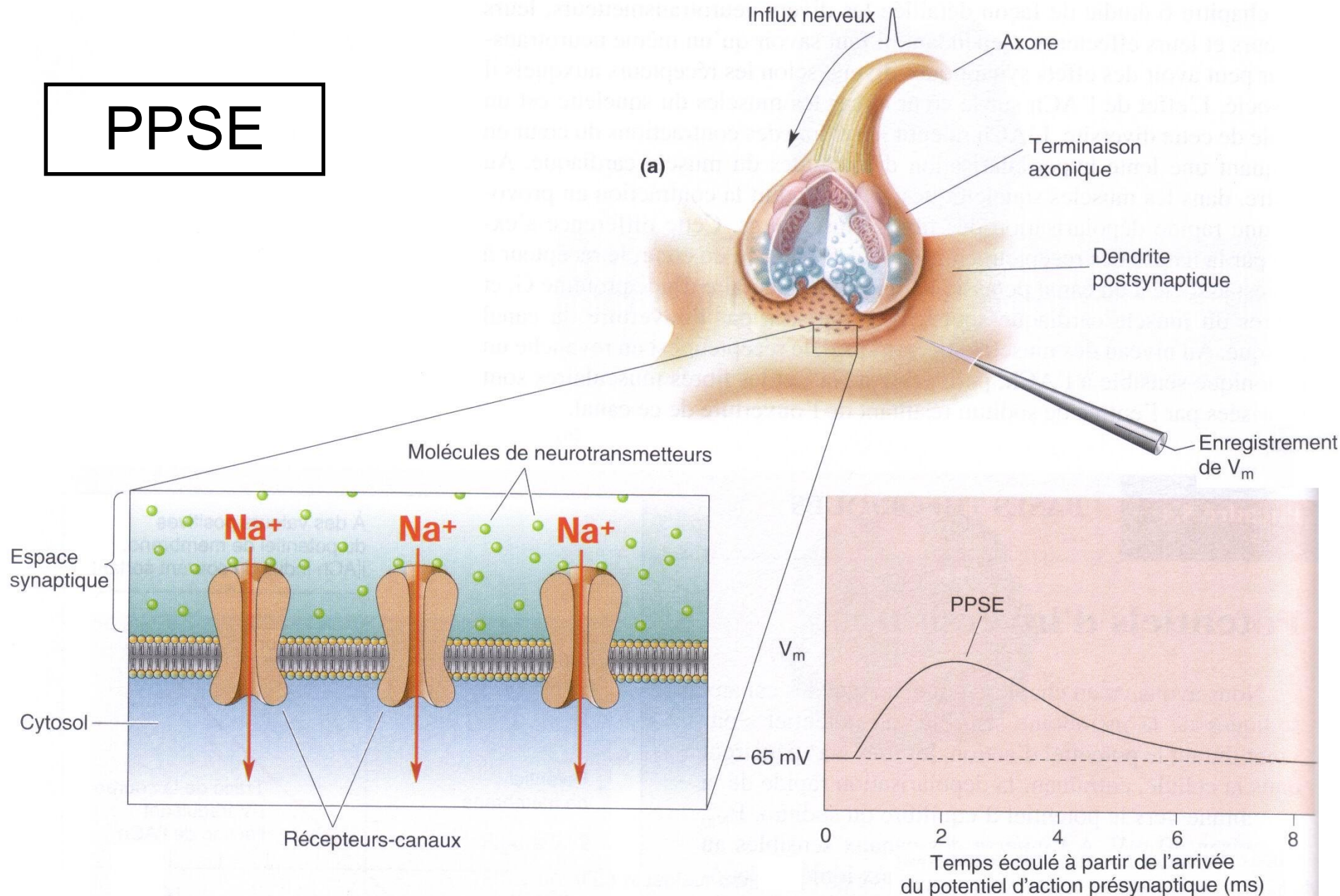
Soit canaux perméables aux ions  $\text{Cl}^-$  : hyperpolarisation

→ Potentiel postsynaptique inhibiteur : PPSI



# Potentiels postsynaptiques

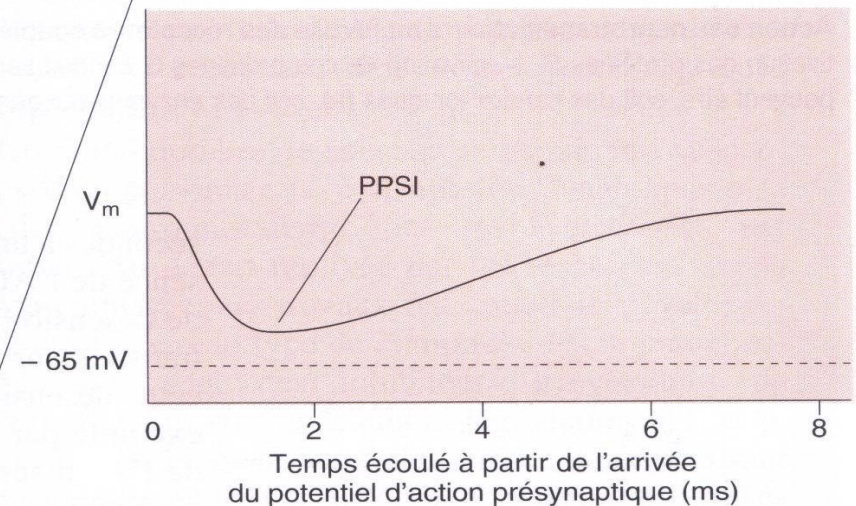
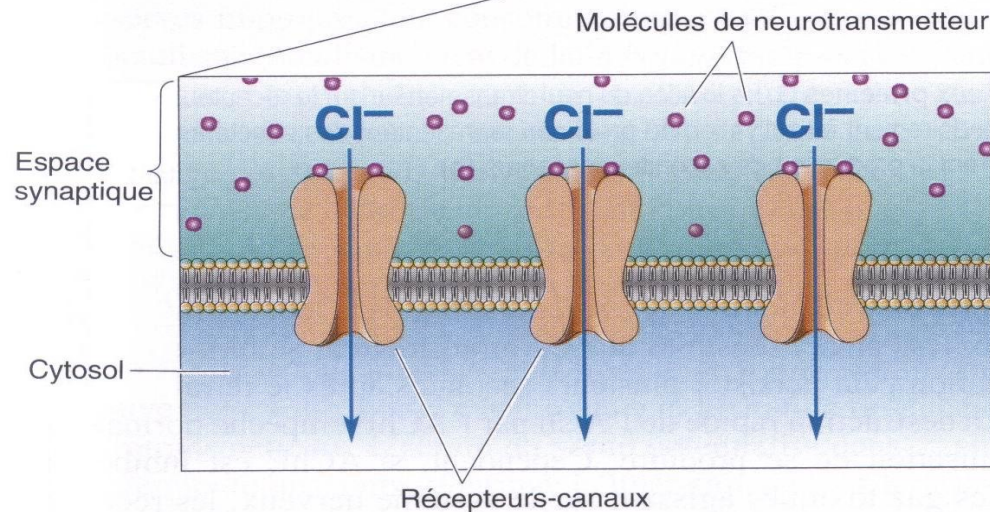
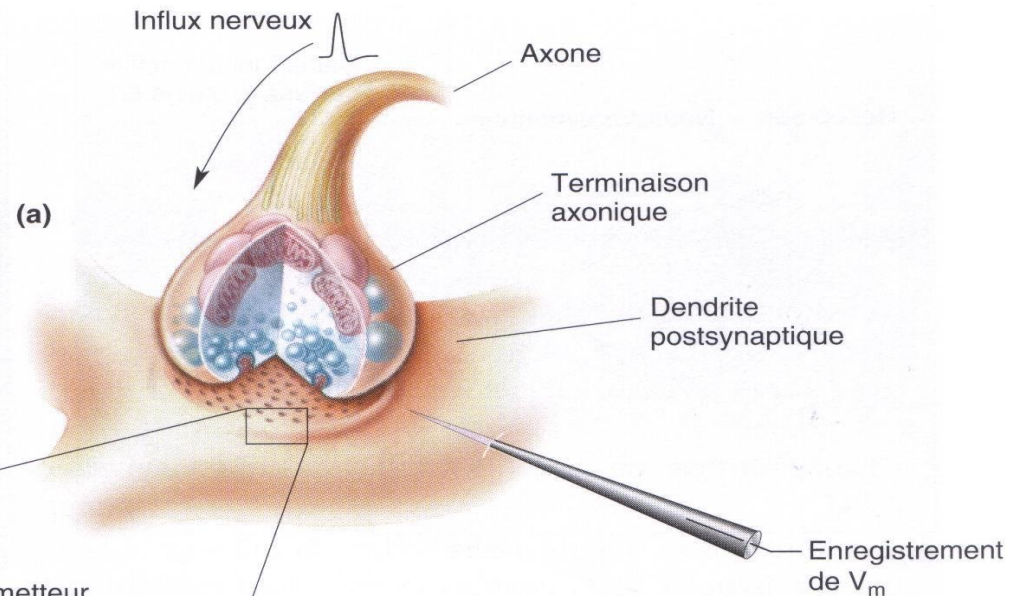
PPSE





# Potentiels postsynaptiques

PPSI



# Intégration des PPS

## **Analyse quantique des PPSE :**

L'amplitude du PPSE dépend :

- du nombre de molécules de neurotransmetteurs présentes dans une vésicule synaptique
- du nombre de récepteurs disponibles au niveau de la synapse

PPSE dépend d'un *quantum*

## **Ex: jonction neuro-musculaire**

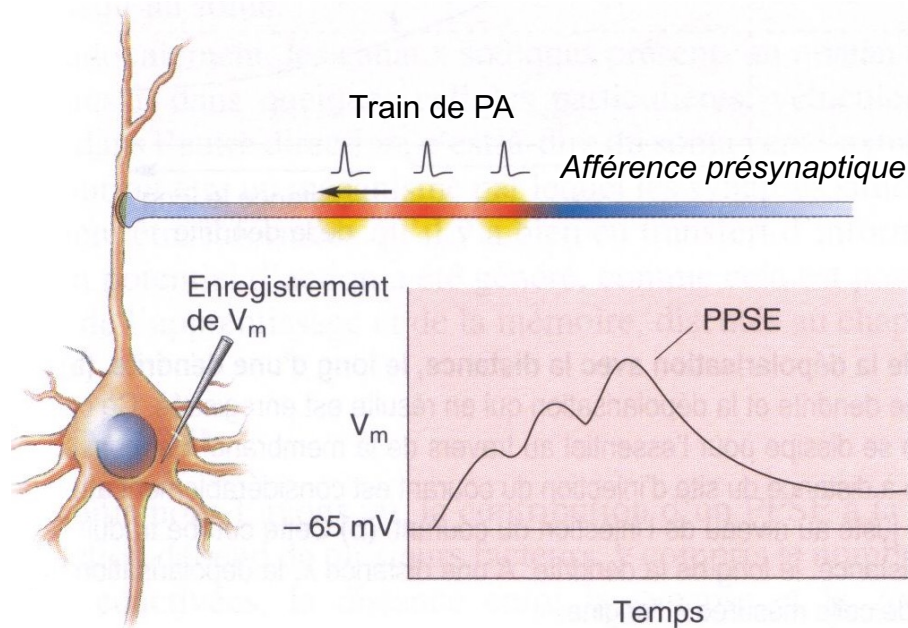
1 PA déclenche exocytose de 200 vésicule synaptique → PPSE 40mV ou plus

## **Somation des PPSE : 2 types**

- Somation spatiale
- Somation temporelle

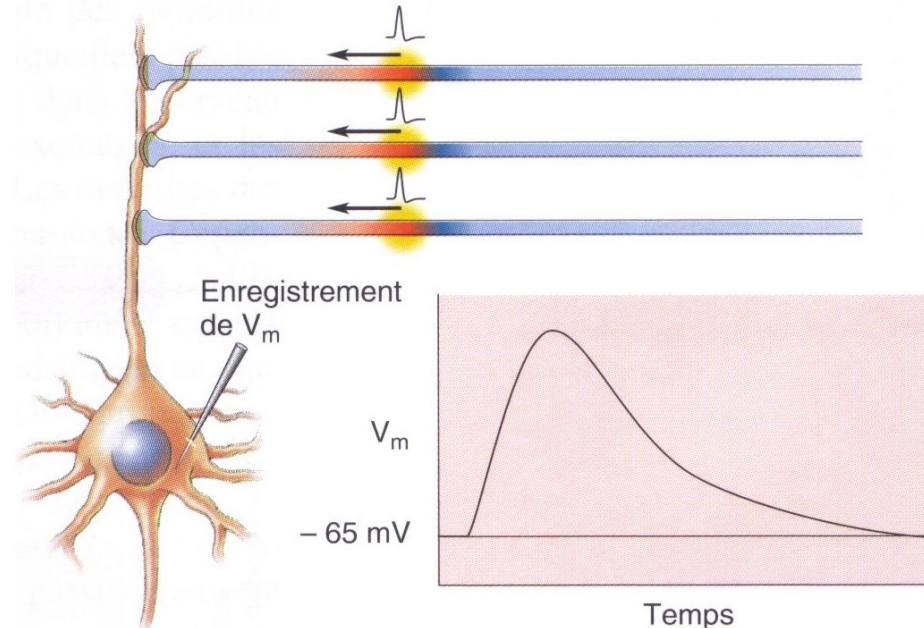
# Sommation des PPS

## Temporelle



Addition des PPSE générés au niveau de la même synapse quand les PPSE se succèdent rapidement (5-15ms)

## Spatiale



Addition des PPSE générés simultanément au niveau de synapses différentes situées sur le même dendrite

# Intégration des PPS

A) le neurone reçoit un potentiel excitateur qui n'est pas assez fort pour déclencher un nouvel influx nerveux;



Étapes : A - B - C



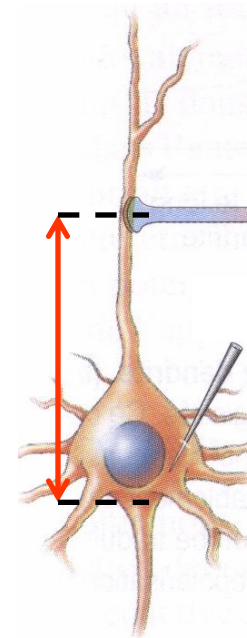
# Propriétés dendritiques

Le courant entrant au niveau des contacts synaptiques doit :

- se propager le long de la dendrite jusqu'au soma
- provoquer la dépolarisation au seuil de la membrane au niveau de la zone (cône) d'initiation des PA

Efficacité d'une synapse excitatrice dépend donc :

- de la distance synapse – zone d'initiation
- des propriétés de la membrane dendritique



*Dépolarisation membranaire  
d'origine*

*distance*

$$V_x = V_0 / e^{(x/\lambda)}$$

*Dépolarisation membranaire  
à une distance x*

2,718

*C<sup>ste</sup> dépend propriétés  
dendrite*

# Déclenchement d'un PA

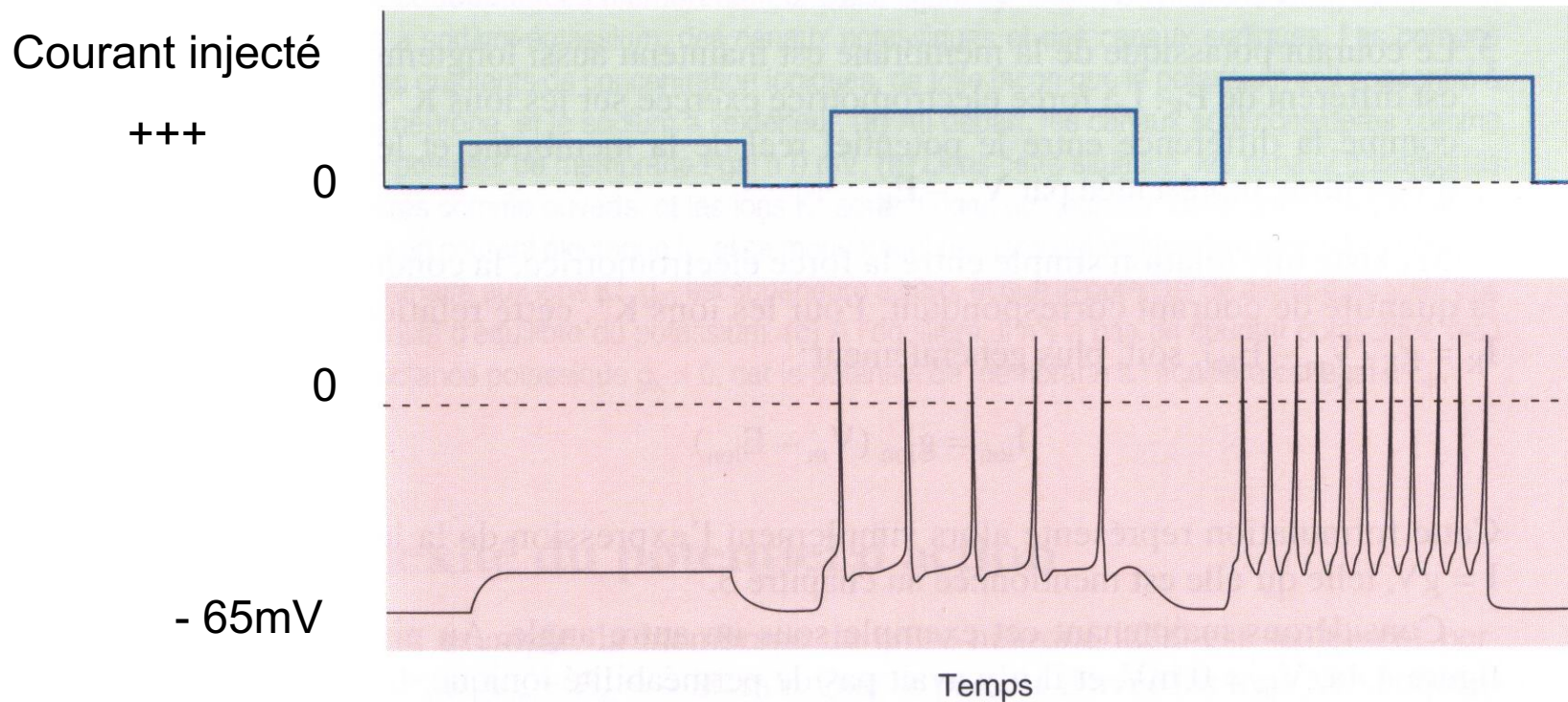
Pour qu'il y ait un PA, la dépolarisation au point stimulé doit dépasser un certain seuil ( $\sim -50$  mV).

- Si la dépolarisation ne dépasse pas le seuil : la membrane reprend sa polarisation normale et il n'y a pas d'influx.
- Si la dépolarisation dépasse le seuil  $\Rightarrow$  la dépolarisation se poursuit jusqu'à  $+40$  mV :  
dépolarisation et repolarisation = potentiel d'action  
 $\rightarrow$  influx nerveux

**Loi du Tout ou Rien**

# Déclenchement d'un PA

Courant recueilli au niveau du cône axonique



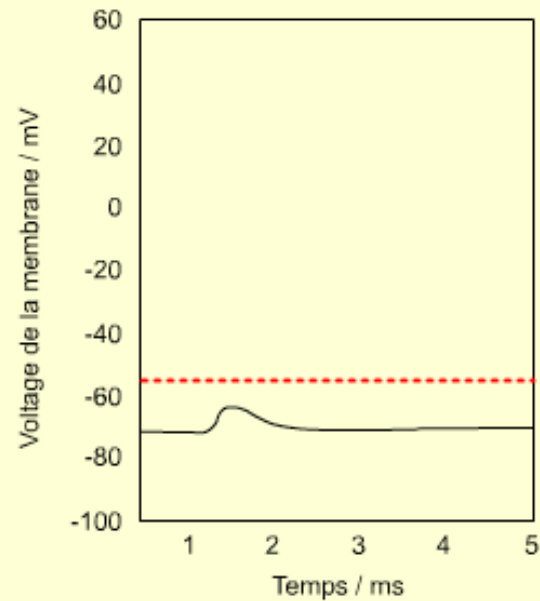
Qtité de courant  
insuffisante pour  
atteindre le seuil  
Pas de PA

Seuil atteint  
Génération  
de PA

qtité de courant  
niveau de dépol  
Fréq. PA

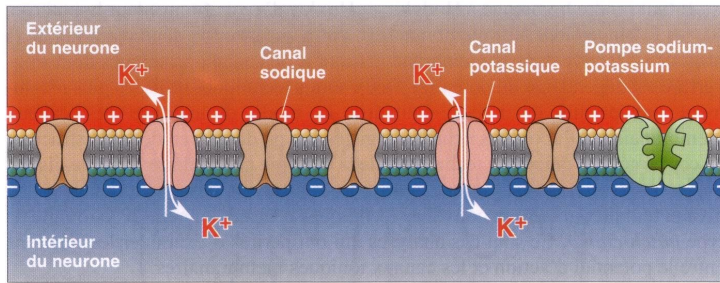
# Description d'un PA

A) le neurone reçoit un potentiel exciteur qui n'atteint pas le seuil d'excitation du neurone et ne peut donc pas générer un nouvel influx nerveux.

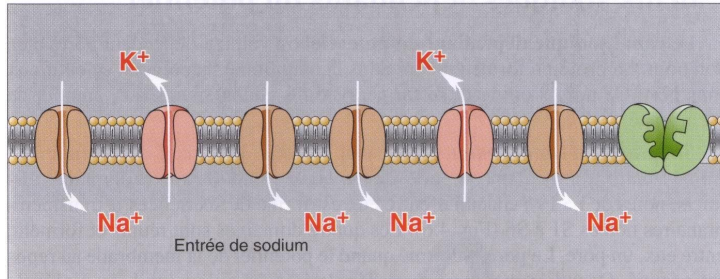


Étapes : A - B - C

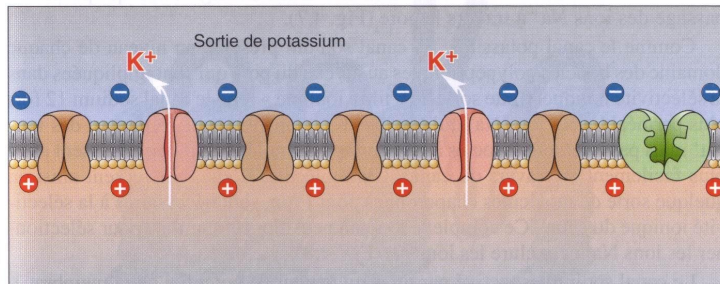




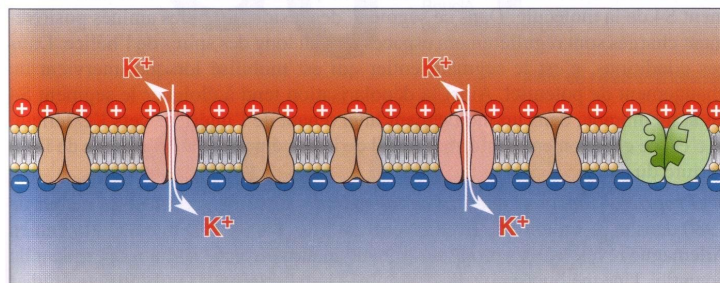
(a)



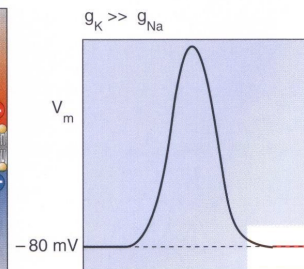
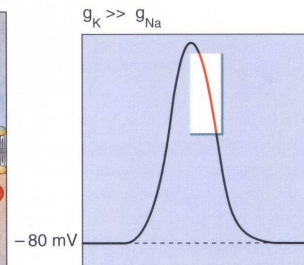
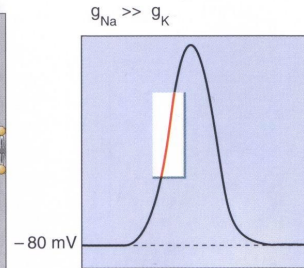
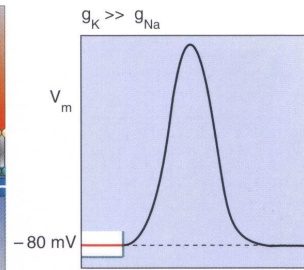
(b)



(c)



(d)



## Repos

Perméabilité du Neurone aux ions  $K^+$ .

$$\text{Donc } V_m = E_K$$

## Ouverture canaux $Na^+$

Frce électromotrice sur  $Na^+$

$V_m$  tends vers  $E_{Na}$  : dépolarisation

## Ouverture canaux $K^+$

Frce électromotrice sur  $K^+$

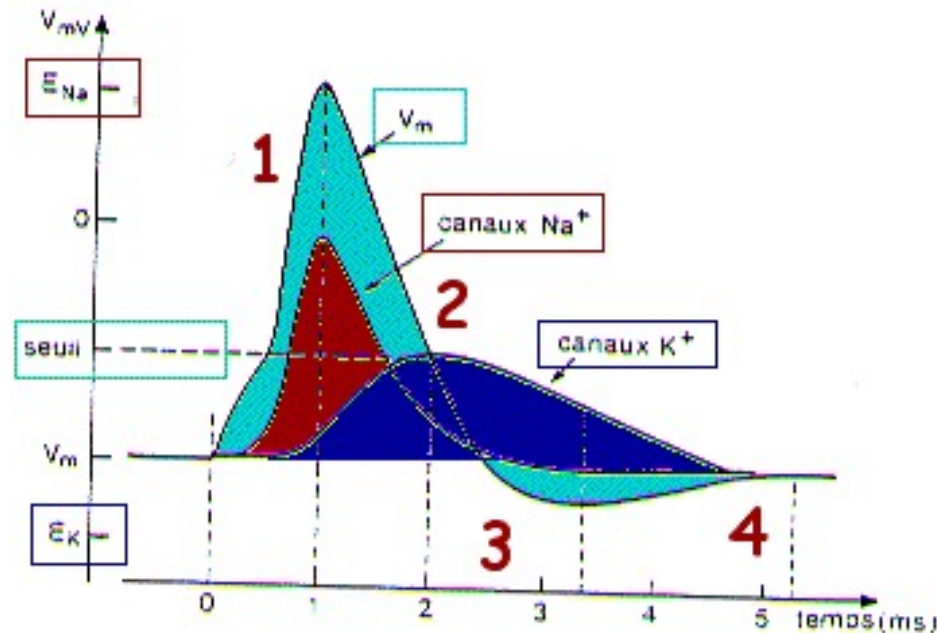
$V_m$  tends vers  $E_K$  : hyperpolarisation

## Retour à l'équilibre

Quand  $V_m = E_K$

$g$  : conductance ionique ;  $V_m$  : potentiel membranaire ;  $E$  : potentiel d'équilibre

# Les différentes phases du PA



**Seuil** : le potentiel membranaire auquel un nombre de canaux sodiques voltage-dépendants s'ouvrent de sorte que la perméabilité ionique de la membrane soit en faveur du  $Na^+$  plutôt que du  $K^+$

**Phase ascendante** : quand l'intérieur de la membrane présente un potentiel négatif, une grande fem s'exerce sur les ions  $Na^+$ . Les  $Na^+$  entrent donc à l'intérieur de la cellule en passant au travers des canaux sodiques :  
dépolarisation rapide

# Les différentes phases du PA

*Phase de potentiel positif* : parce que la perméabilité de la membrane est largement en faveur du sodium, le potentiel membranaire s'établit à une valeur proche de  $E_{Na}$  supérieure à 0mV

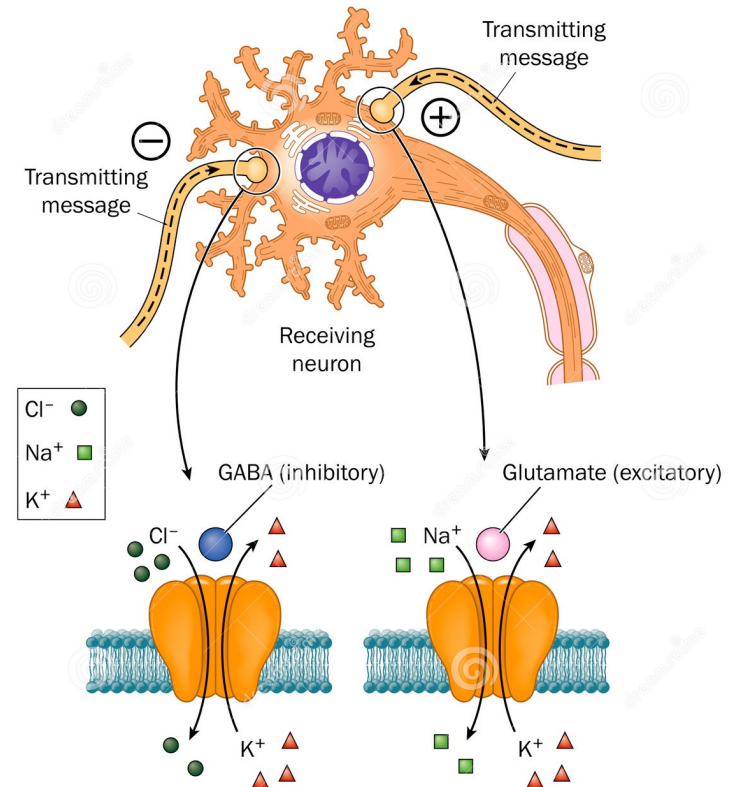
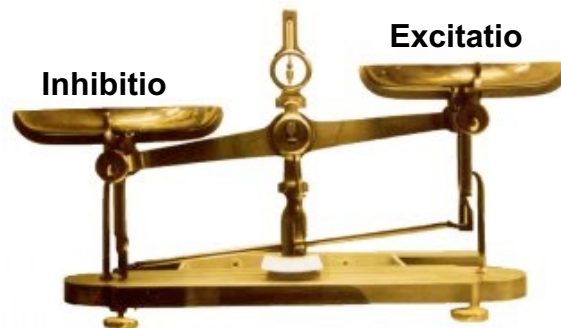
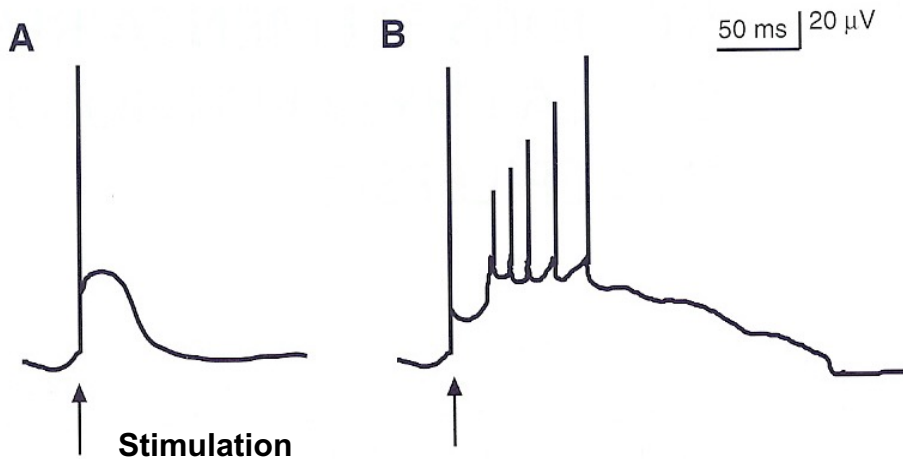
*Phase descendante* : 2 types de canaux jouent un rôle. Canaux  $Na^+$  sont inactivés puis les canaux  $K^+$  s'ouvrent brutalement. Quand la membrane est fortement dépolarisée, une grande fem pousse les ions  $K^+$  en dehors de la cellule

*Point inférieur* : les canaux  $K^+$  augmentent la perméabilité de la membrane au  $K^+$ . Comme la perméabilité au  $Na^+$  est très faible, le potentiel membranaire tend vers  $E_K$  : hyperpolarisation jusqu'à la fermeture des canaux  $K^+$

*Période réfractaire absolue* : les canaux sodiques sont inactifs quand la membrane est fortement dépolarisée. Plus de PA possibles.

*Période réfractaire relative* : le potentiel membranaire est hyperpolarisé tant que les canaux  $K^+$  sont ouverts. Ainsi il faut plus de courant dépolarisant pour que le potentiel membranaire atteigne le seuil de dépolarisation

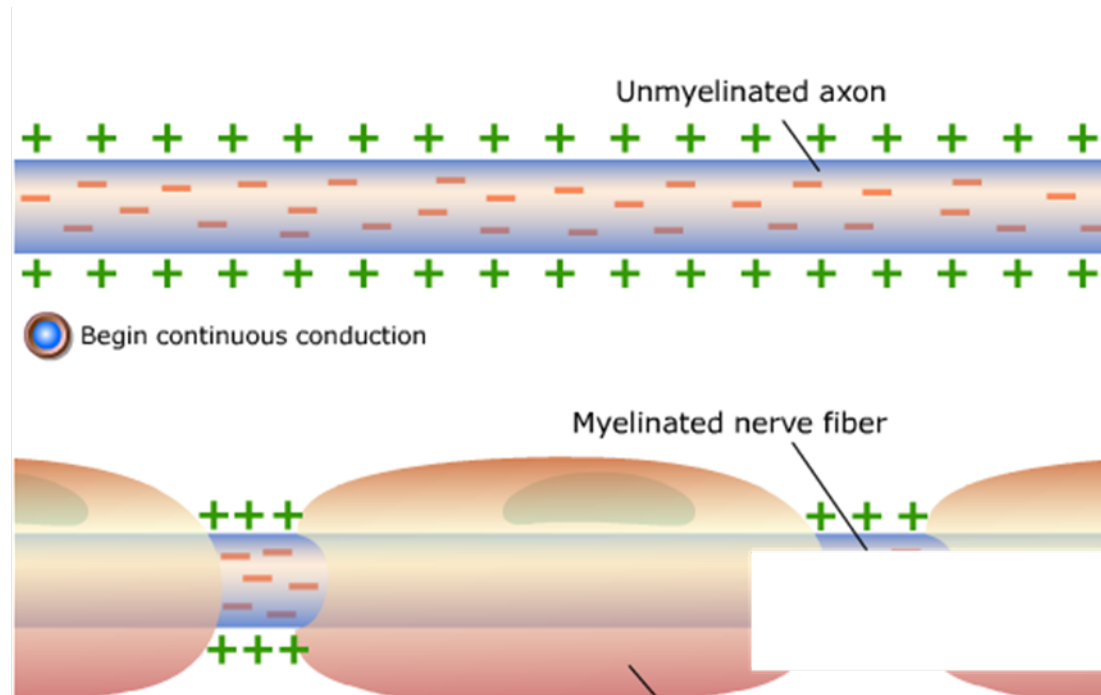
# Dysfonctionnement chimique et électrique





# Conduction de l'influx nerveux

## Conduction en continu



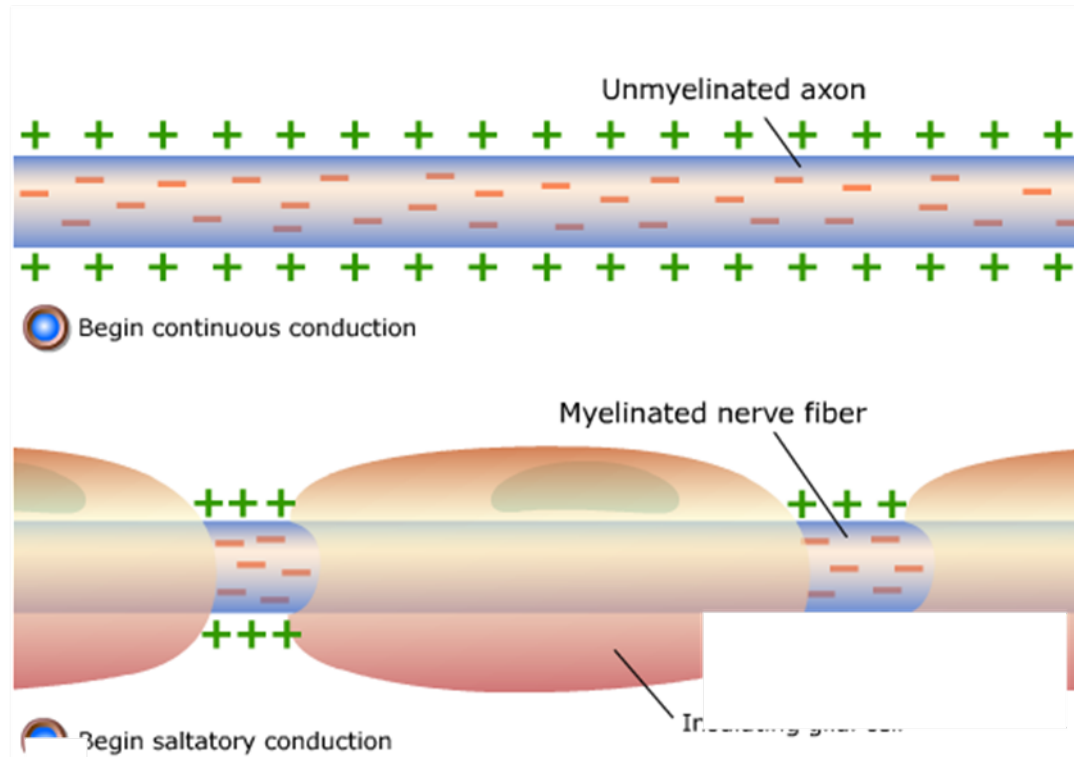
Fibres amyélinisées

Variations des courants électriques locaux induit par l'ouverture des canaux sodiques « voltage-dépendants »

Ex : « Marche pas à pas l'un derrière l'autre »

# Conduction de l'influx nerveux

## Conduction saltatoire



Nœud de Ranvier: gde [ ] de canaux sodiques voltage-dépendants

Distance entre nœuds : 0,2 à 2 mm

Ex: « Marche en sautillant »

# Vitesse de déplacement de l'influx nerveux

~ 3 Km / heure à ~ 300 Km / heure

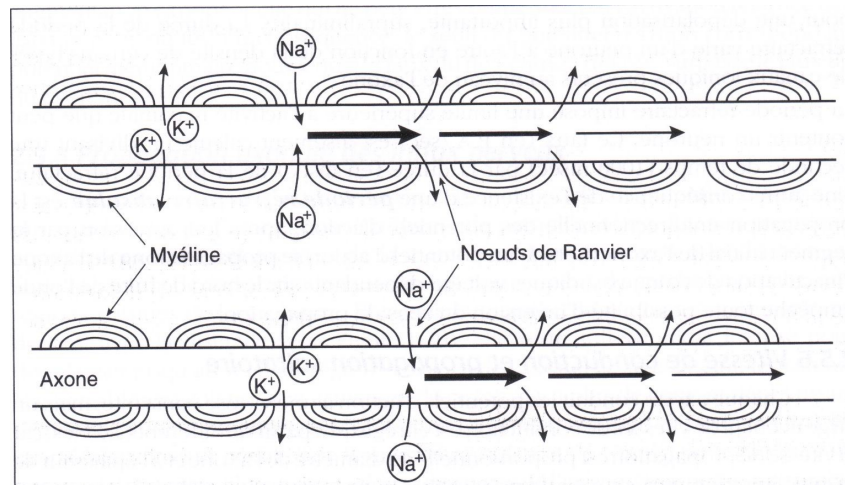
Vitesse dépend:

- Diamètre de la fibre nerveuse :  $\uparrow$  diamètre  $\rightarrow \uparrow$  vitesse

Un gros  $\varnothing$  entraîne une résistance cytoplasmique faible donc une vitesse de conduction élevée

- Présence de myéline  $\rightarrow \uparrow$  vitesse

De même, la myélinisation augmente la résistance de la mb (barrière au flux ionique) ce qui augmente la vitesse de conduction (conduction saltatoire)

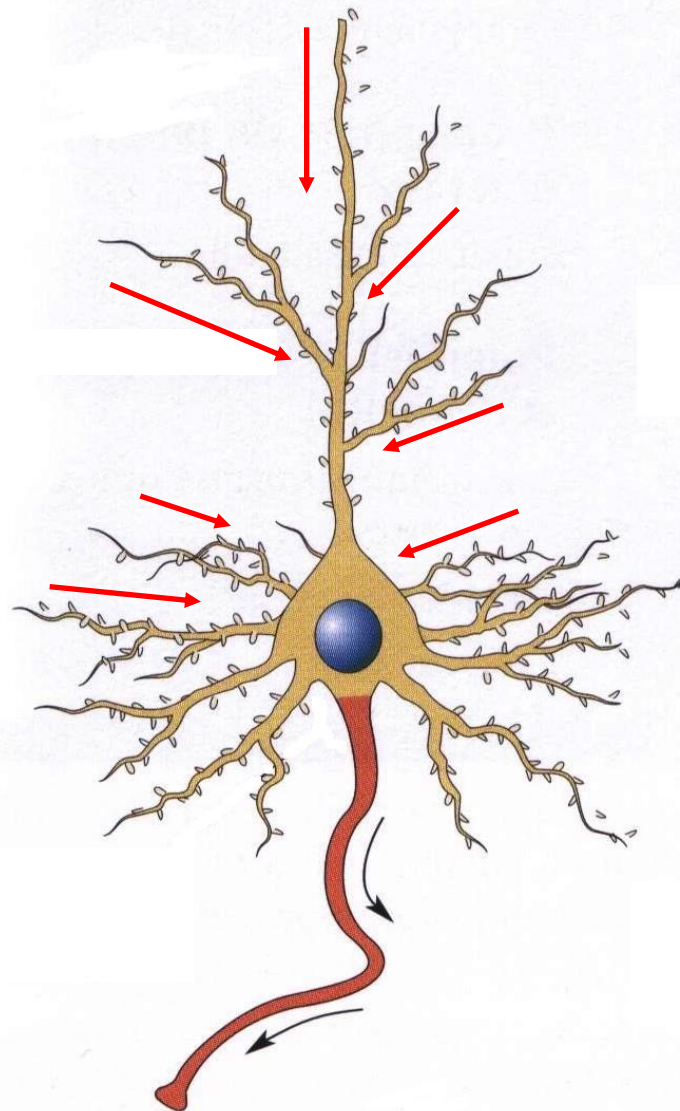


# Polarisation du neurone

**Arborescence  
dendrites**

**Corps  
cellulaire**

**Axone**



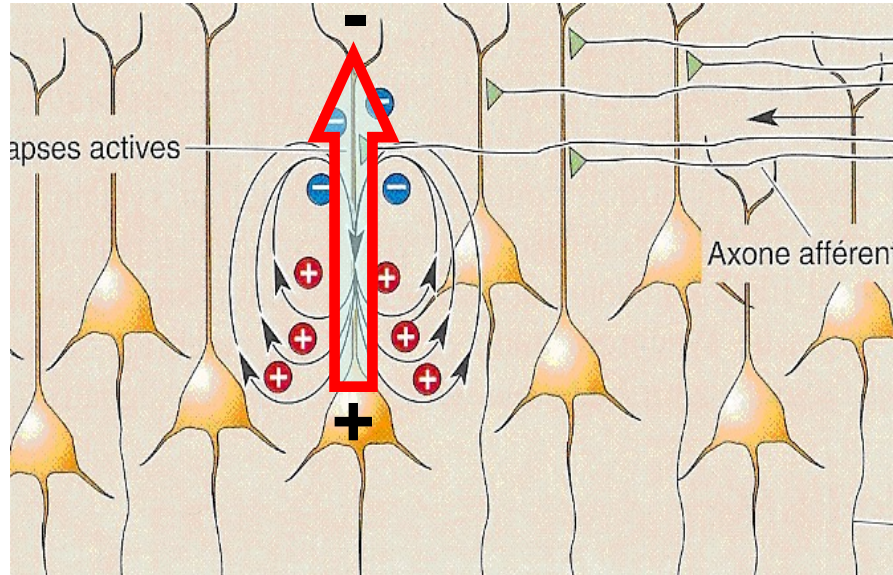
**Recueil de l'influx  
nerveux**

**Analyse  
Intégration**

**Transmission de  
l'influx nerveux**



# Modélisation dipolaire



*Champs électriques générés par les courants synaptiques au niveau des cellules pyramidales du cerveau*

1. Activation de l'axone afférent
2. Libération du neurotransmetteur
3. Ouverture des canaux cationiques (+)
4. Entrée des ions + dans la dendrite  
→ milieu extracellulaire (-)
5. Diffusion du courant vers le soma  
→ milieu extracellulaire (+)

Modélisation d'un neurone activé par un dipôle électrique

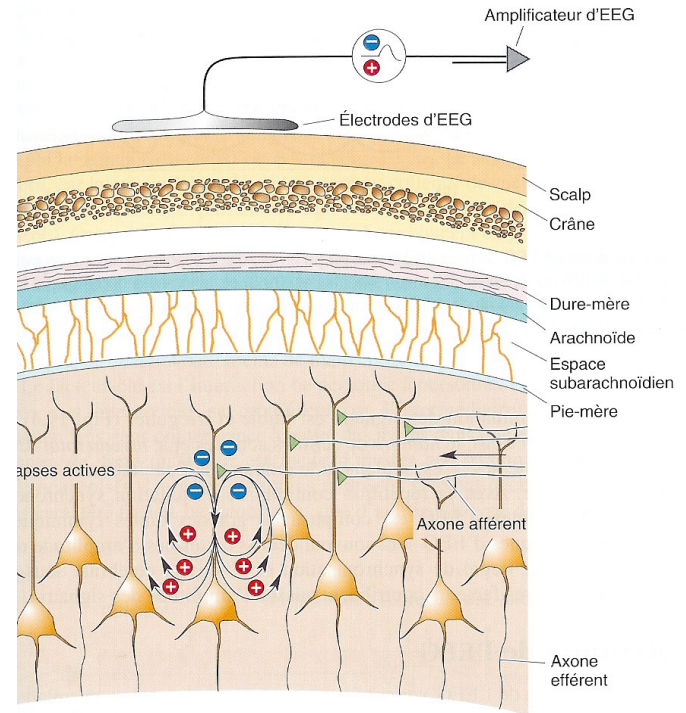
→ vecteur : origine, direction, sens, amplitude (dépend du nbr de neurone activé)

# Neurophysiologie à l'échelle cérébrale

## Origine des potentiels bioélectriques

L'EEG mesure surtout les émissions de courant qui ont lieu au cours de l'activation synaptique des dendrites (potentiels post-synaptiques)

Cellules nerveuses impliquées : neurones pyramidaux du cortex cérébral (80% Masse du cerveau)



*Champs électriques générés par les courants synaptiques au niveau des cellules pyramidales*

# Origine des potentiels bioélectriques

Les potentiels mesurés en EEG peuvent être générés :

- soit par les courants associés aux potentiels d'action,
- soit par les courants associés aux potentiels post-synaptiques,
- soit par une combinaison des deux.

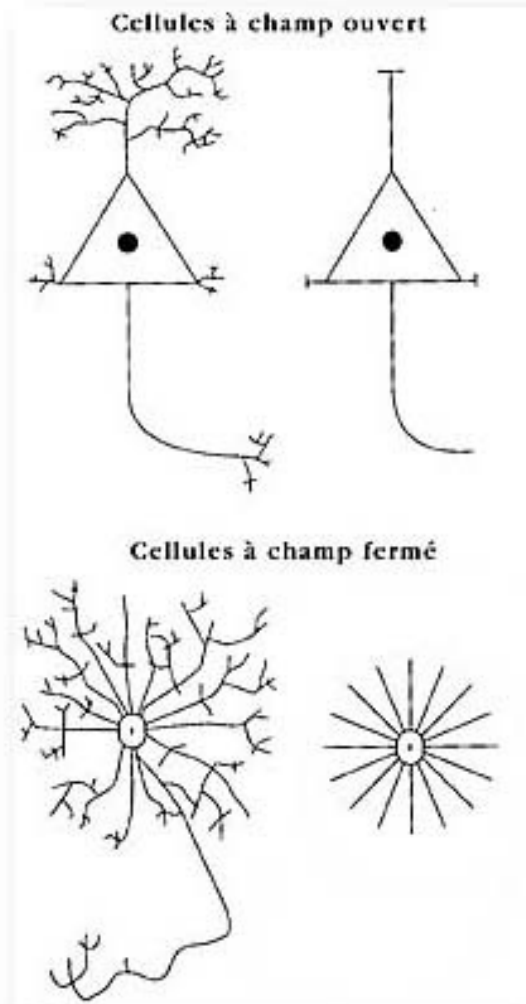
→ L'expérience montre (Elul 1972) que le signal EEG recueilli sur le scalp provient majoritairement de la contribution des potentiels post-synaptiques, beaucoup plus persistants (durée plus longue) que les potentiels d'action.

# Origine des potentiels bioélectriques

On distingue deux formes principales de cellules nerveuses :

- les cellules de type pyramidal (à champ ouvert ou open field)
- les cellules en étoile (à champ fermé ou closed field)

L'organisation géométrique des cellules en étoile fait que les courants produits ont tendance à s'annuler alors que les courants produits par un ensemble de cellules pyramidales (généralement orienté perpendiculairement à la couche corticale) génèrent des différences de potentiels sur le scalp





Contribution au signal d'un seul neurone: très faible

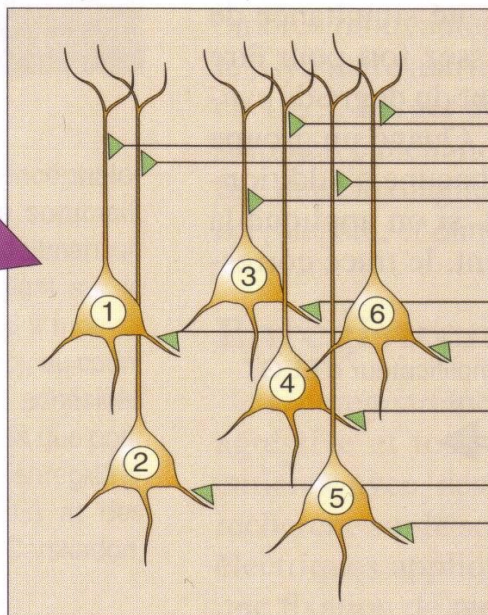
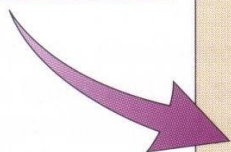
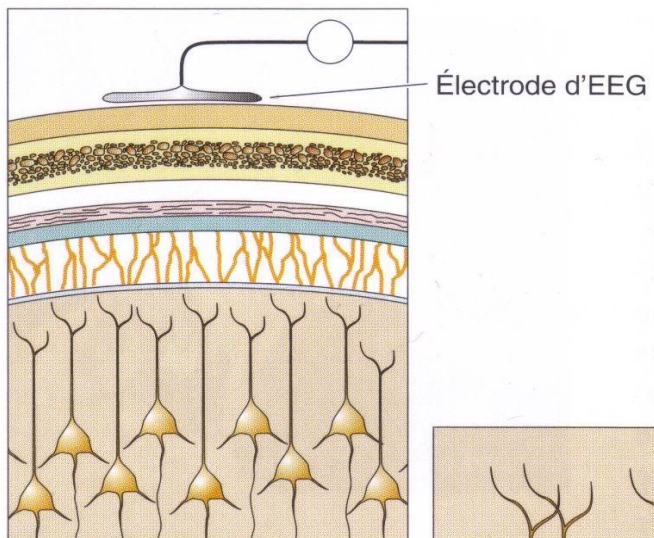
De plus, le courant doit pénétrer plusieurs couches de tissus (méninges, os, peau) avant d'être enregistré en surface par les électrodes

Comment est généré le signal EEG ?

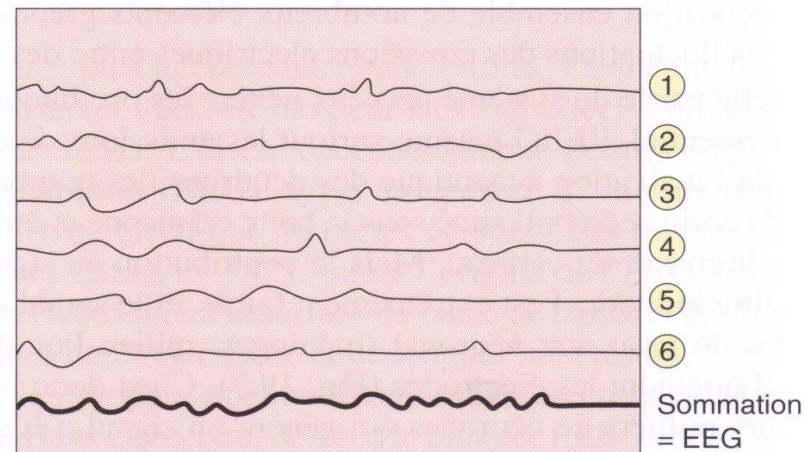
→ Activité simultanée d'un ensemble ( $10^7$  à  $10^9$ ) de neurones (6 cm<sup>2</sup>) qui génère un signal EEG assez puissant pour être perçu.

L'amplitude du signal va donc dépendre fortement du degré de synchronisation de l'activité des neurones.

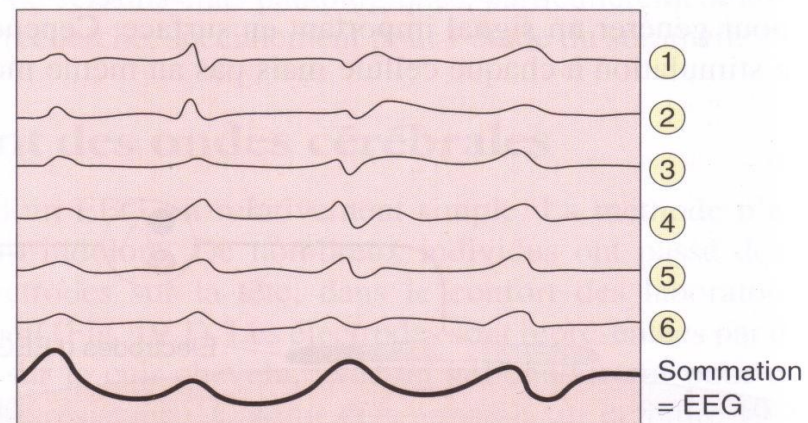
Quand un groupe de neurones est excité simultanément, les faibles signaux s'additionnent pour générer un signal important ( $\mu\text{V}$ !!!)



Décharge irrégulière



Décharge synchronisée

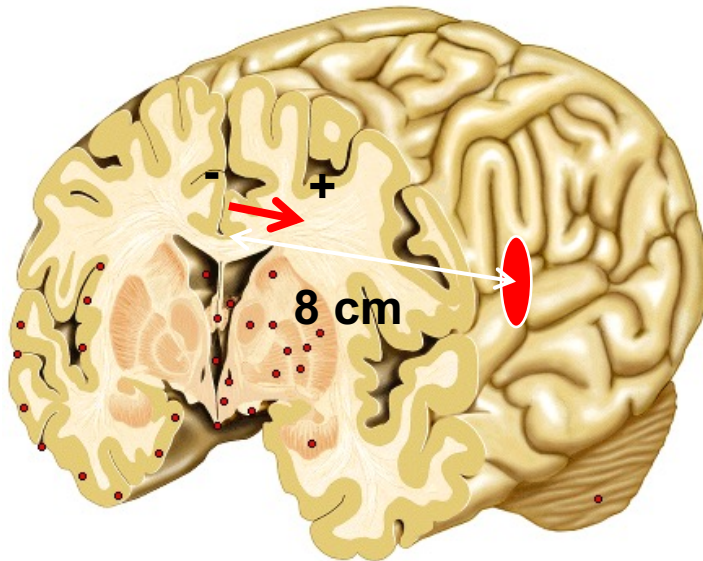


## Limites de l'EEG de surface:

Il faut savoir que le potentiel diminue avec le carré de la distance entre le générateur et le point d'enregistrement (problème pour les sources profondes)

De plus, le crâne atténue l'amplitude du signal (facteur 5)

Source  $500\mu\text{V}$   $\rightarrow$   $8\mu\text{V}$  si électrode à 8cm du générateur / 5 (crâne) =  $1,6\mu\text{V}$  (~bruit) !!!



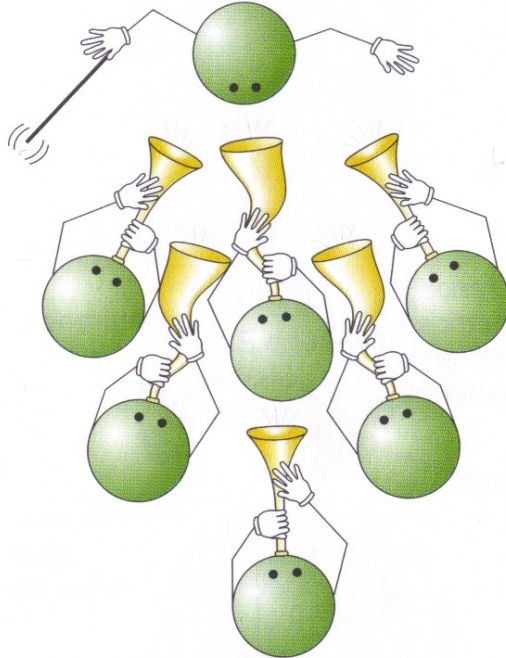
| Tissus            | Conductivités<br>( Ohm/cm) |
|-------------------|----------------------------|
|                   |                            |
| Scalp             | 230                        |
| Crâne             | 16 000                     |
| Substance grise   | 350                        |
| Substance blanche | 650                        |

# Synchronisation neuronale

2 grandes façons de synchroniser les oscillations périodiques d'un ensemble de neurones :

- L'activation de tous ces neurones peut dépendre d'un même générateur central ou *pacemaker*

Analogie : un chef d'orchestre face à ces musiciens qui suivent le rythme



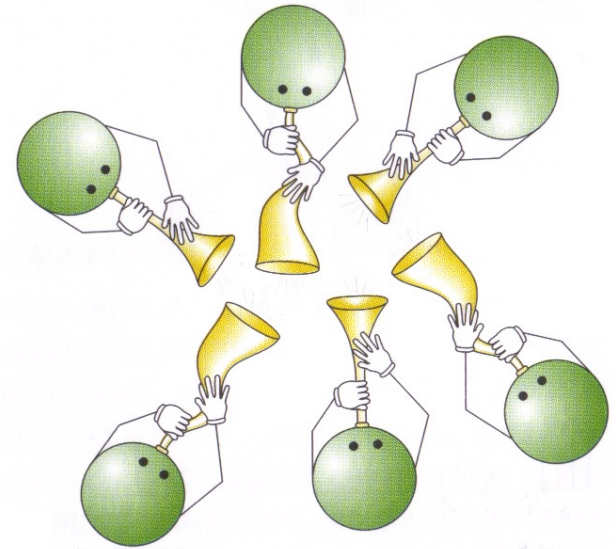
*Synchronisation à partir d'un  
générateur unique (pacemaker)*



- Les neurones se donnent eux-mêmes la mesure en s'excitant ou en s'inhibant mutuellement.

Analogie : Séance de jazz improvisé où chaque musicien s'écoute l'un l'autre en se regardant et ils ajustent leur fréquence pour être en phase.

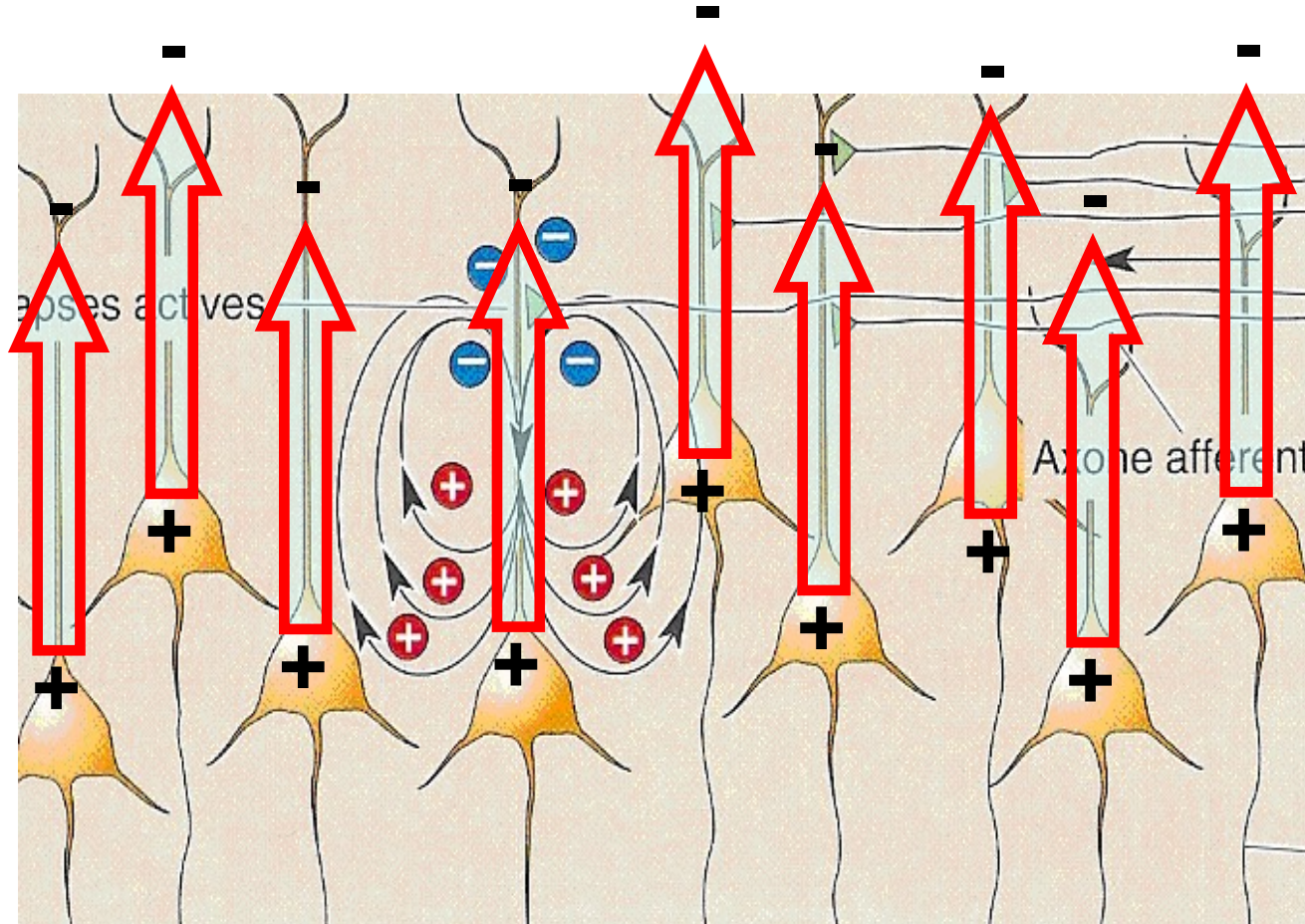
*Synchronisation obtenue grâce à un comportement collectif de tous les participants*



Donc 2 grands principes de synchronisation :

- Activation neuronale dépendant seulement d'un seul générateur (pacemaker)
- Activation neuronale collective (excitation / inhibition réciproque)

# Modélisation dipolaire des générateurs intra-cérébraux



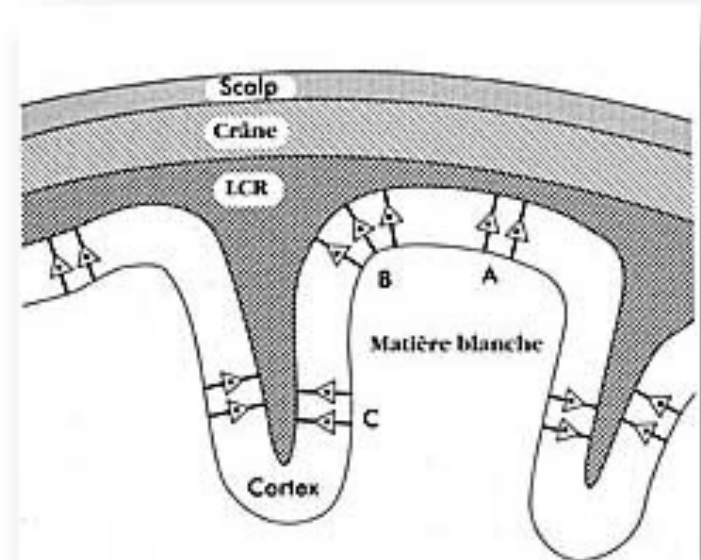
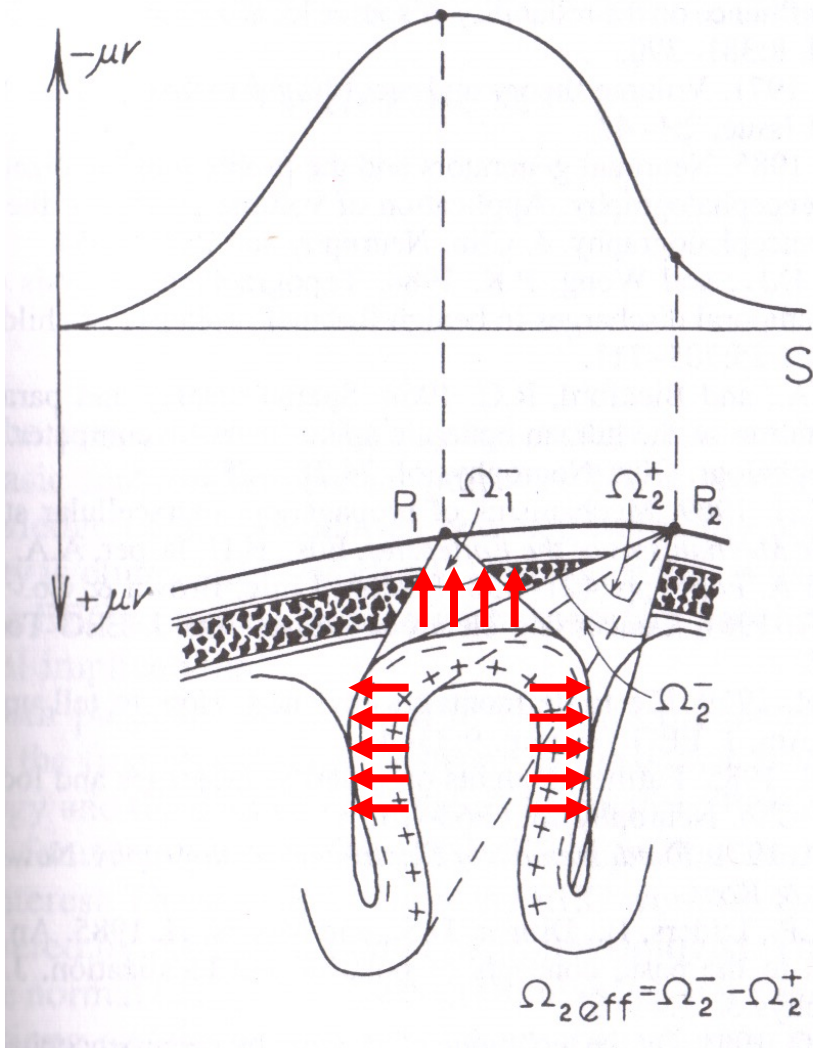
$\Sigma$  dipôles électriques élémentaires = dipôle électrique équivalent

*Champs électriques de surface vont dépendre :*

*- Origine - Amplitude - Orientation - Direction*

# Orientation dipolaire et structure cérébrale

Orientation des cellules pyramidales du cortex par rapport aux différents milieux.

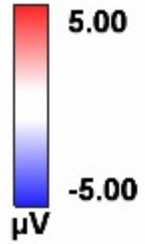


Ce schéma représente les différentes orientations possibles des cellules pyramidales du cortex en fonction de leur localisation sur des gyri (a), dans des sillons corticaux (c) ou dans des parties intermédiaires (b).

# Dipôle tangentiel

10:34:58.688

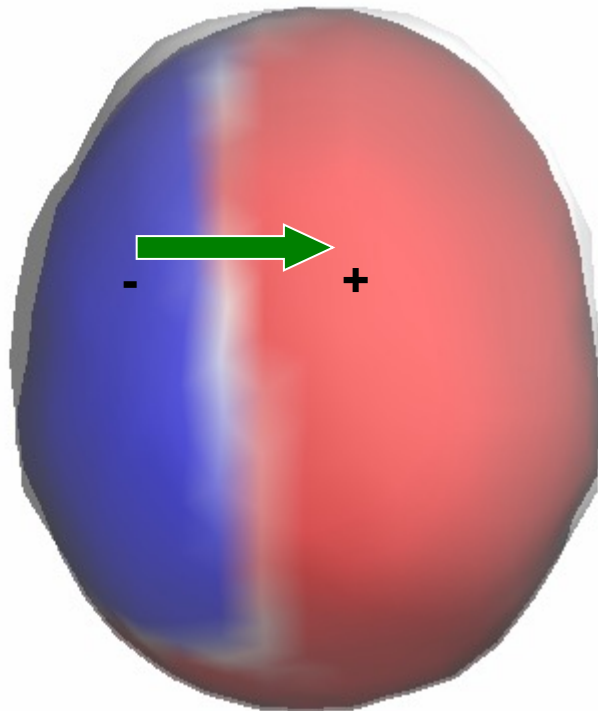
10:34:58.688



*Vue de dessus*

*Vue de face*

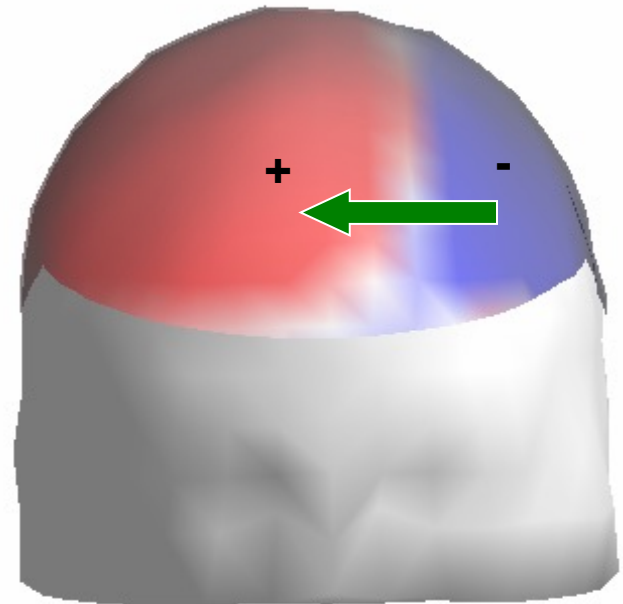
L



R

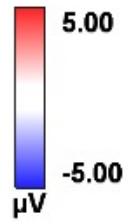
R

L





# Dipôle radial

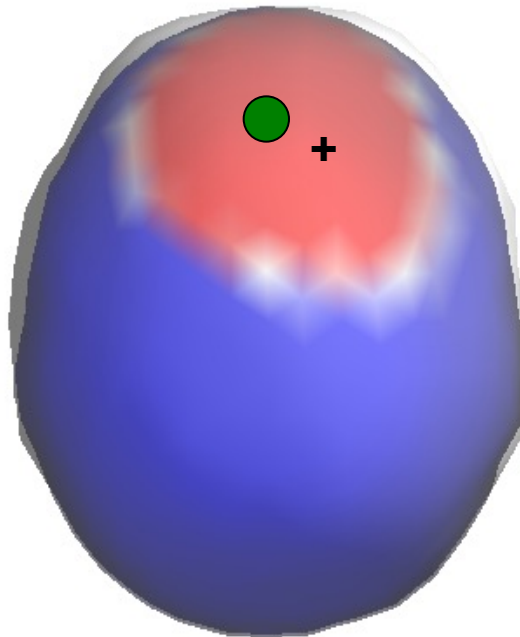


10:35:31.688

*Vue de dessus*

*Nose*

L

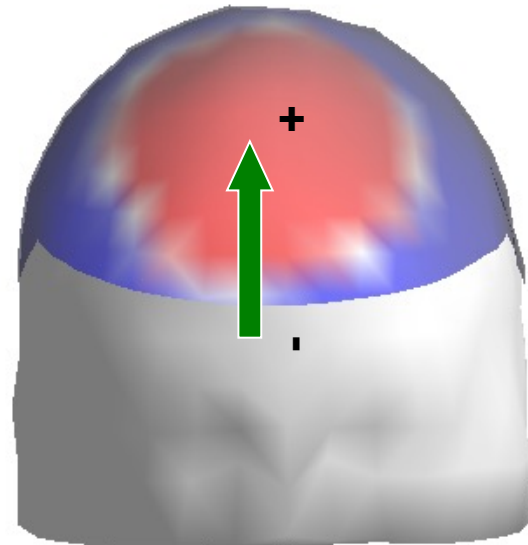


R

R

10:35:31.688

*Vue de face*



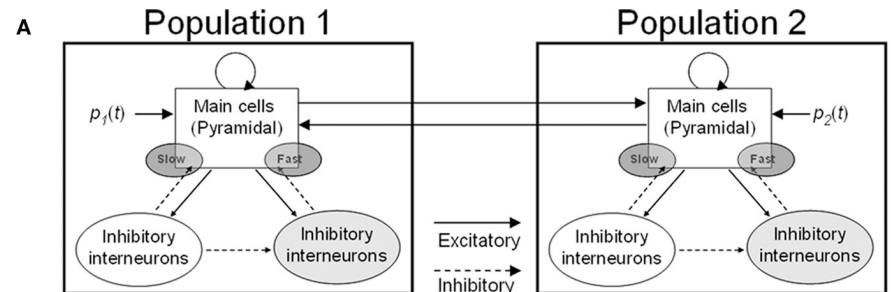
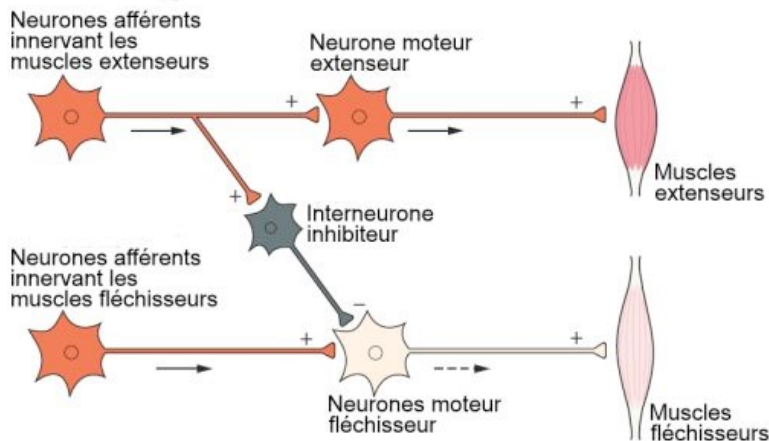
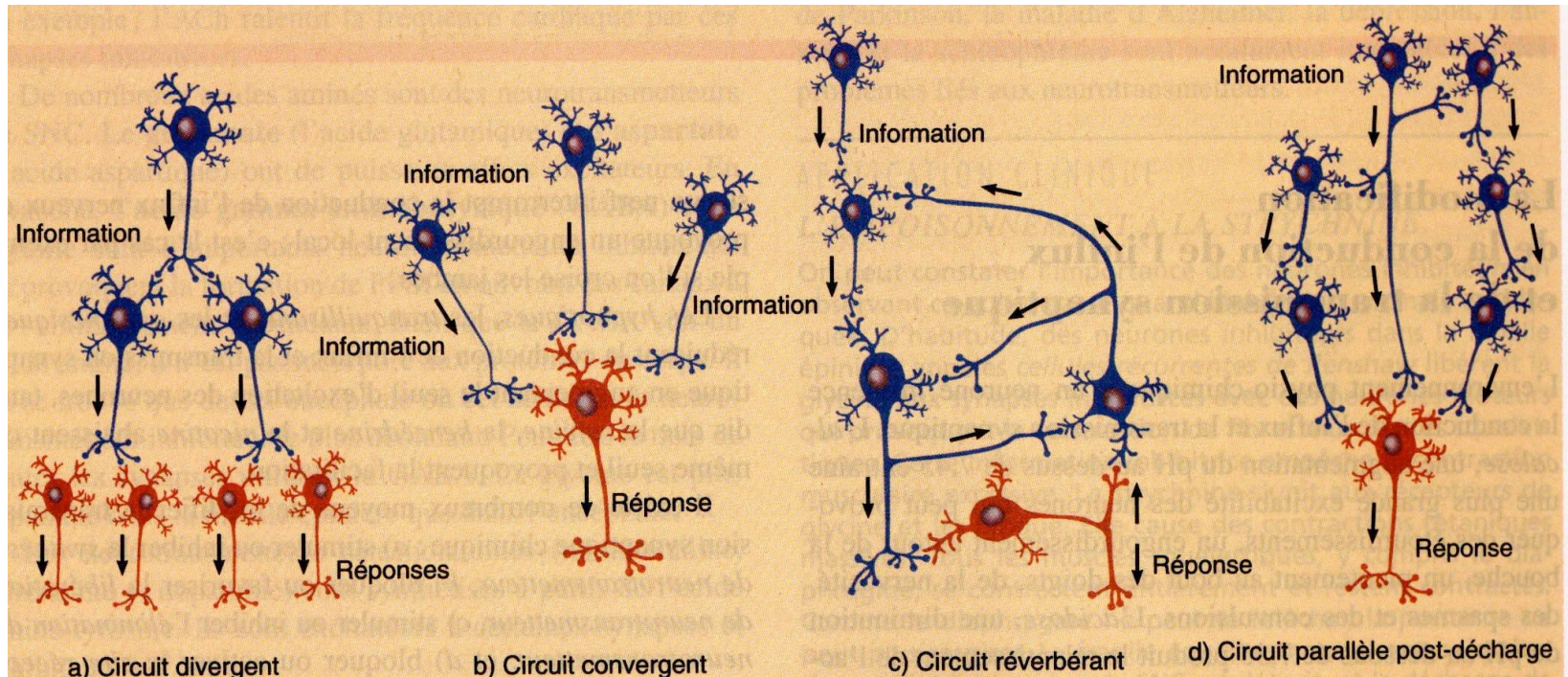
L

# Conclusion

Potentiels électriques de surface dépendent :

- de la sommation des potentiels post-synaptiques au niveau des dendrites des neurones pyramidaux.
- de l'activation simultanée (synchronie) d'un nombre suffisant de neurones.
- du dipôle équivalent : origine (proche de la surface,  $1/d^2$ ), amplitude, son orientation et sa direction.

# Connexion en réseau





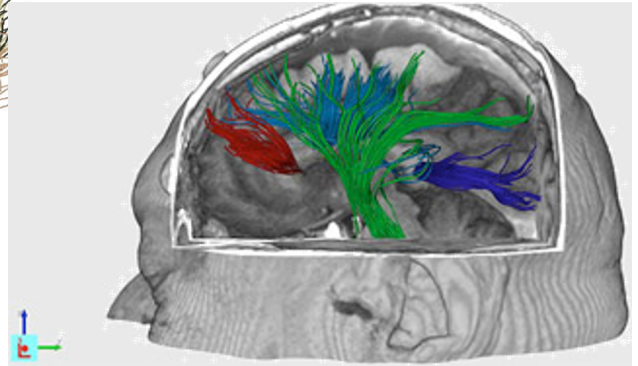
# Connexion en réseau



35-50 mm



65-80 mm



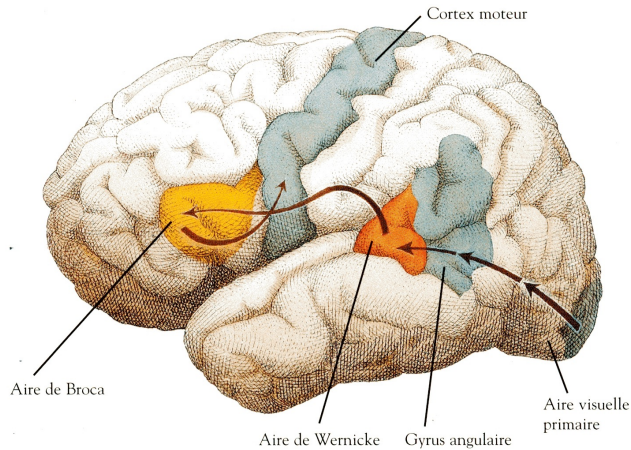
95-110 mm



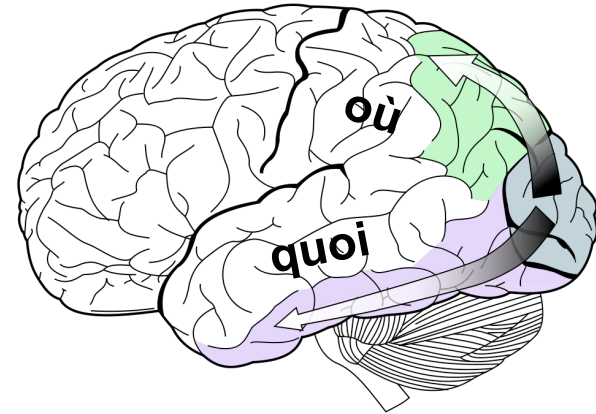
130-150 mm



# Connexion en réseau

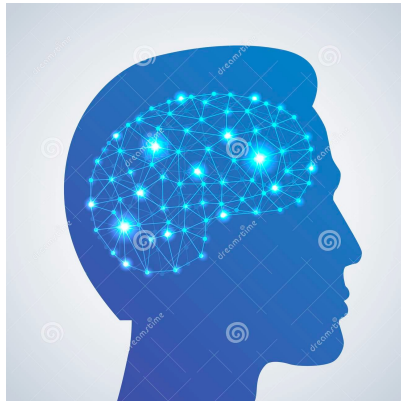


Réseau de la lecture



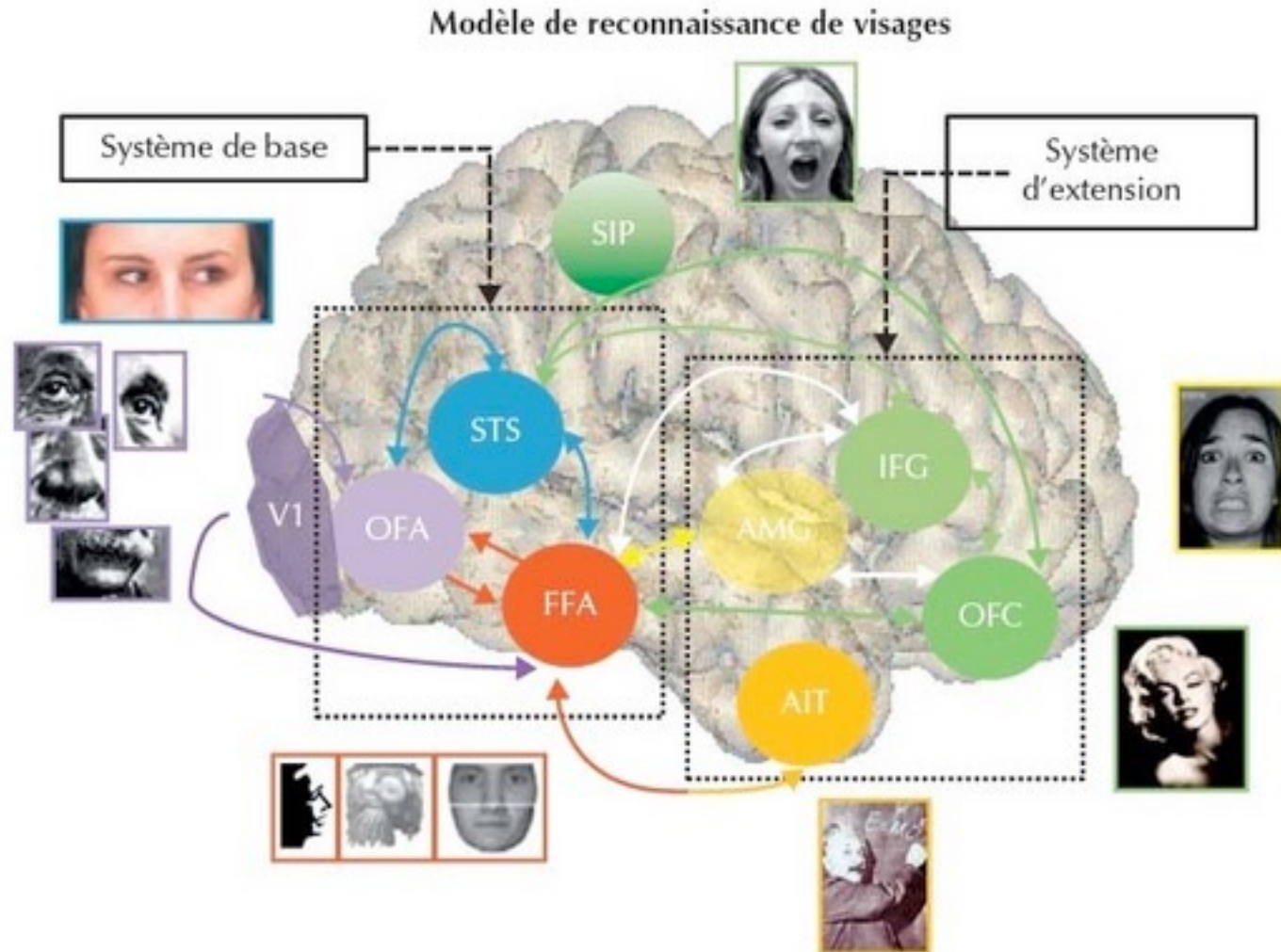
Réseau de la reconnaissance visuelle

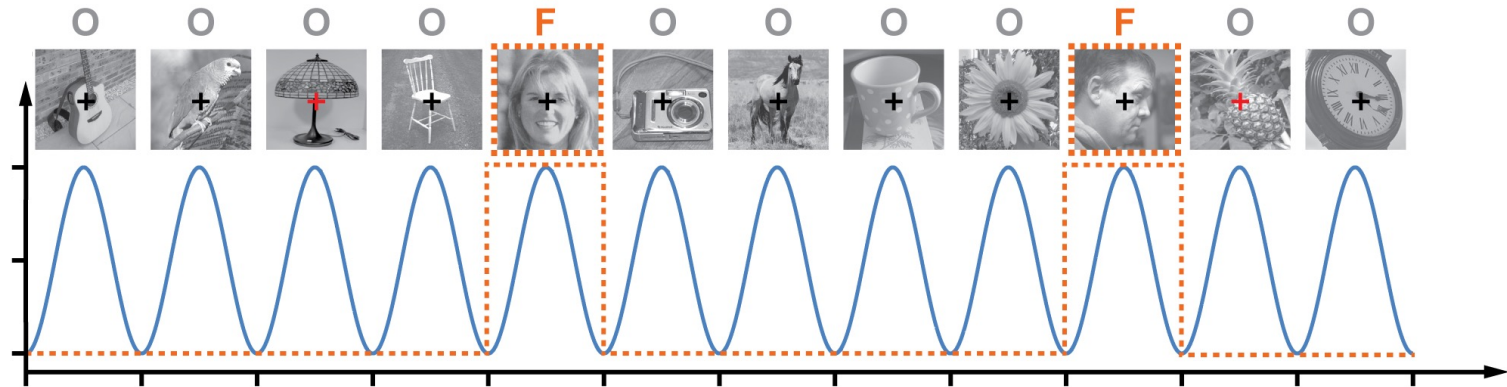
100 milliards de neurones +  $10^{14}$  synapses = réseau vaste et hyper-connecté !!!



Facebook, **que** 1,35 milliards d'individus + 338 interconnexions (amis) en moyenne dans le monde

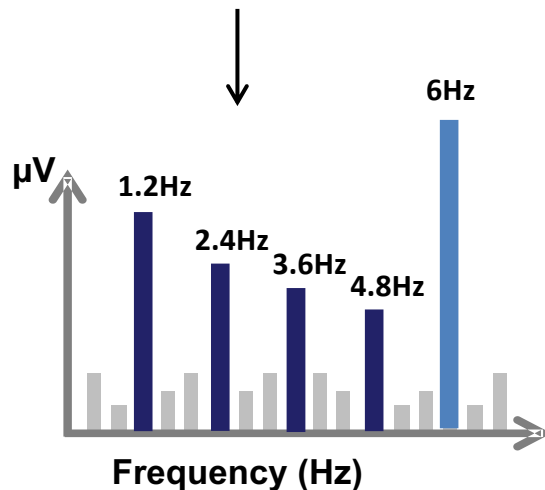
# Réseau de la reconnaissance des visages





— Base frequency = 6 Hz    — Oddball frequency (faces) = 1.2 Hz (6 Hz / 5)

*FFT analysis*

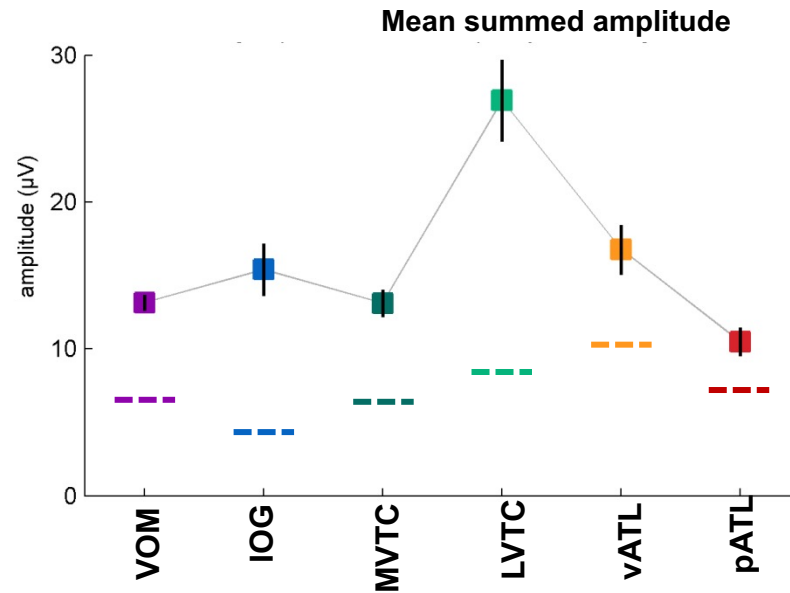
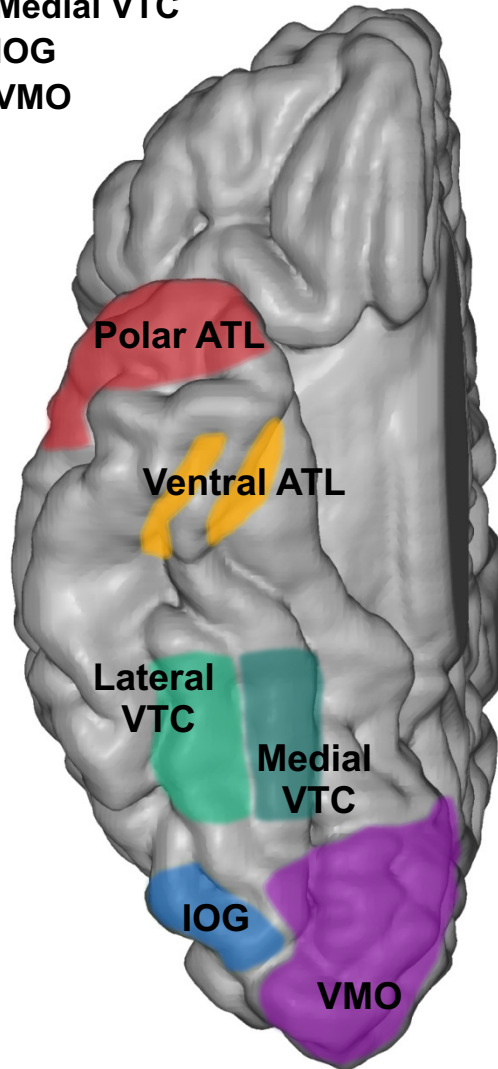


— general visual responses  
to all objects  
(base frequency)

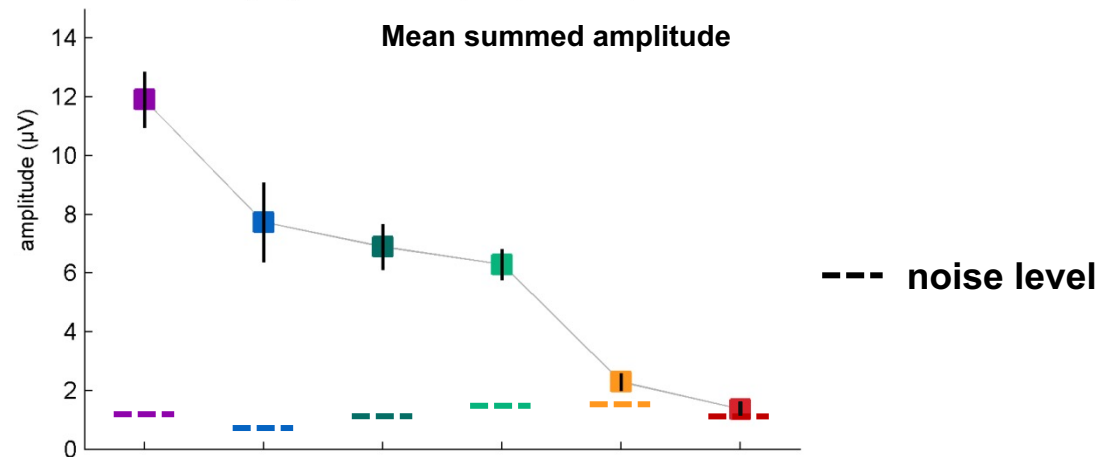
— responses selective to faces  
(oddball frequency)

# Réponse aux visages à 1,2 Hz

- Polar ATL
- Ventral ATL
- Lateral VTC
- Medial VTC
- IOG
- VMO



## Réponse visuelle générale à 6Hz



posterior ← → anterior



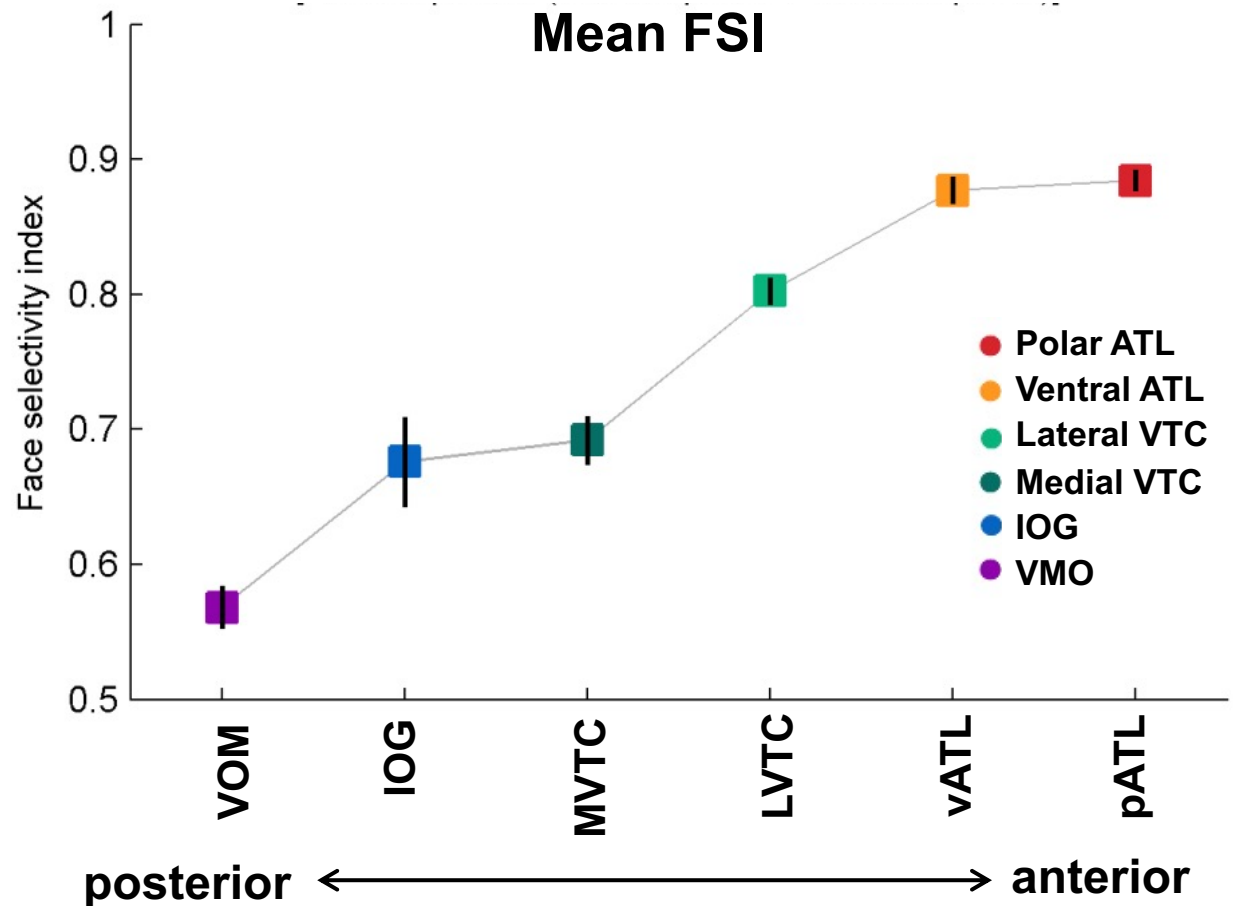
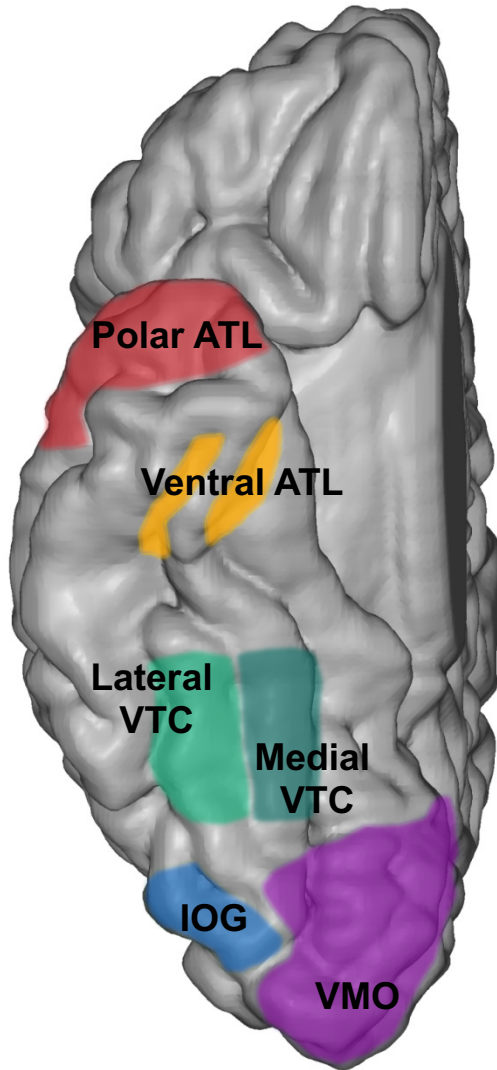
# Index de sélectivité aux visages

$$FSI = \frac{\text{face response}}{(\text{general visual response} + \text{face response})}$$

FSI reflects the degree to which the response at a given contact is dominated by

- Réponse visuelle générale : proche de 0
- Réponse spécifique aux visages : proche de 1

# An increase of face-selectivity along the visual ventral stream



# Stimulation électrique fonctionnelle



Hallucination Autoscopique

# Stimulation électrique fonctionnelle



Altération de la reconnaissance



# Stimulation électrique fonctionnelle



Altération de la reconnaissance

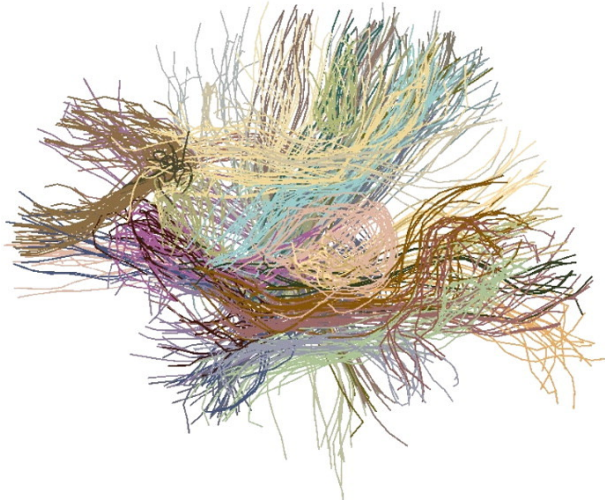
# Réseaux épileptiques



35-50 mm



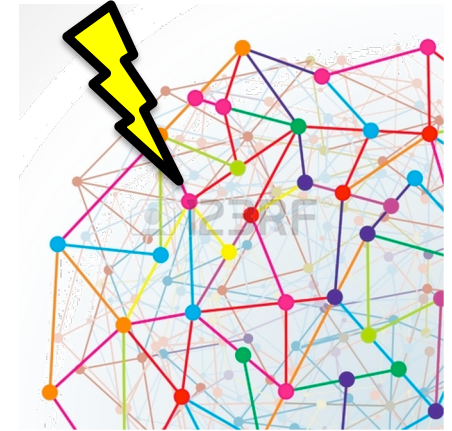
65-80 mm



95-110 mm



130-150 mm

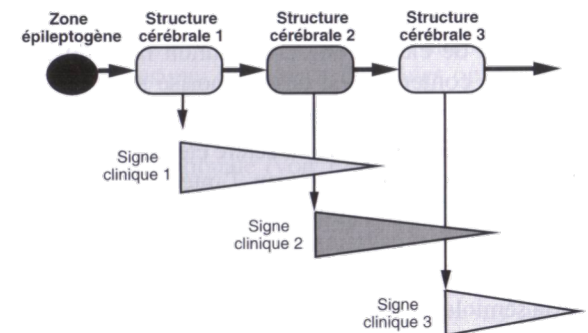
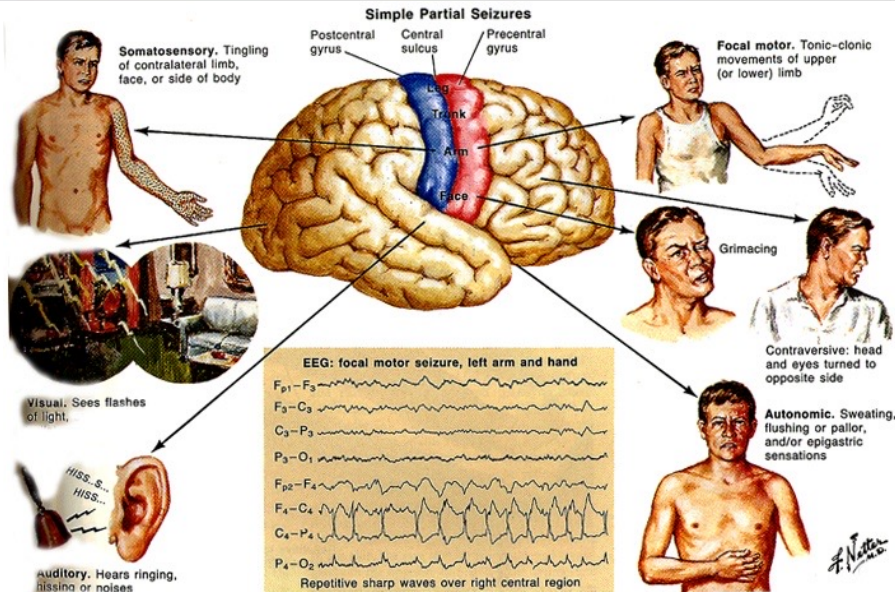
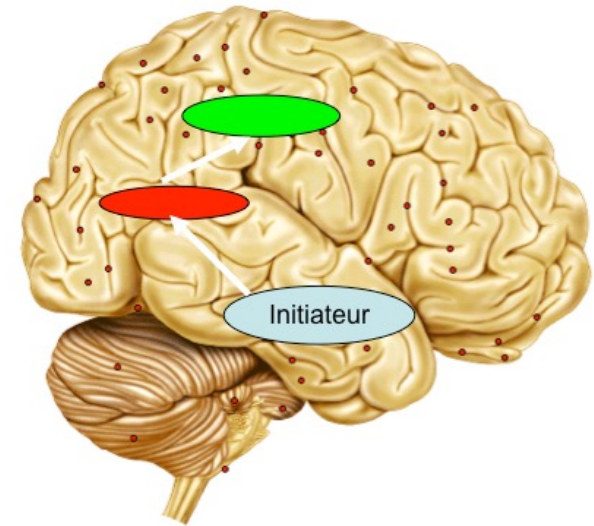
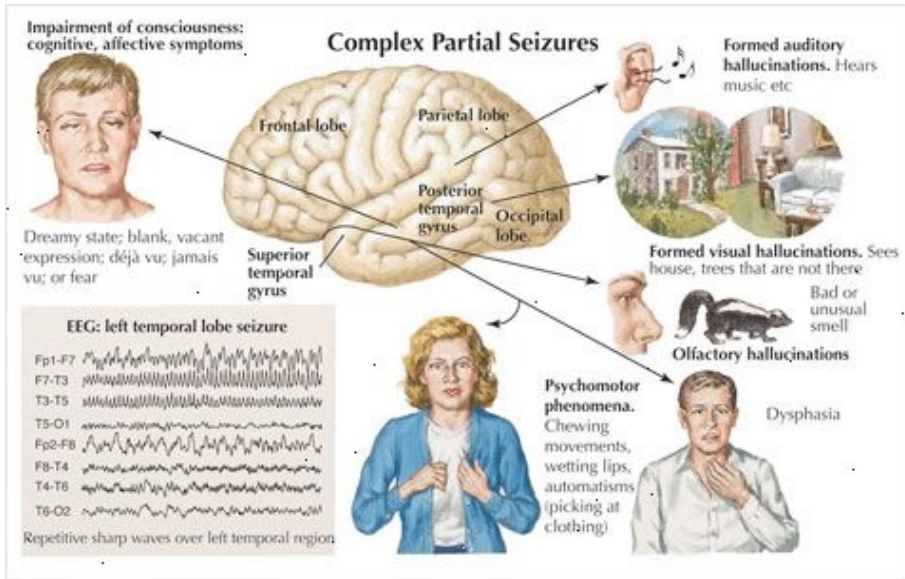


Pacemaker + propagation



Symptômes différents

# Réseaux épileptiques

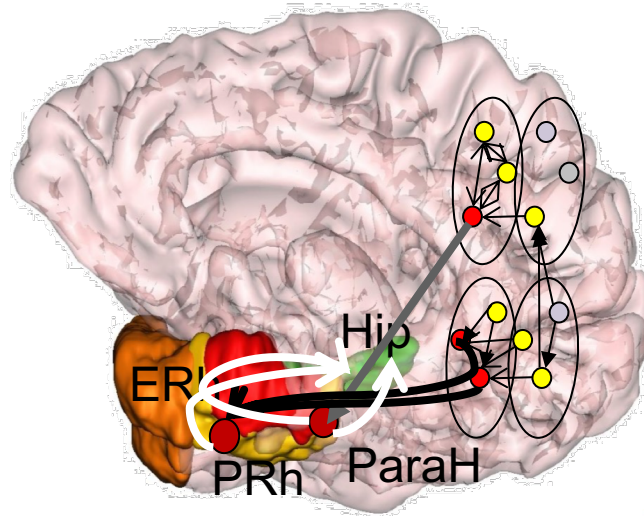




# POTENTIELS EVOQUÉS CORTICO-CORTICAUX : ÉTUDE DE LA VOIE VISUELLE VENTRALE EN ETUDE SEEG

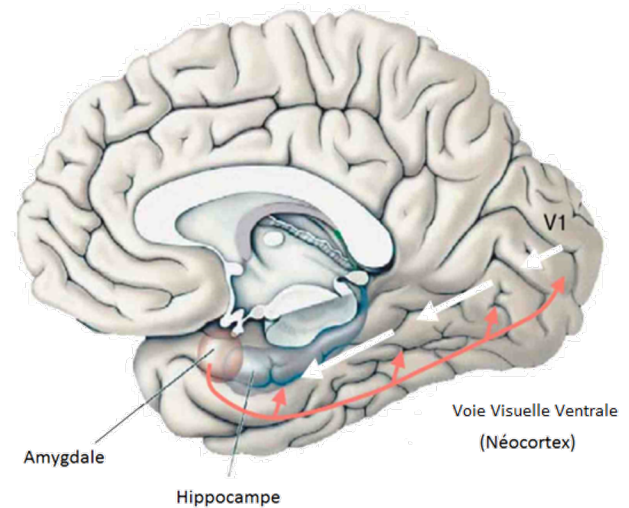
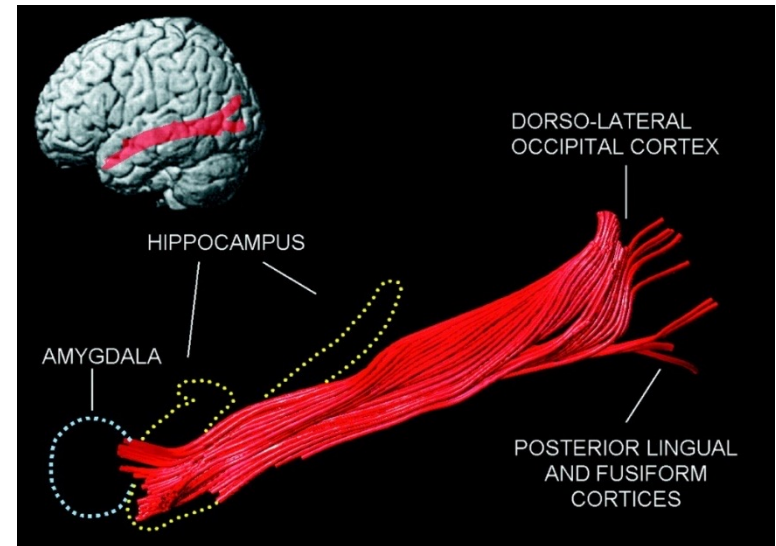
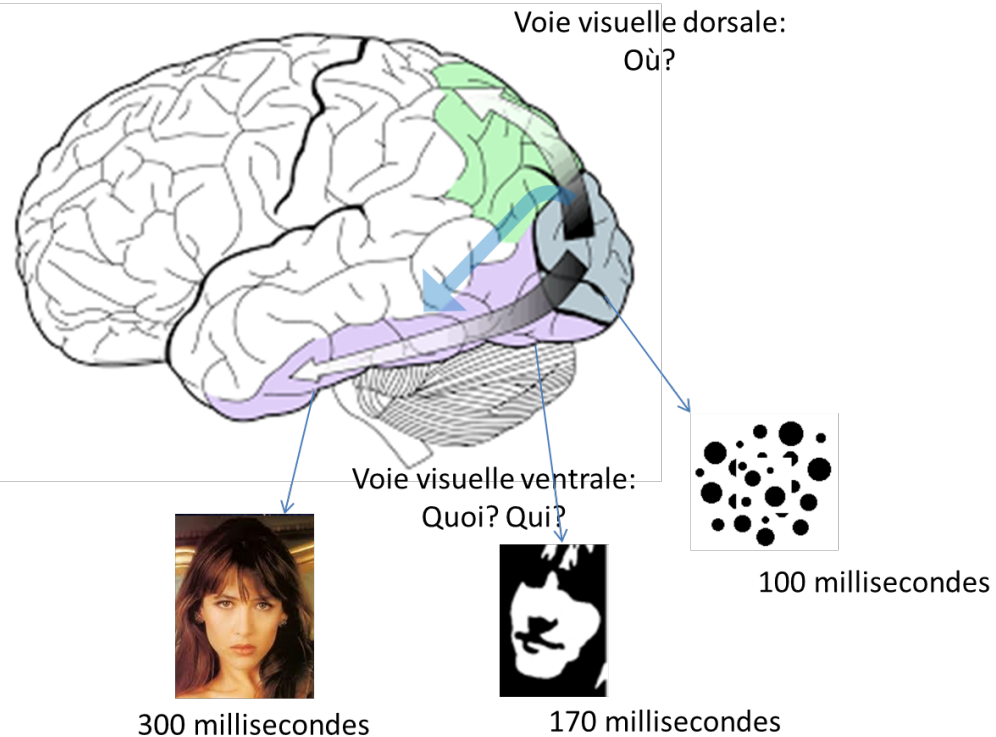
Laurent KOESSLER <sup>1,2</sup>

1. Neurosciences des systemes et de la cognition, UMR 7039 CNRS, Nancy
2. Unité d'épileptologie, CHRU Nancy





# Contexte



# Problématique

- Peut-on distinguer les structures mnésiques et perceptives par un modèle connexionniste ?
- Quelles sont les structures à l'interface des systèmes mnésique et perceptif ?

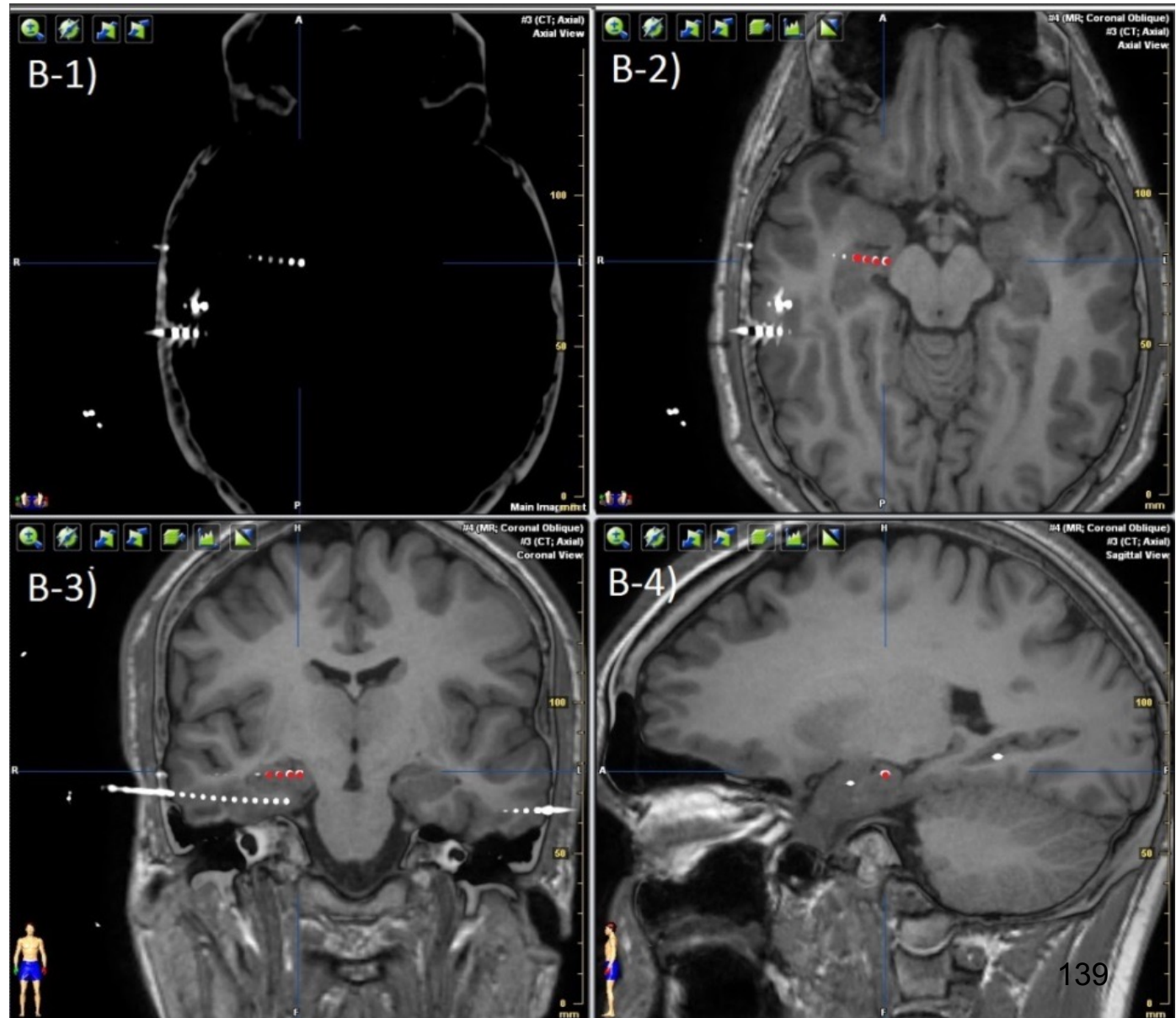
## Objectif de l'étude

Utiliser les stimulations électriques focales intracérébrales et les CCEPs pour étudier la connectivité effective au sein de la voie visuelle ventrale

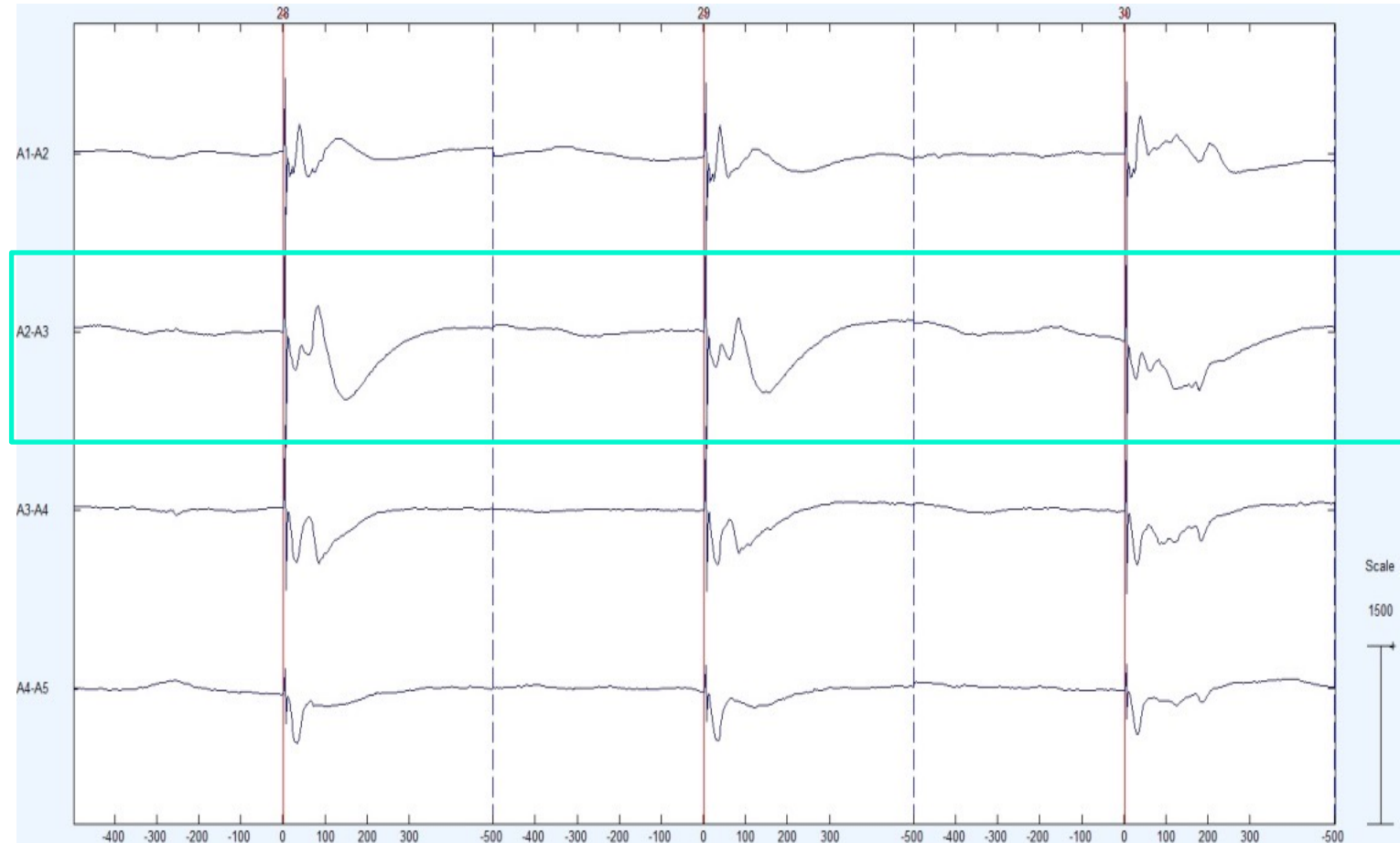
# Méthode

hippocampe

484  
1025

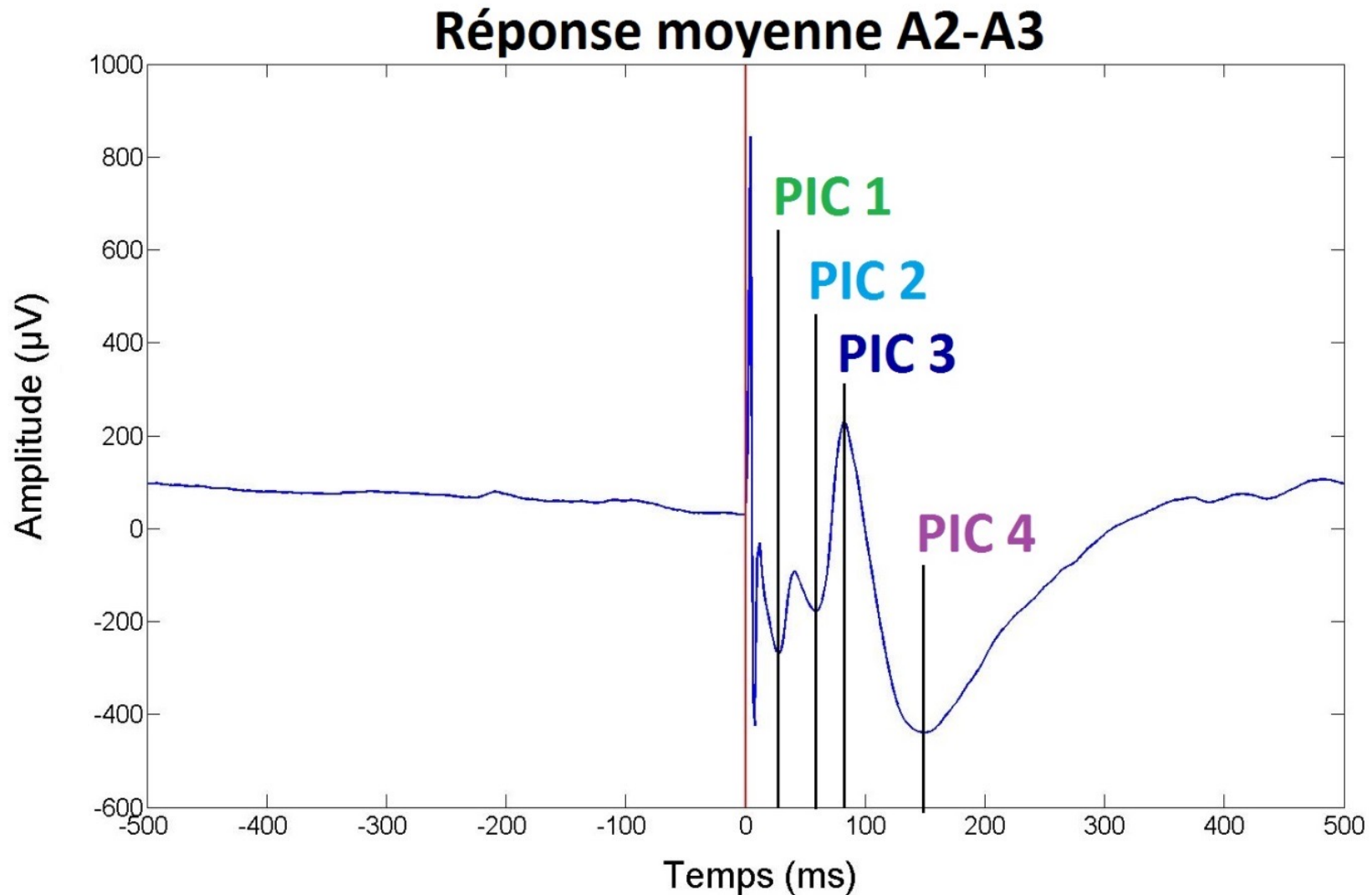


# Sujet 5-Stimulation Plot B1-B2, Hippocampe CCEP dans l'amygdale



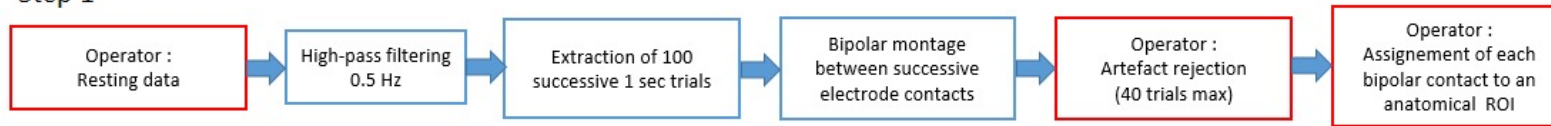


# Sujet 5-Stimulation Plot B1-B2, Hippocampe CCEP dans l'amygdale

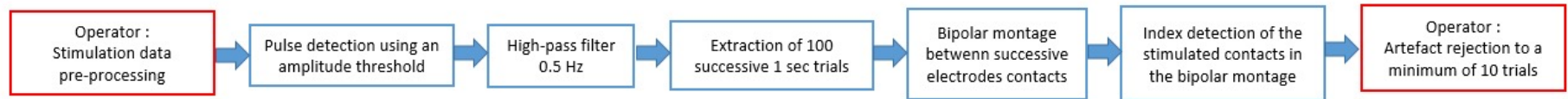


# Méthode

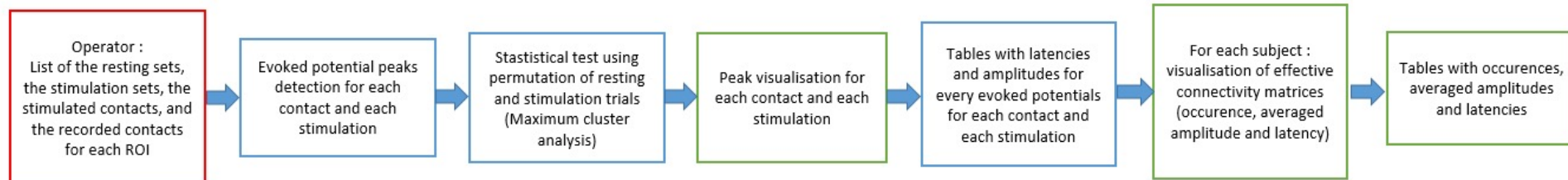
## Step 1



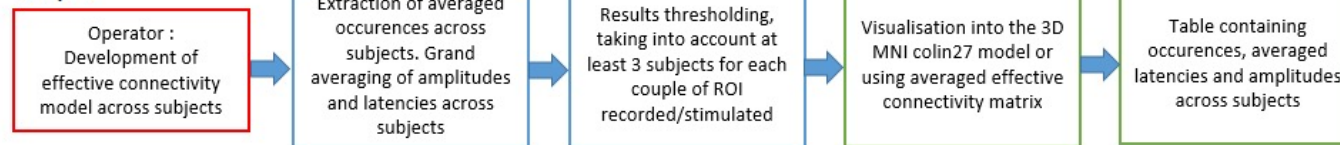
## Step 2



## Step 3



## Step 4



# Méthode

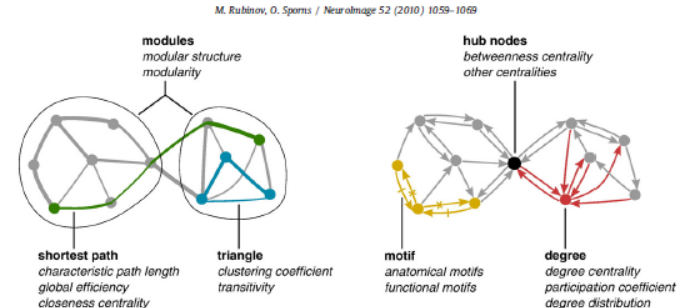
**Matrice d'exploration:** the sum of all explorations of each couple of ROIs, how many times one couple of ROIs were stimulated and recorded through hemispheres explored (15 left and 10 right hemispheres)

**Matrice d'occurrence:** whether at least one other contact in another ROI showed a CCEP through stimulations. If yes : the directed link between ROIs was set to 1 for this stimulation, if no : directed link = 0 (David *et al.*, 2010)

**Matrice d'amplitude:** the grand average of the averaged O1 peak amplitude across all responsive links

Mais aussi : ...

## Matrice de Latence

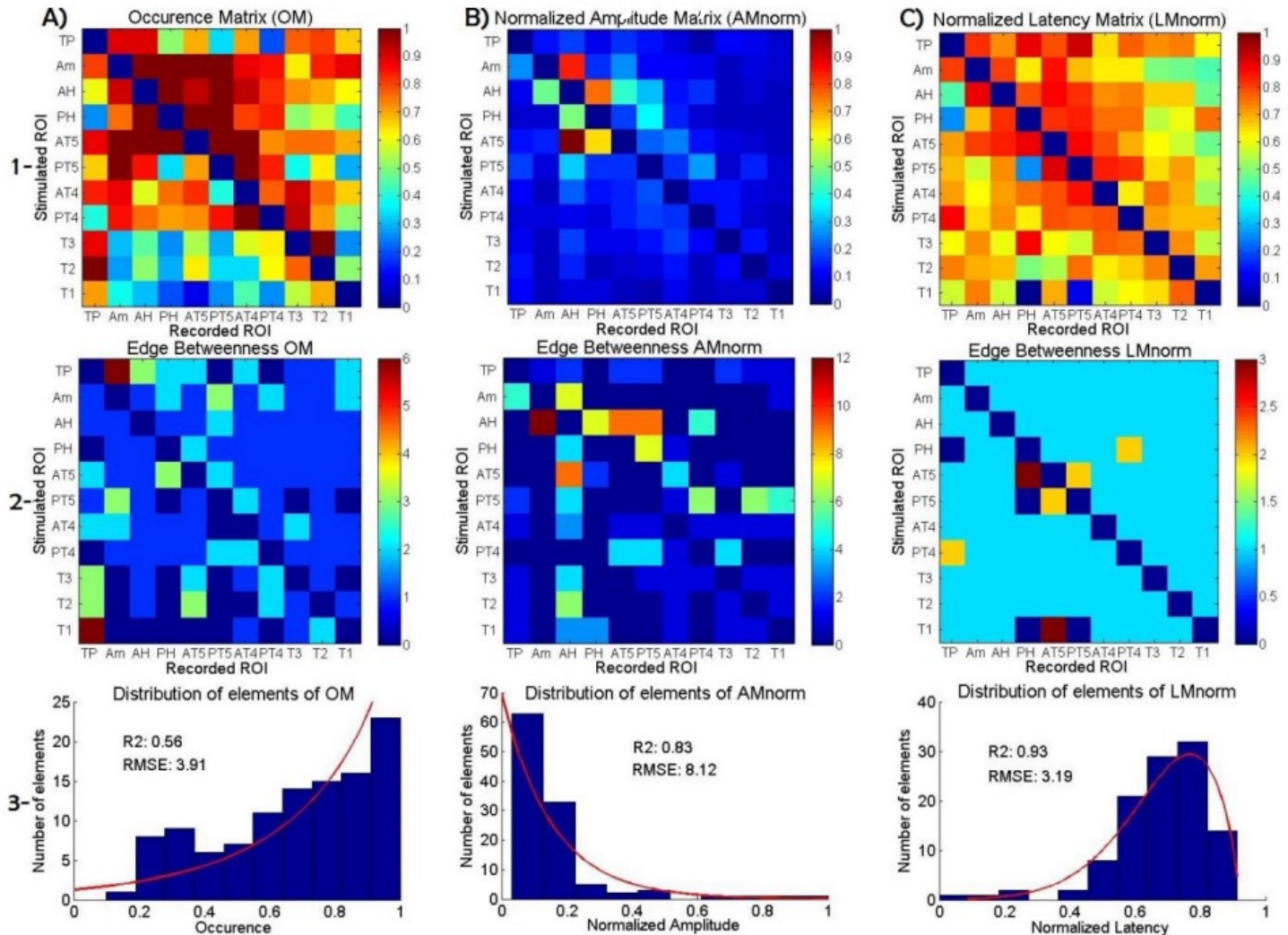


**Modularité Spectrale de Newman** (ségrégation fonctionnelle)

**Within Module Degree Z-score** (force des liens à l'intérieur du module)

**Index de Participation** (force des liens d'une ROI d'un module vers les autres modules)

# Résultats





# Résultats

**Occurrence** : Distribution de probabilité de type Weibull

Forte probabilité de trouver des occurrences élevées et une plus faible probabilité de trouver de faibles occurrences.

Co-existence de voies directes (forte occurrence) et de voies indirectes (faible occurrence) suivies par les CCEPs (Catenoix *et al.*, 2011) :

Probabilité d'occurrence faible (voies indirectes) liée probabilité élevée (voies directes).

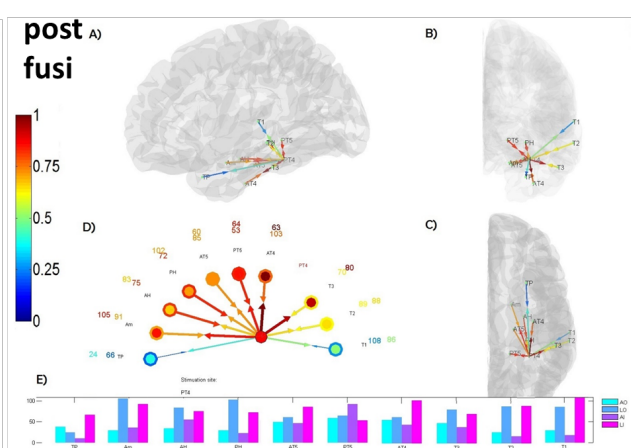
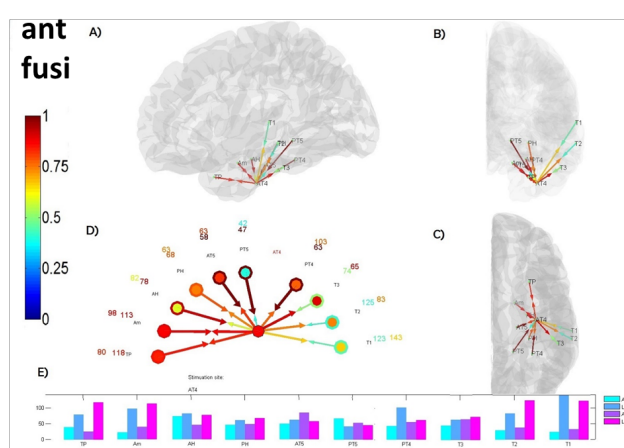
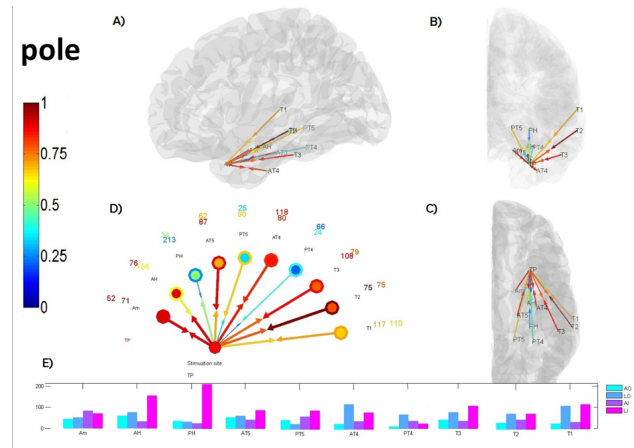
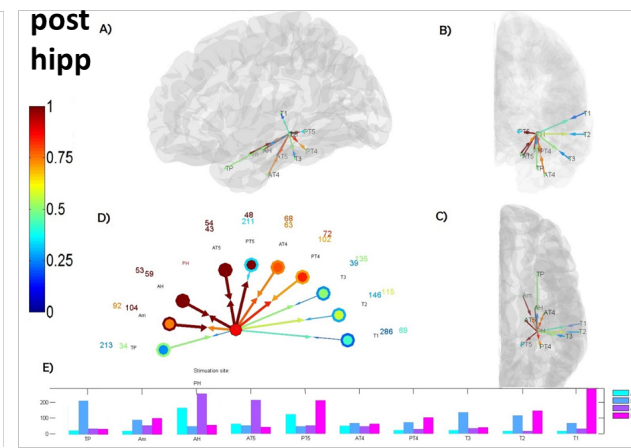
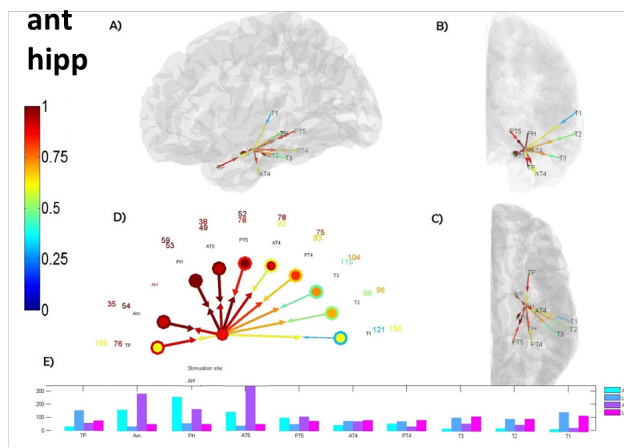
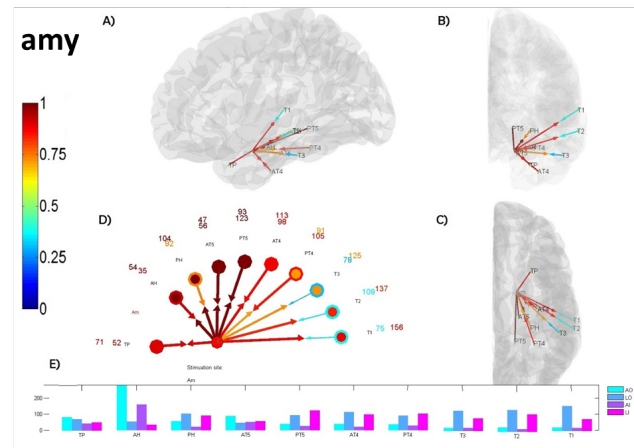
**Amplitude** : Distribution de probabilité de type **Pareto**

Forte probabilité de trouver de faibles amplitudes et une très faible probabilité de trouver de très fortes amplitudes.

Toutes les amplitudes « très élevées » ( $> 100 \mu\text{V}$ ) = **interactions des structures médiales avec l'hippocampe.**

**L'hippocampe** : seule structure qui a montré une amplitude moyenne du pic N1  $> 200 \mu\text{V}$ .

# Résultats



# Conclusion

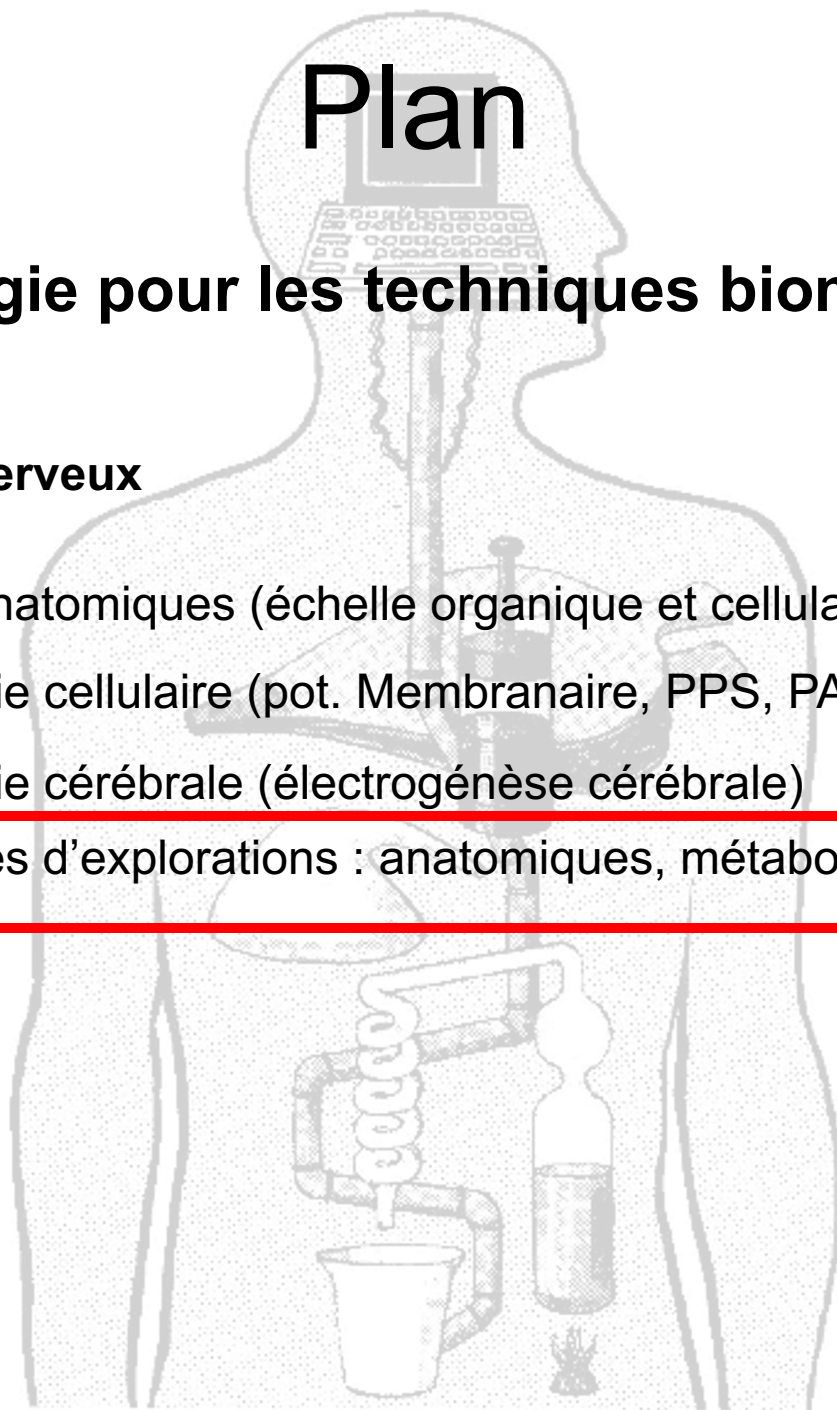
- Une **ségrégation fonctionnelle** entre les structures **médiales** ('mnésiques') et **néocorticales** ('perceptives'). **2 Modules** = 1) Ventral medial region (Am, AH, PH, AT5, PT5, AT4, PT4) & 2) Lateral polar region (T1, T2 and T3)+TP.
- Une **bivalence 'perceptivo-mnésique'** du gyrus fusiforme et du gyrus parahippocampique postérieur.
- Effet d'**amplification du signal** par l'**hippocampe antérieur** transmis à l'amygdale, le cortex rhinal et l'hippocampe postérieur.
- Le cortex **rhinal** et l'**amygdale** ont une **influence étendue** sur le **néocortex**.
- Le **pôle** temporal, le gyrus **fusiforme antérieur** et l'**hippocampe postérieur**/gyrus **parahippocampique postérieur** sont des régions cérébrales importantes dans la **communication entre les modules perceptif et mnésique**.

# Plan

## Physiologie pour les techniques biomédicales

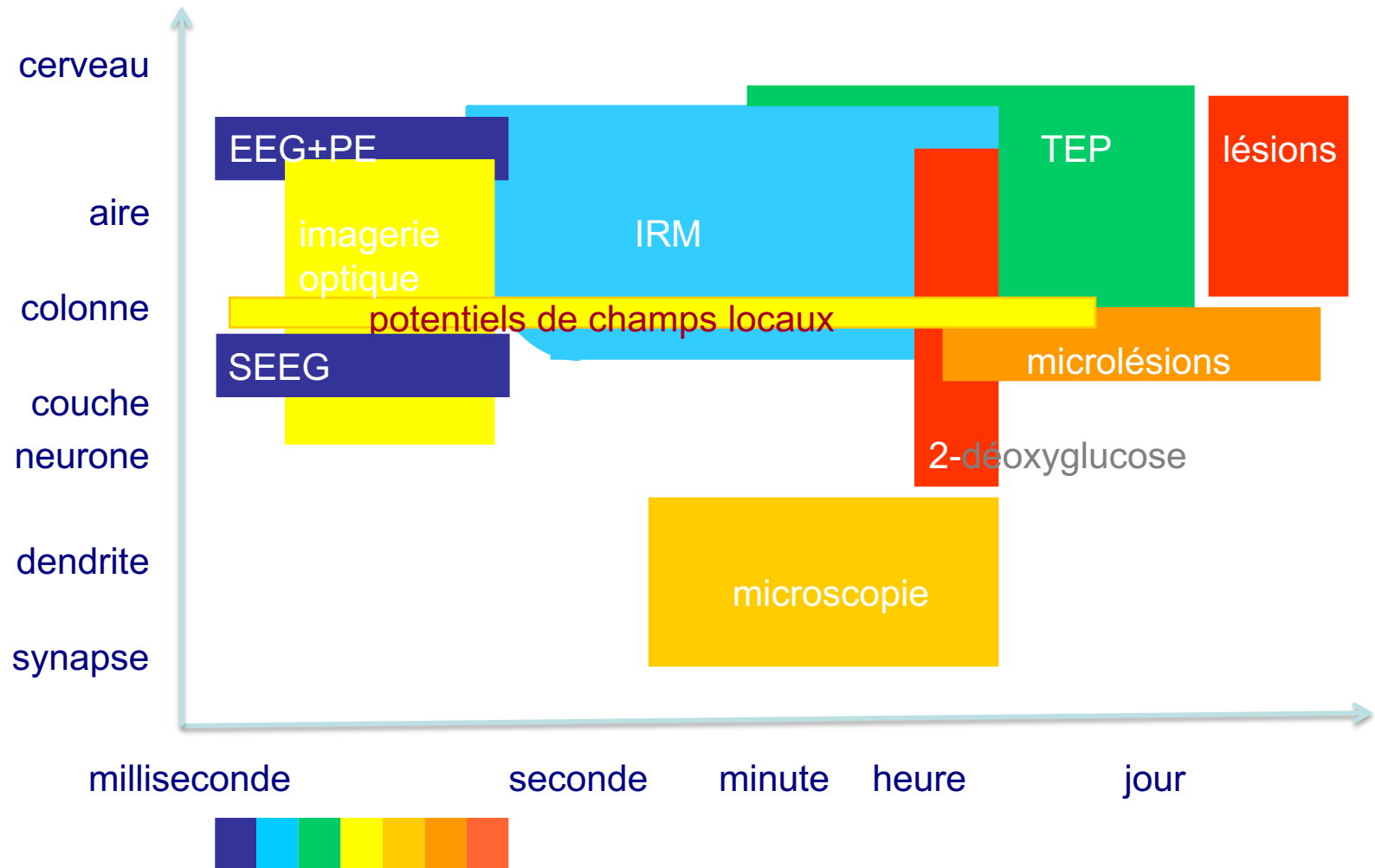
### Chap3. Système Nerveux

- rappels anatomiques (échelle organique et cellulaire )
- physiologie cellulaire (pot. Membranaire, PPS, PA)
- physiologie cérébrale (électrogénèse cérébrale)
- Techniques d'explorations : anatomiques, métaboliques, électriques





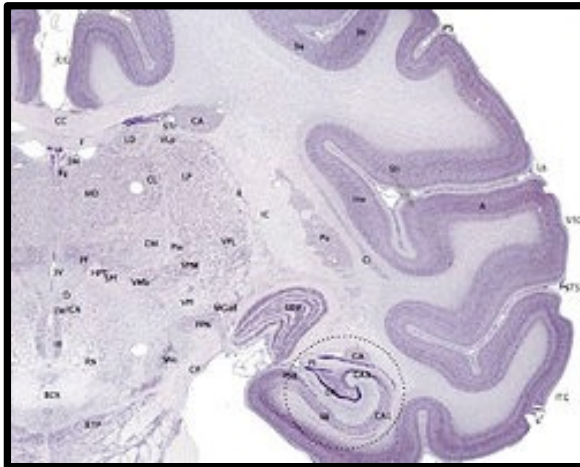
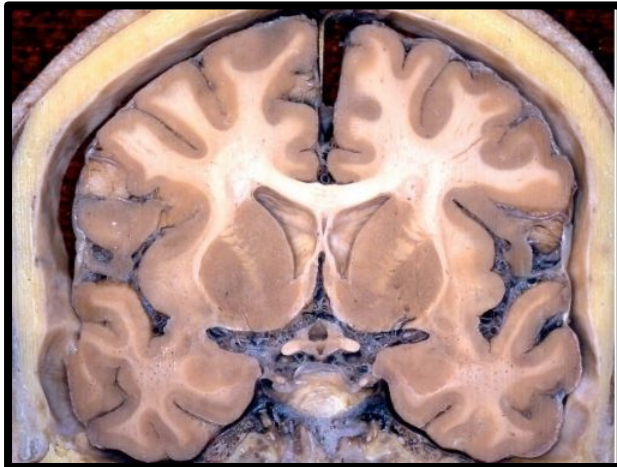
# Résolution spatiale et temporelle des techniques d'exploration cérébrale



# TE anatomique



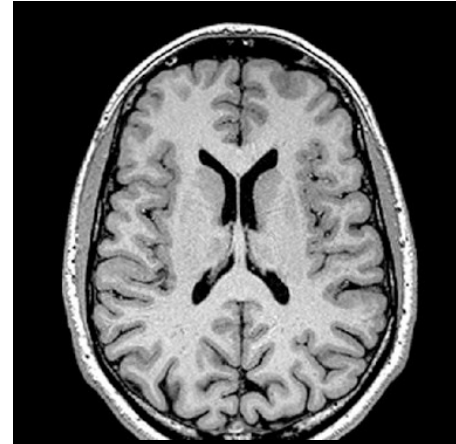
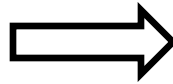
A Alexandrie, 1<sup>ère</sup> dissection du  
cerveau à l'école de médecine suivie  
par **Galien** dans l'Antiquité romaine  
(131/201)



# TE anatomique



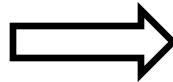
Proton H<sub>2</sub>O



Tissus  
mous

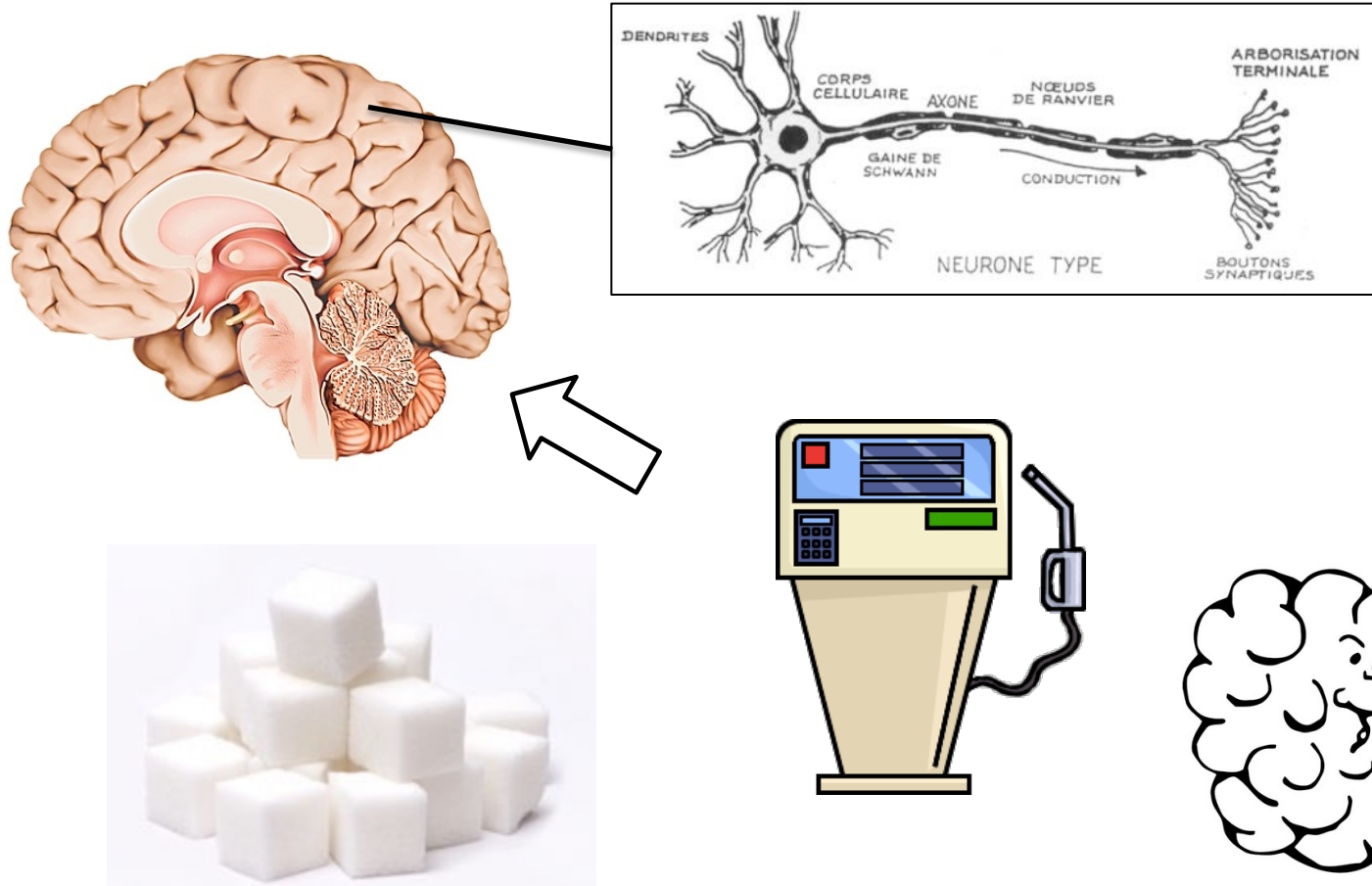


Rayon X



Tissus  
durs

# TE métabolique



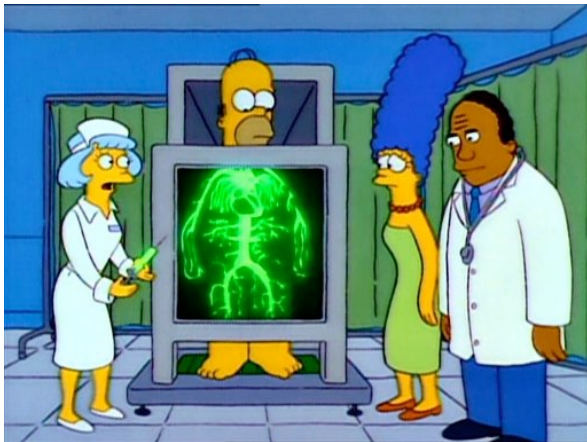
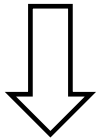
Stock 10min, conso : 60% au repos !

Conso : 20% au repos vs  
2% poids du corps

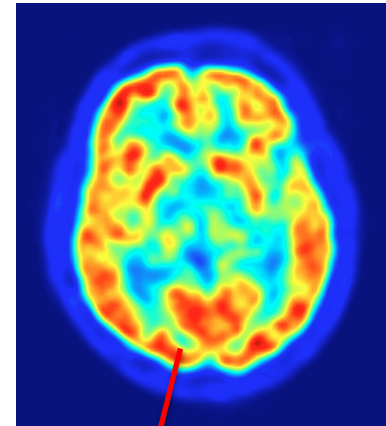
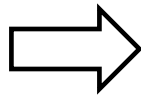




+

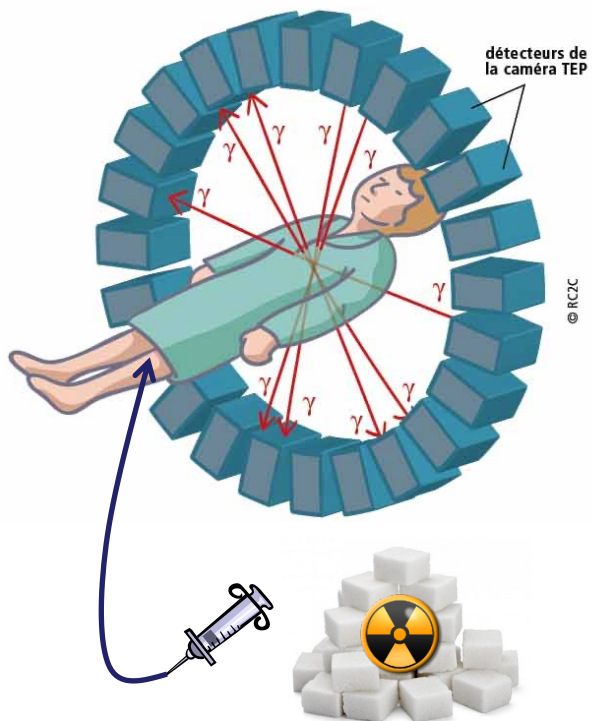


# Tomographie par émission de positon (TEP scan)

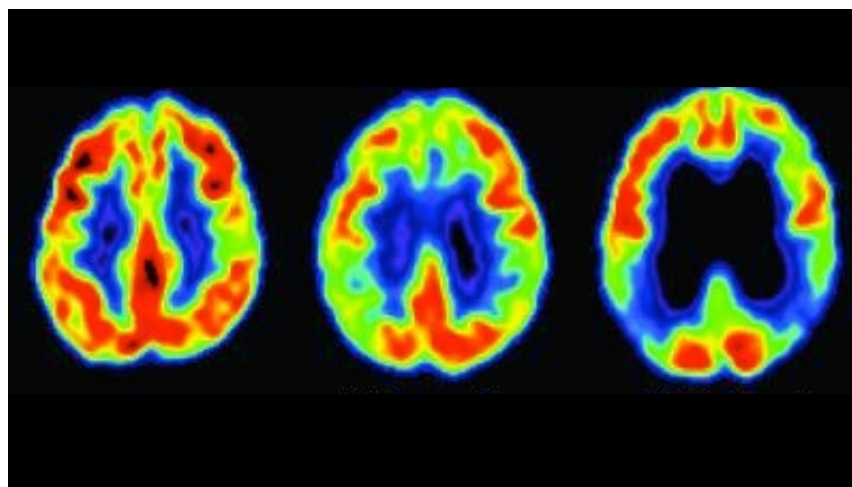
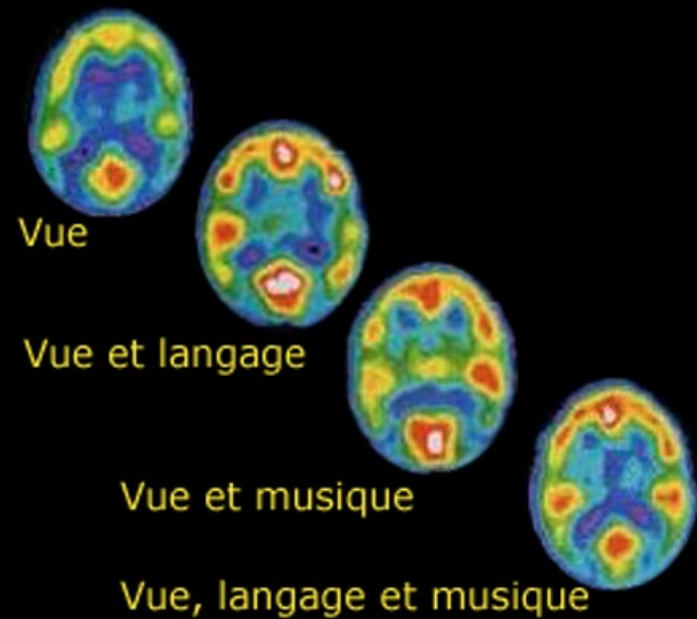


Consomme plus de sucre

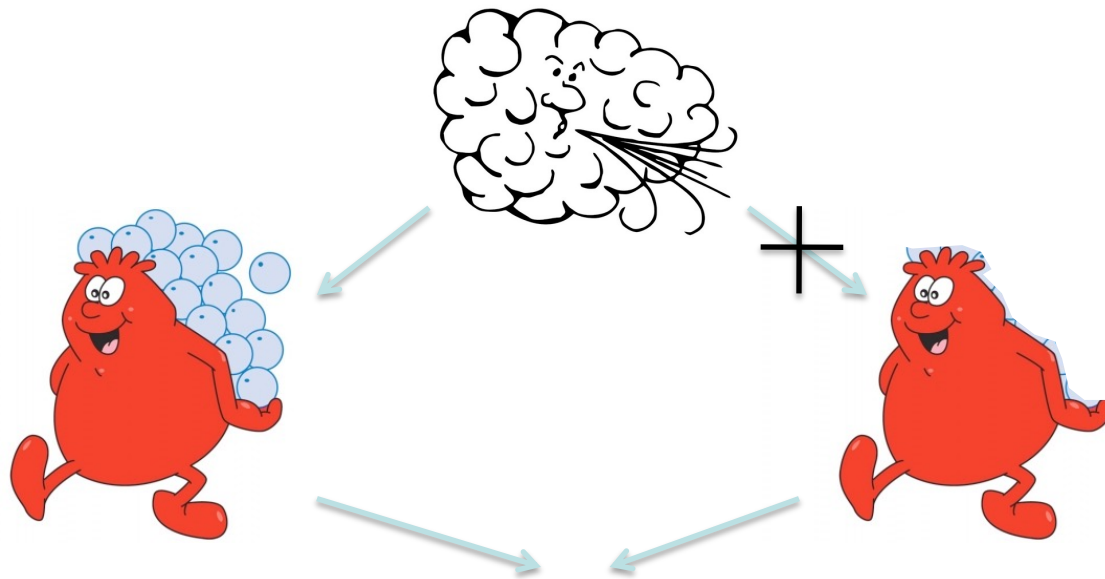




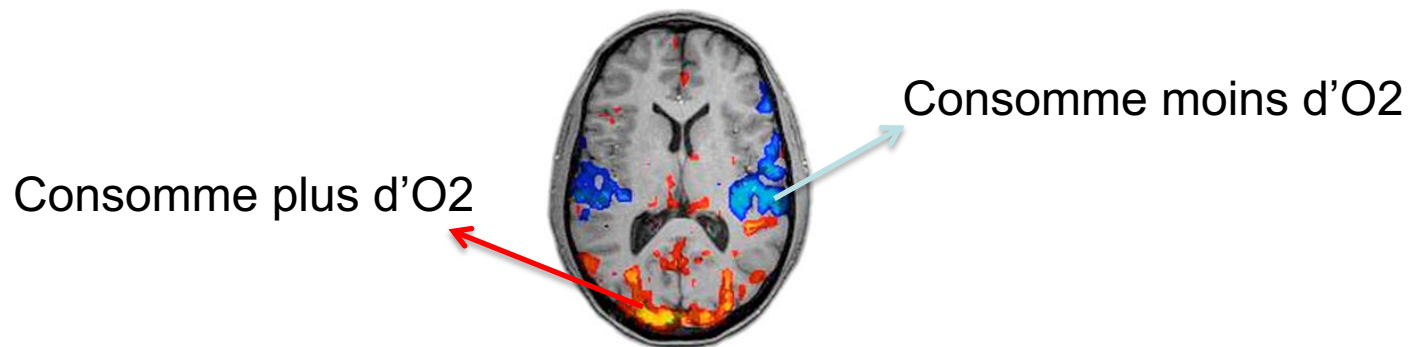
## Activité du cerveau



En rouge : grande  
consommation de sucre



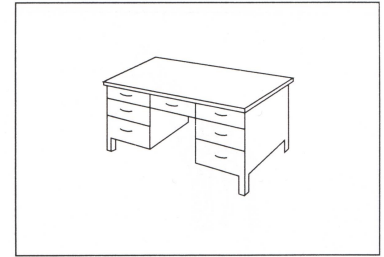
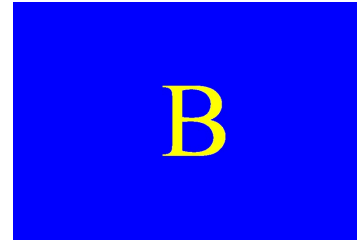
## IRM Fonctionnelle (IRMf)



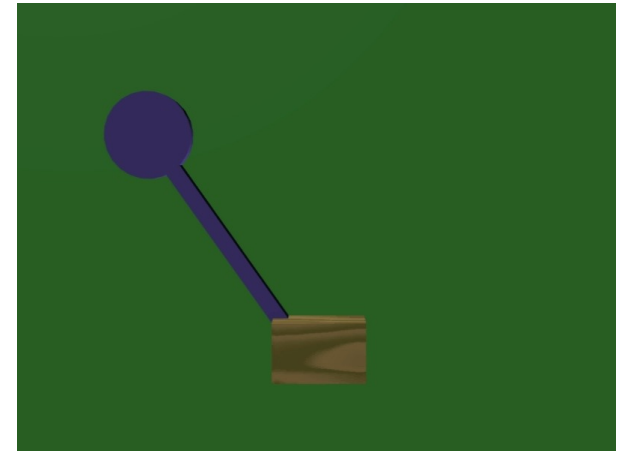
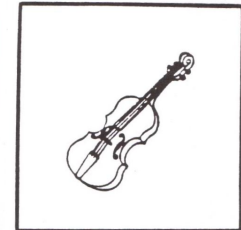
# Exemples

## Protocoles :

- Langage
- Mémoire
- Vision
- Motricité
- Audition
- Sensibilité
- Émotions



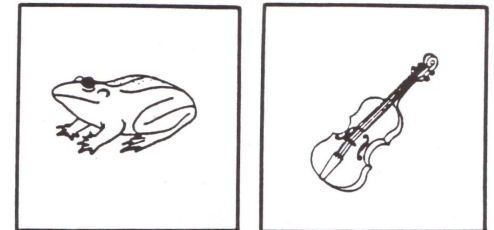
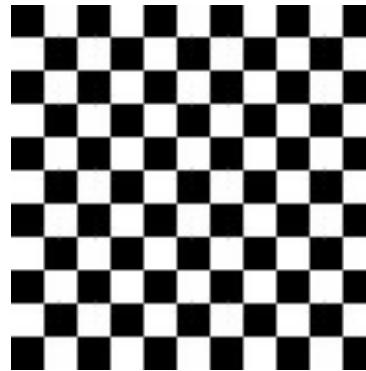
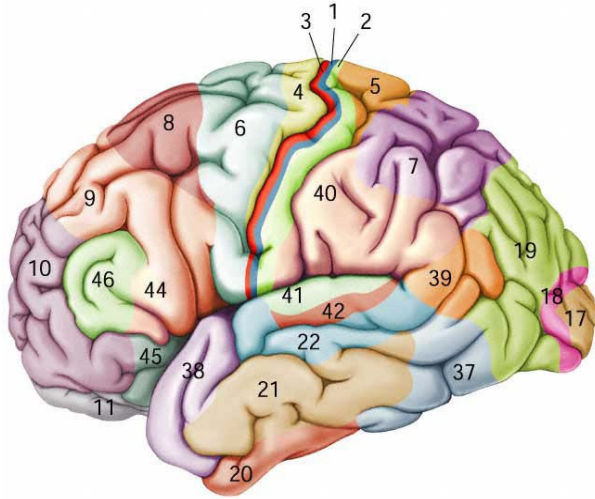
**BLEU**

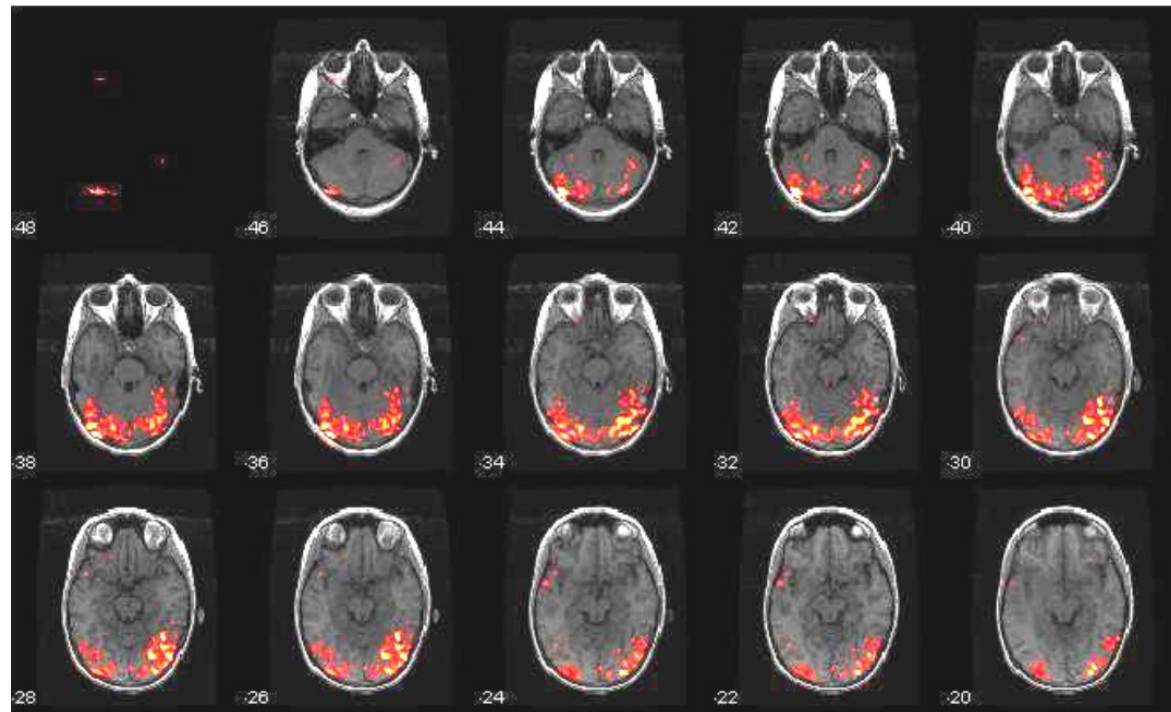
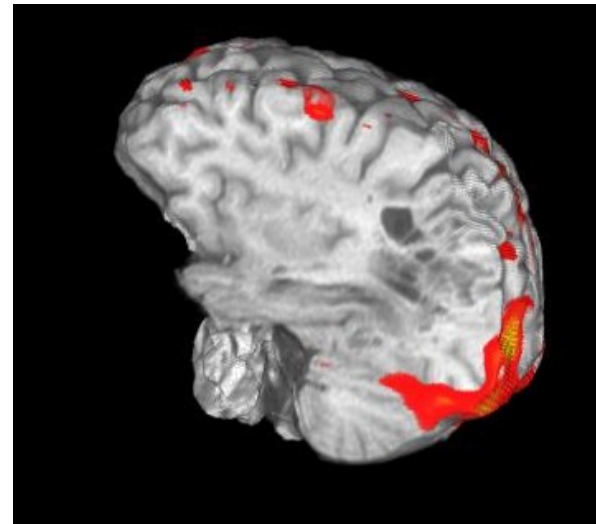
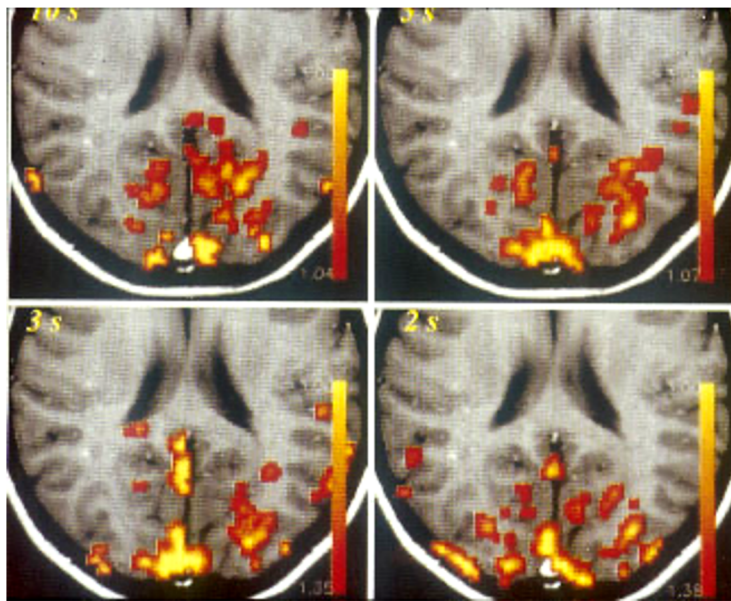


# Cas cliniques

## Système visuel :

- CORTEX PRIMAIRE (17)
- AIRES ASSOCIATIVES (18-19)
- OCULOMOTRICITÉ (Frontal 8,6,9 et Pariétal 39, 40 bilat)



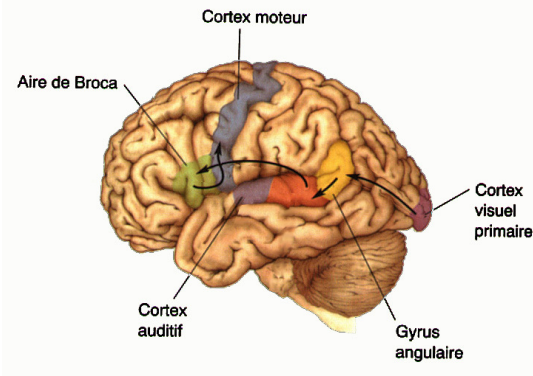




# Cas cliniques

## Langage :

CARTOGRAPHIE DU GYRUS ANGULAIRE (39/40) + GYRUS FRONTAL INFERIEUR (39/40)

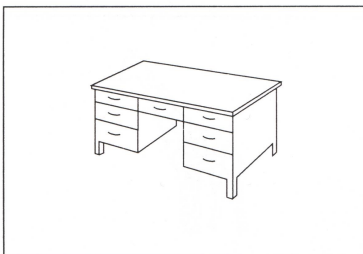
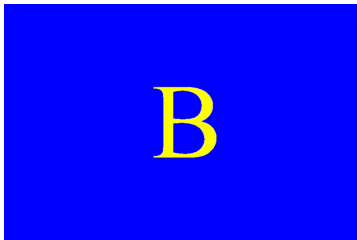


**Lisez cette liste et dites la couleur de chaque mot, pas le mot lui-même !**

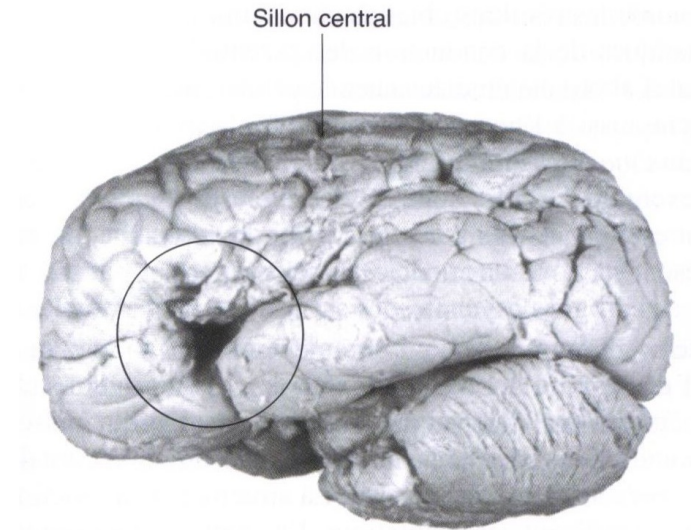
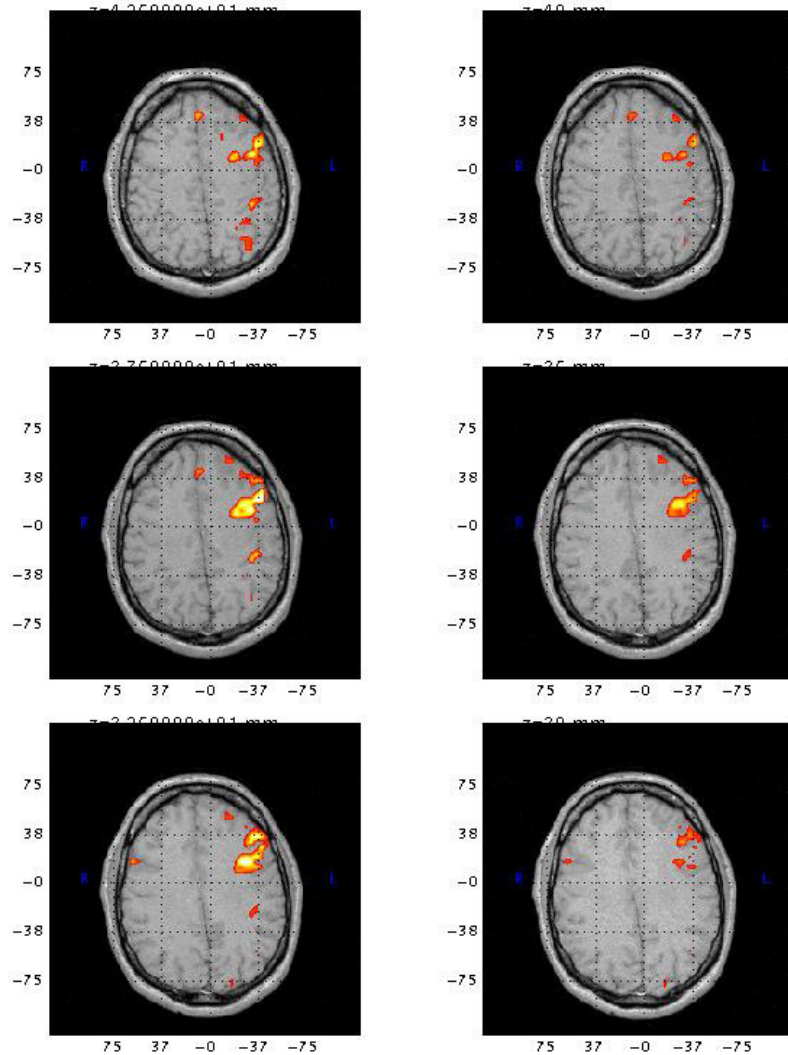
JAUNE  
NOIR  
VIOLET  
ORANGE  
BLEU  
VERT

BLEU  
ROUGE  
JAUNE  
VERT  
ROUGE  
BLEU

ORANGE  
VERT  
ROUGE  
NOIR  
VIOLET  
ORANGE

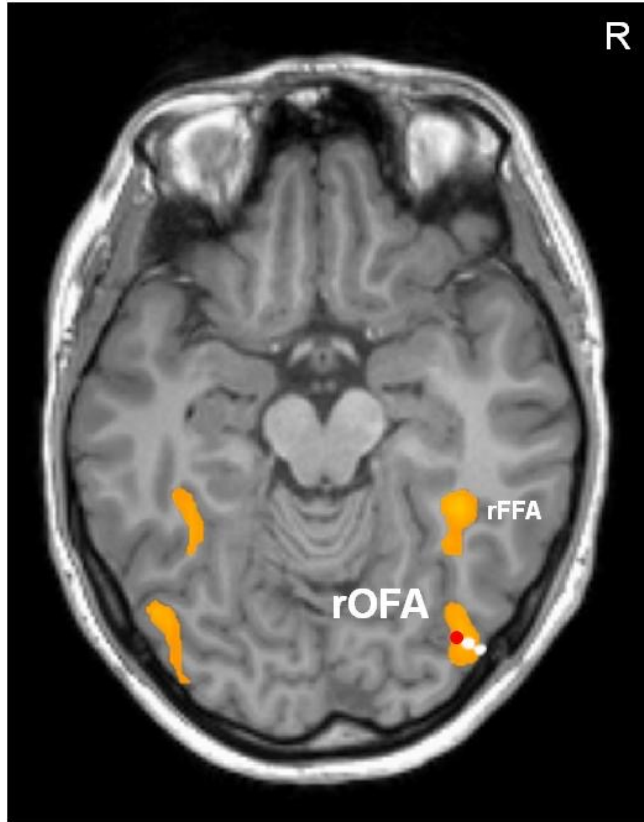


Height threshold  $T = 3.00$   
Extent threshold  $k = 3$  voxels



*Broca (1824-1880)*

# Réseau de la reconnaissance visuelle des visages

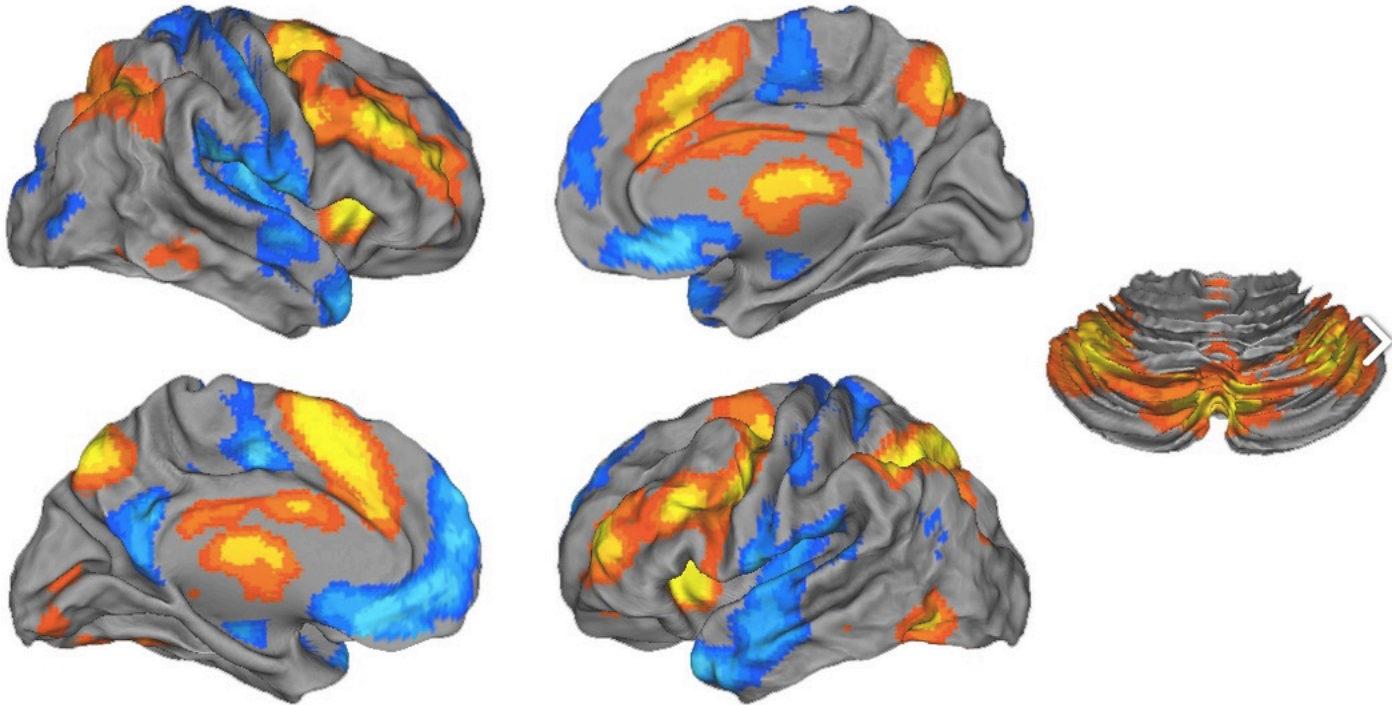


OFA : occipital face area

FFA : fusiform face area

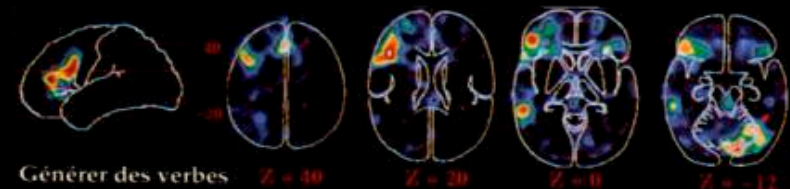
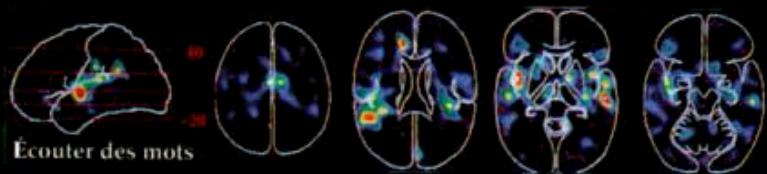
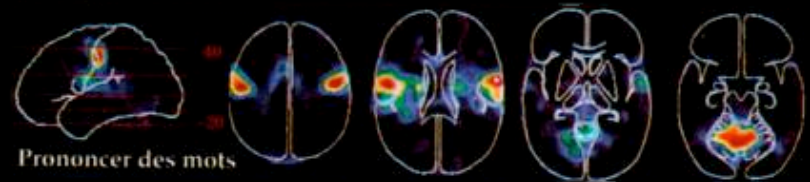
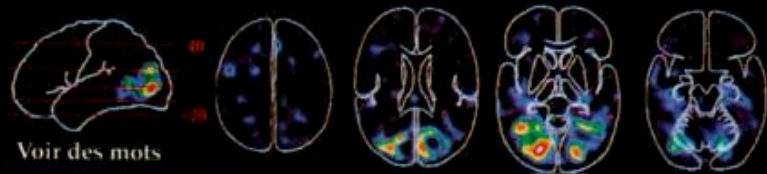
Hémisphère droit supérieur à l'hémisphère gauche

# Réseau du Mode par défaut !

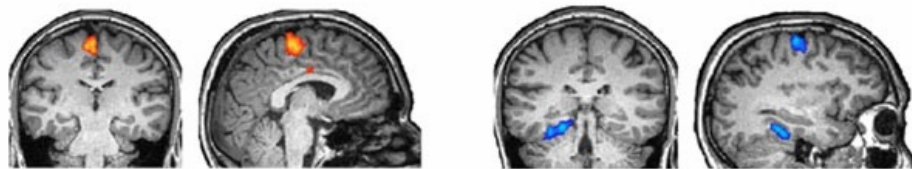




# Lire dans les pensées ?



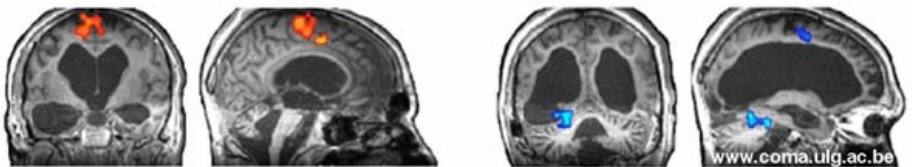
## SUJET SAIN



Répond « OUI »

Répond « NON »

## « ETAT VEGETATIF »



Signes de conscience et d'une communication en utilisant l'IRMf chez un patient en « état végétatif ».

Homme de 29 ans, accidenté de la route

Idee d'un code :

il s'imagine en train de jouer au tennis quand il veut répondre OUI  
il s'imagine en train de déambuler dans sa maison lorsqu'il veut répondre NON.

Activations cérébrales bien distinctes



# TE électrique : Electroencéphalographie

Pas douloureux

Ne rase pas les cheveux

Facile à mettre en œuvre



Hans Berger

# Les électrodes cupules

Les électrodes d'Ag/AgCl se conduisent comme des électrodes impolarisables. Ces électrodes sont donc souvent préférées en biologie car l'impédance de l'électrode est faible (meilleure conduction du signal).

Le transfert de charges est lié à la tendance :

-Pour l'électrode à décharger des ions dans la solution:

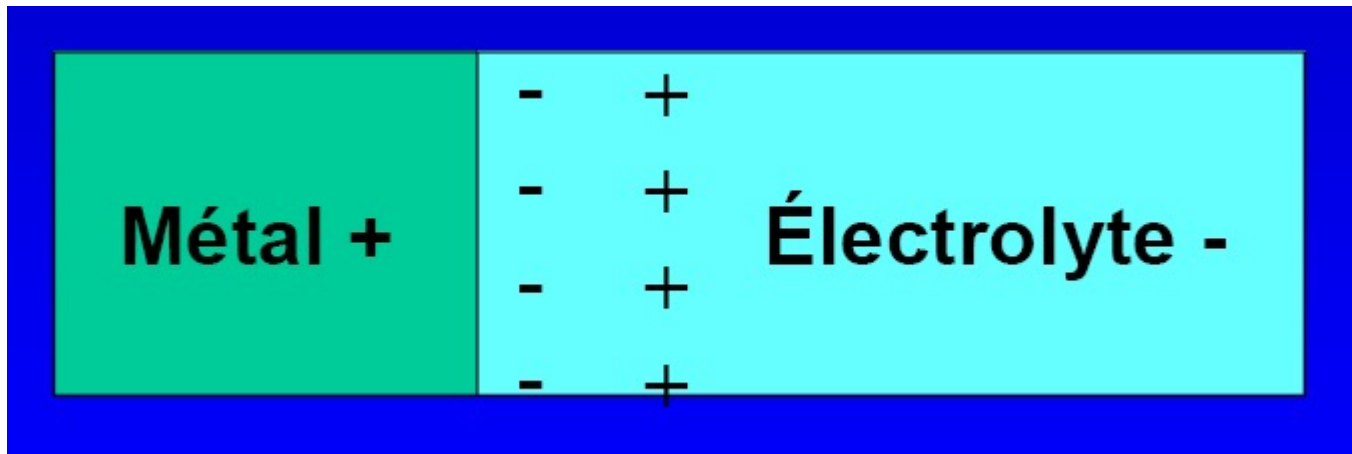
Métal  $\rightarrow$  ions métalliques + électrons (oxydation)

-Pour les ions dans l'électrolyte, à se combiner avec l'électrode:

Ion métalliques + électrons  $\rightarrow$  métal

Résultat: établissement d'un gradient de charges à l'interface

# Les électrodes cupules



C'est ce phénomène qui est observé à l'interface électrode - scalp

# Emplacement des électrodes

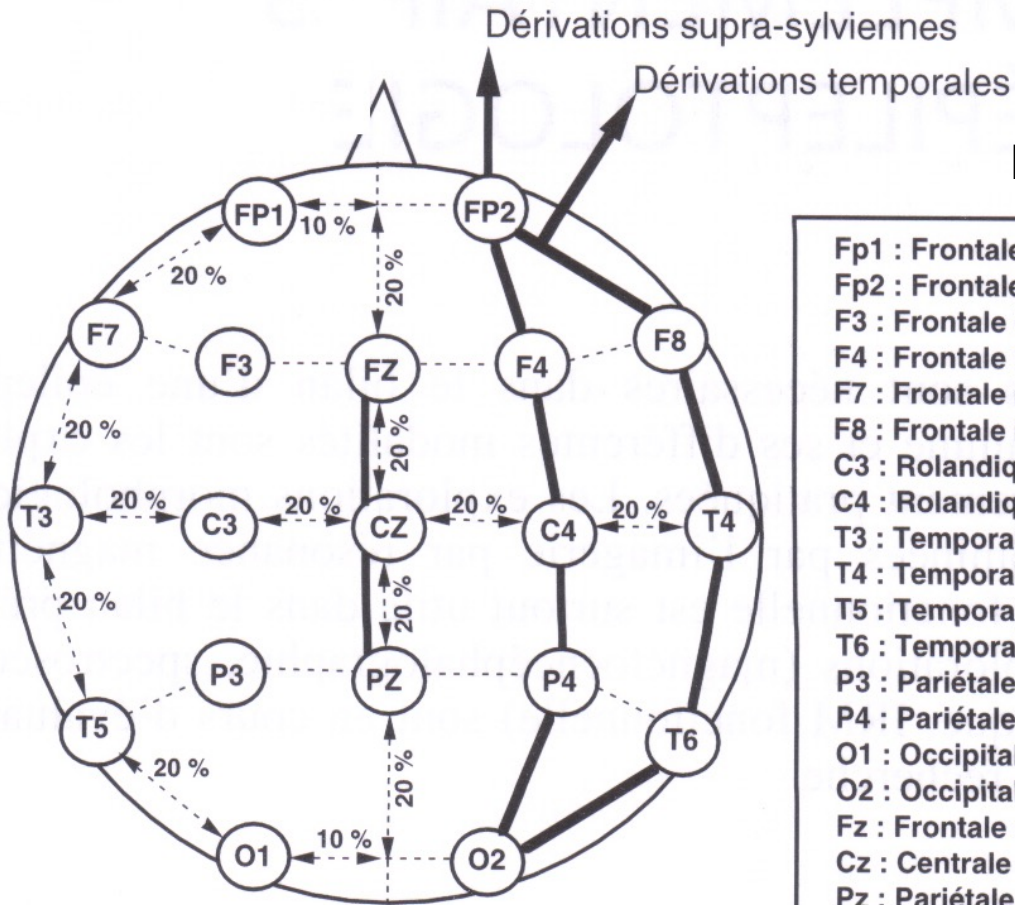
Emplacement standardisé par une nomenclature internationale appelée système 10/20.

Dr Jasper, 1947, proposa ce système dont voici les principes :

- Position des électrodes à partir de mesures précises à partir de repères crâniens (adaptation du système en fonction de la taille et de la forme du crâne)
  - Positionnement des électrodes doit permettre une couverture adéquate de l'ensemble de la tête
  - Nom des électrodes en correspondance avec les zones cérébrales en regard.
- Discussion facilitée entre non spécialiste et spécialiste

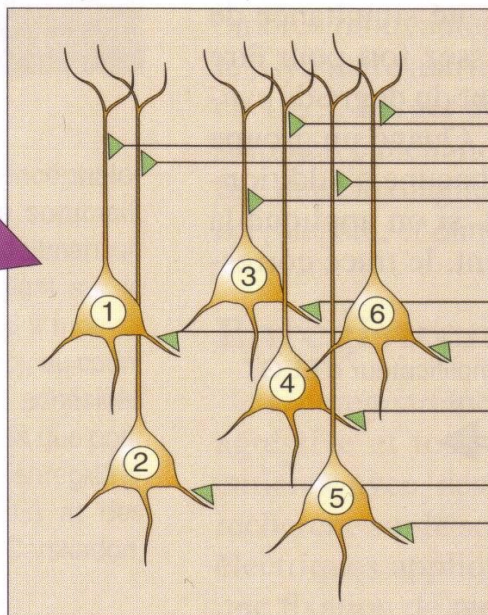
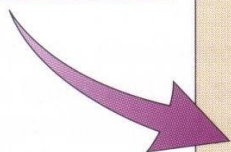
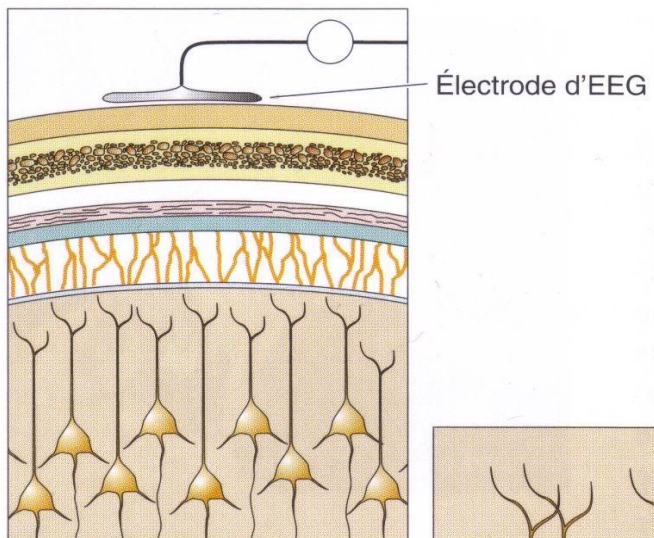


# Systeme 10/20

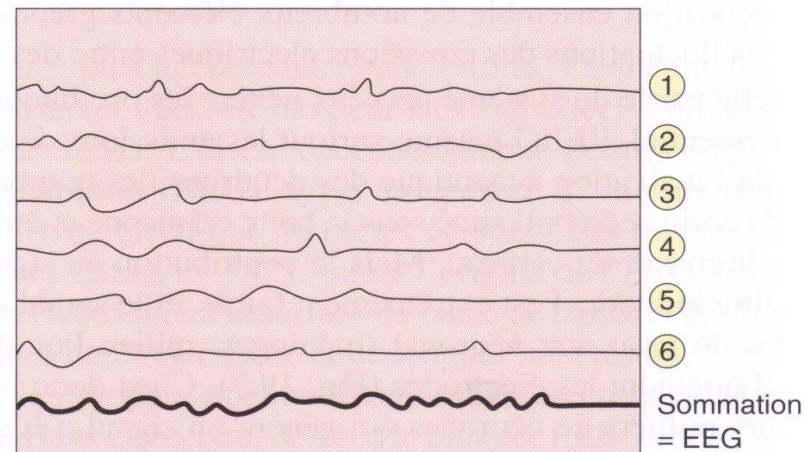


## Nomenclature

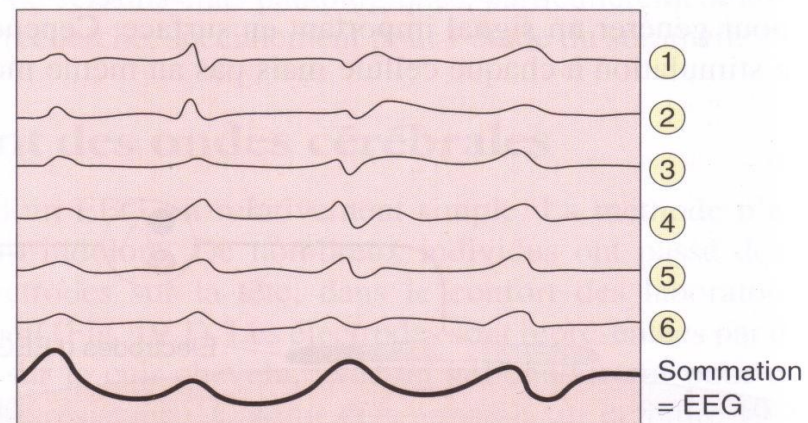
- Fp1 : Frontale polaire G
- Fp2 : Frontale polaire D
- F3 : Frontale G
- F4 : Frontale D
- F7 : Frontale inférieure (Temporale antérieure) G
- F8 : Frontale inférieure (Temporale antérieure) D
- C3 : Rolandique (Centrale) G
- C4 : Rolandique (Centrale) D
- T3 : Temporale moyenne G
- T4 : Temporale moyenne D
- T5 : Temporale postérieure G
- T6 : Temporale postérieure D
- P3 : Pariétale G
- P4 : Pariétale D
- O1 : Occipitale G
- O2 : Occipitale D
- Fz : Frontale médiane
- Cz : Centrale médiane
- Pz : Pariétale médiane



Décharge irrégulière



Décharge synchronisée







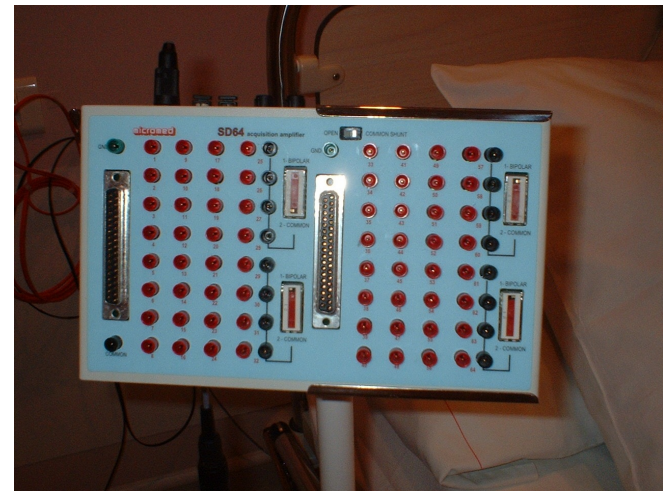
# Instrumentation EEG

## La boîte tête :

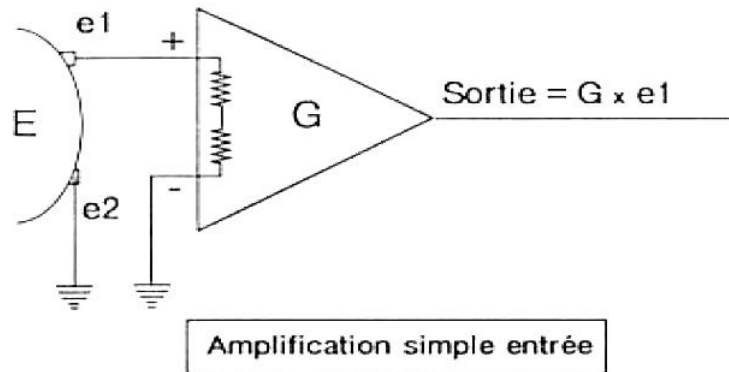
Constitue l'interface d'acquisition des signaux EEG.

Elle est située entre les électrodes et la carte d'acquisition du PC.

Elle permet la mise en forme des signaux EEG par système d'amplification, filtrage et conversion analogique-numérique



# Amplificateurs EEG

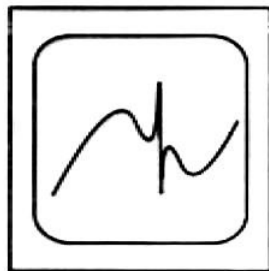
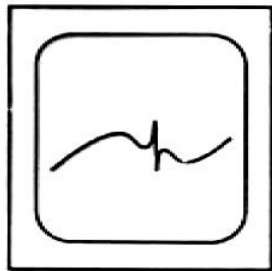


$$V_S = G \times V_E$$

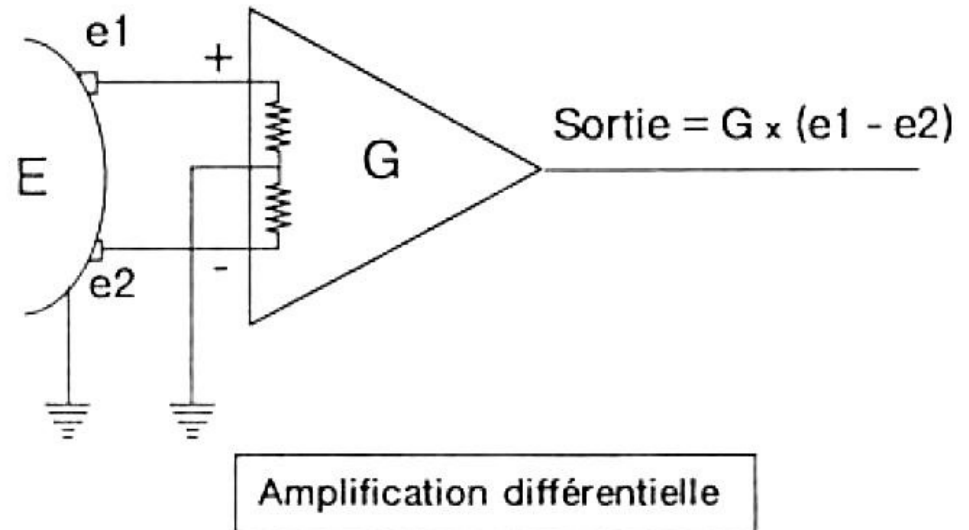
$$\text{Gain } G = V_S / V_E$$

Entrée

Sortie  
amplifiée



Ampli simple entrée



Ampli différentiel



# La boîte tête

## Sensibilité :

Rapport entre le voltage d'entrée et la déflexion du tracé de sortie d'un canal EEG.  
Elle se mesure en microvolts par millimètres ( $\mu\text{V}/\text{mm}$ )

Exemple :

Voltage d'entrée    50  $\mu\text{V}$

Sensibilité = ----- = ----- = 5  $\mu\text{V}/\text{mm}$

Déflexion tracé    10mm

La sensibilité est réglable de manière informatique grâce au logiciel de visualisation des tracés

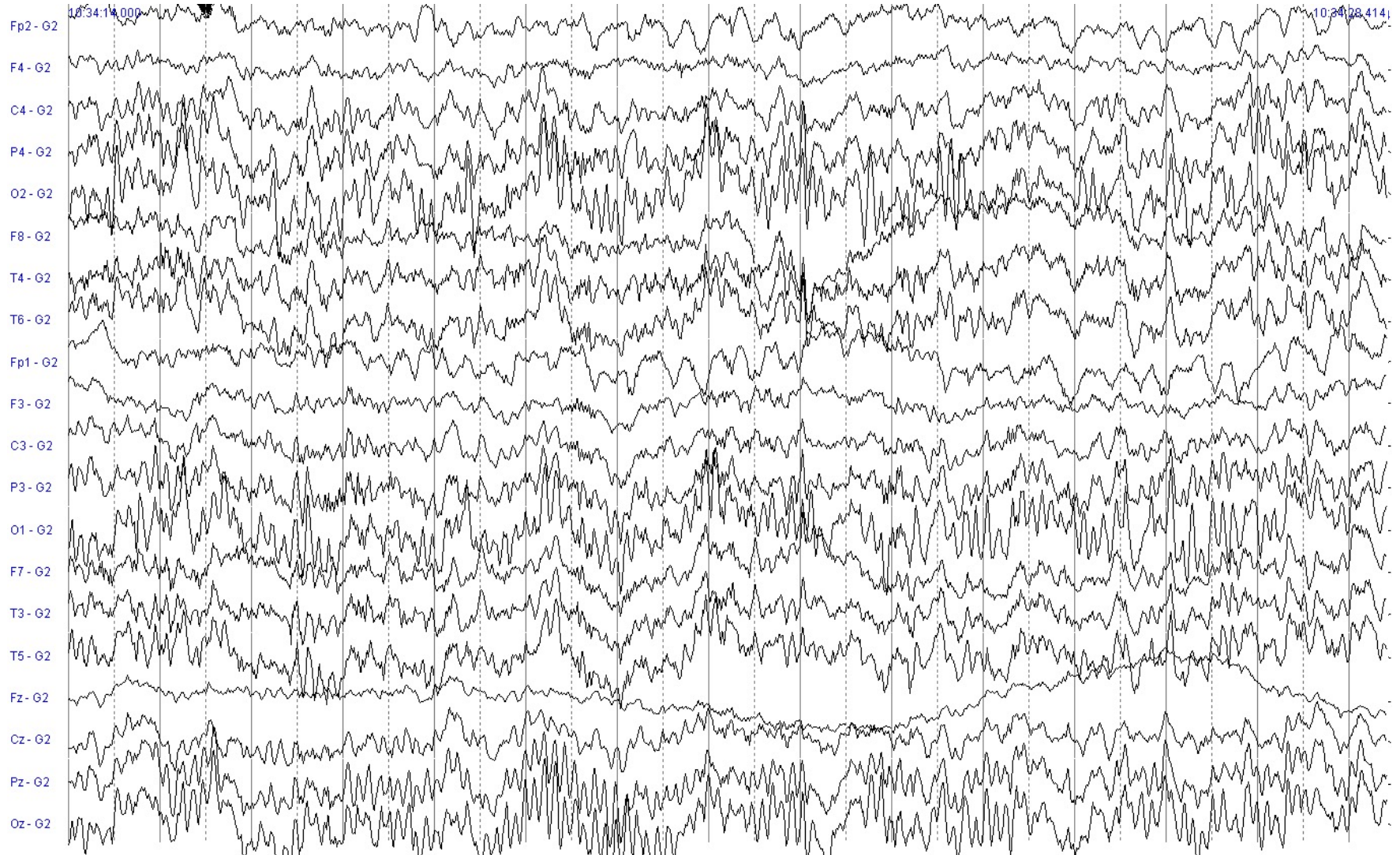
# Tracés et Sensibilité

100  $\mu\text{V}/\text{cm}$

200  $\mu\text{V}/\text{cm}$

300  $\mu\text{V}/\text{cm}$

50  $\mu\text{V}/\text{cm}$



# La boîte tête

## Filtrage des signaux EEG :

Le fait que les différences de potentiel fluctuent en fonction du temps implique que les signaux enregistrés ont une certaine bande de fréquence.

La majorité des signaux EEG se situe dans la bande de fréquence allant de 1Hz à 70Hz.

Bande passante: c'est l'étendue des fréquences non altérées par le filtrage

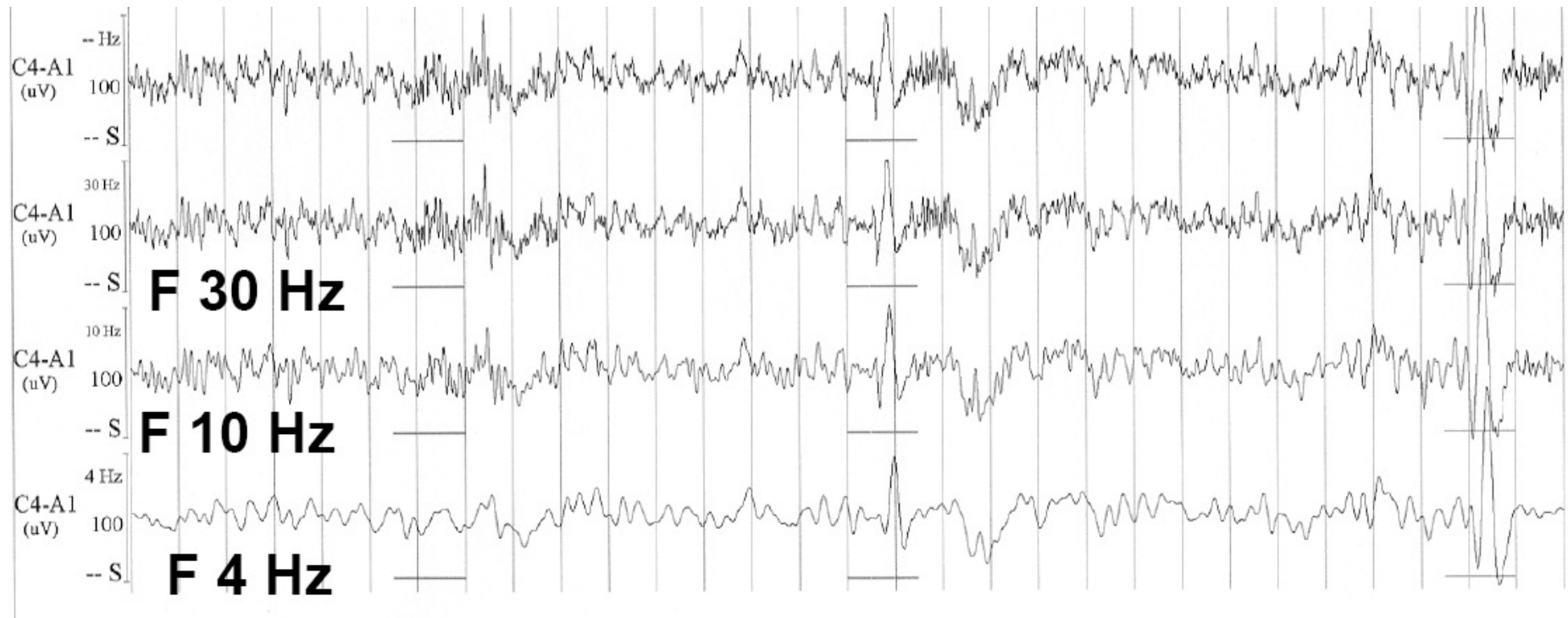
Si la bande passante est trop étroite : perte de signal

Si la bande passante est trop large : surcharge en bruit

On distingue deux types de filtres :

- les filtres hautes fréquences (passe-bas)
- les filtres basses fréquences (passe-haut)

# Exemple de filtrages





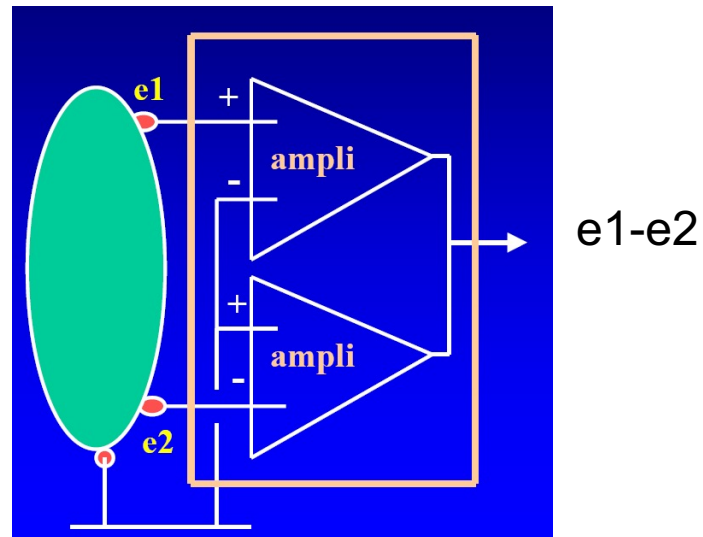
# Montages EEG

Grâce à l'EEG numérisé, il est possible de mesurer plusieurs types de différences de potentiels.

Un montage EEG correspond à la combinaison de couples d'électrodes.

- Si deux électrodes sont actives (l'une reliée à l'entrée + et l'autre à l'entrée -), le montage est dit bipolaire

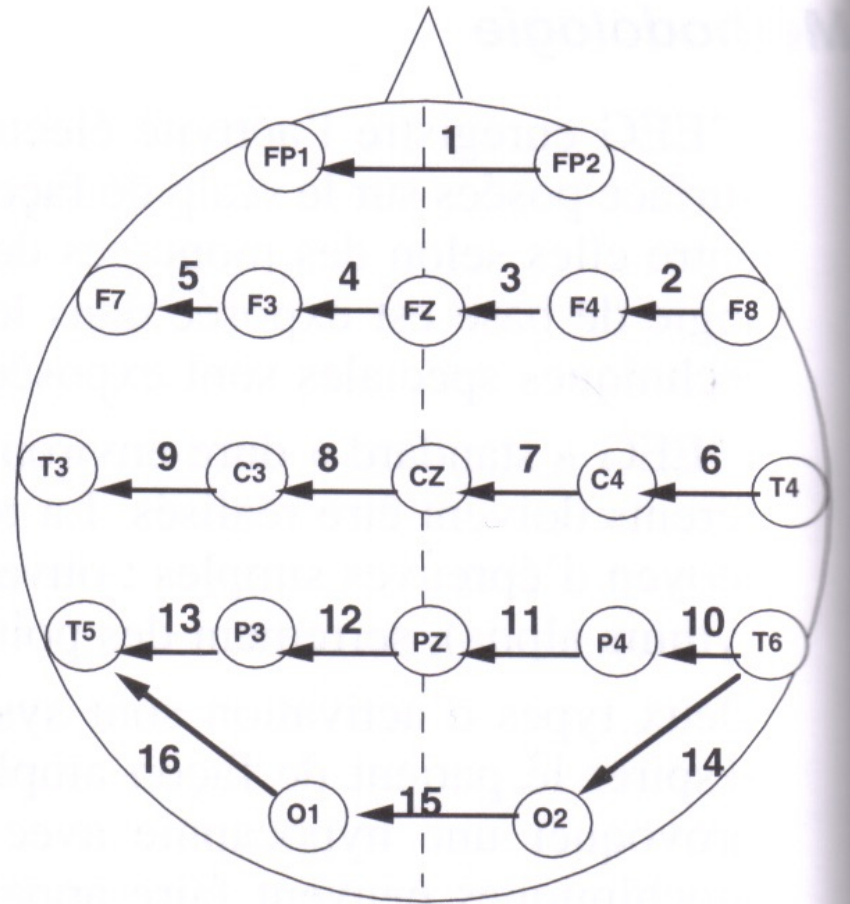
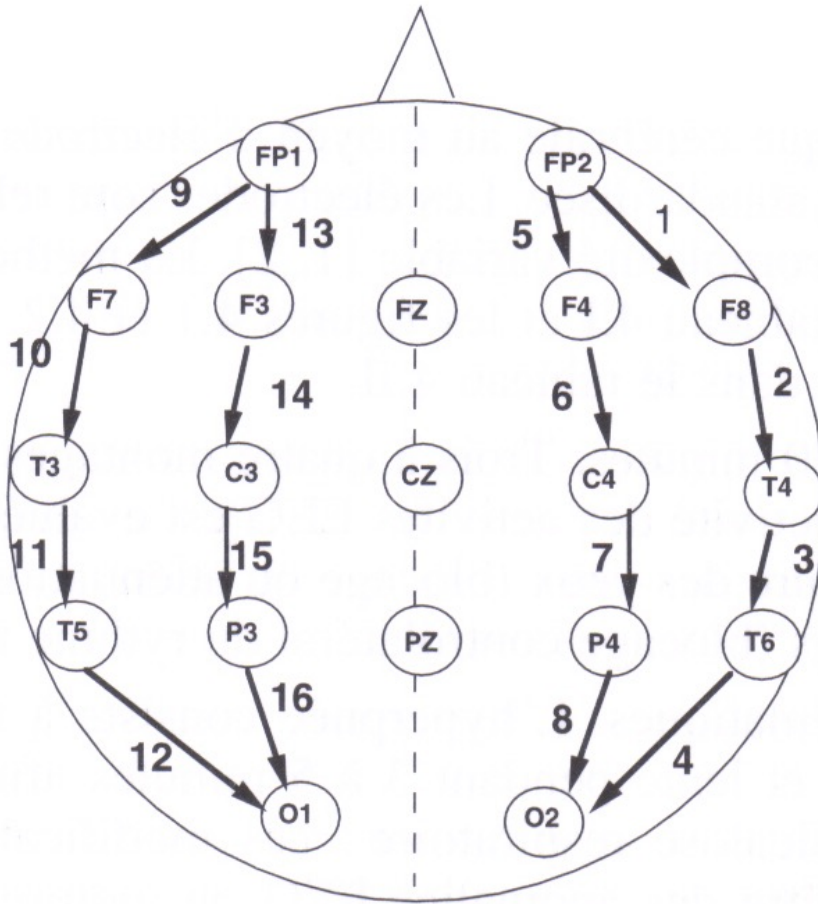
→  $e1 - e2$  ou inversement



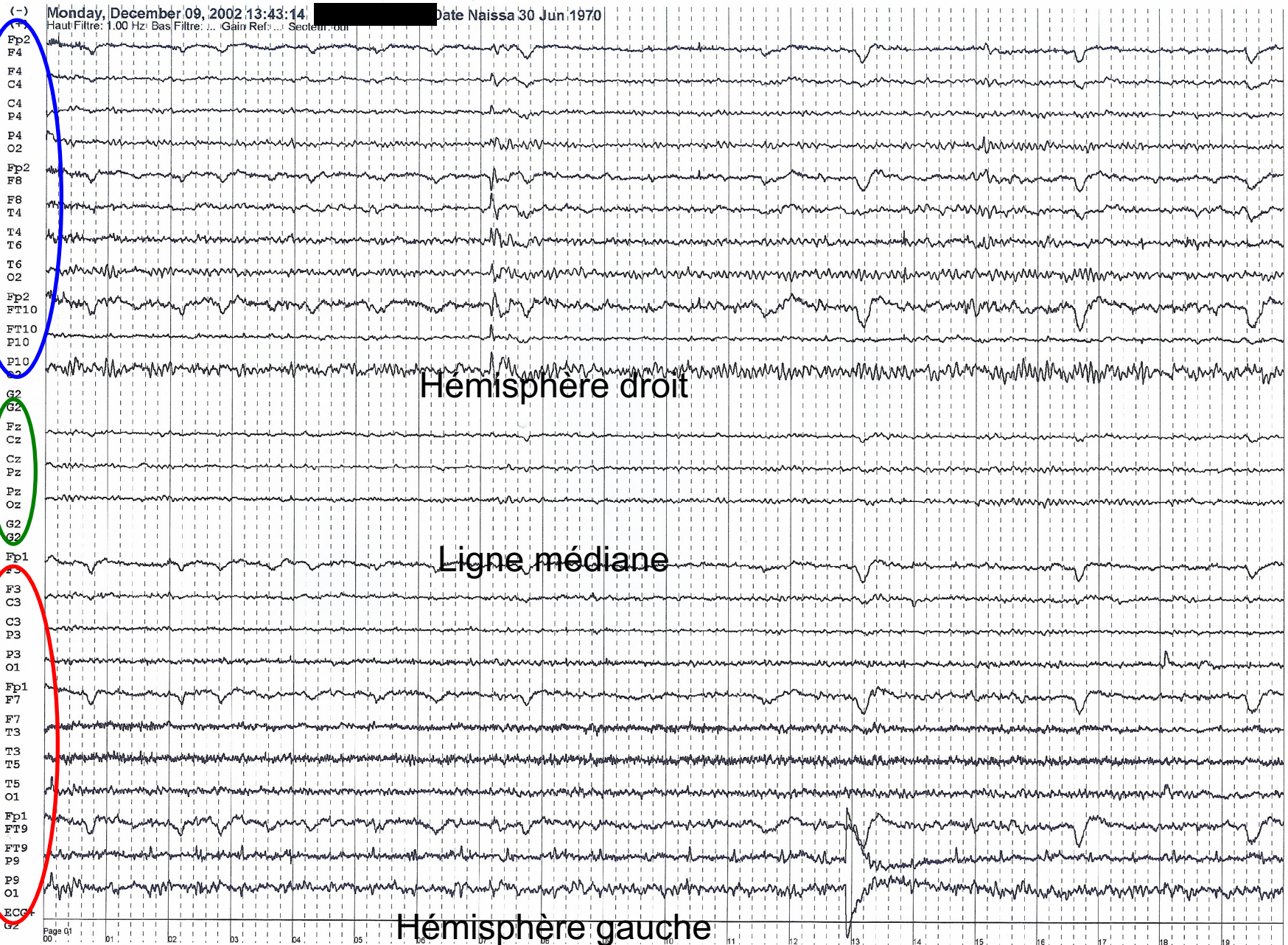
# Montages EEG

Montage bipolaire longitudinal

Montage bipolaire transverse

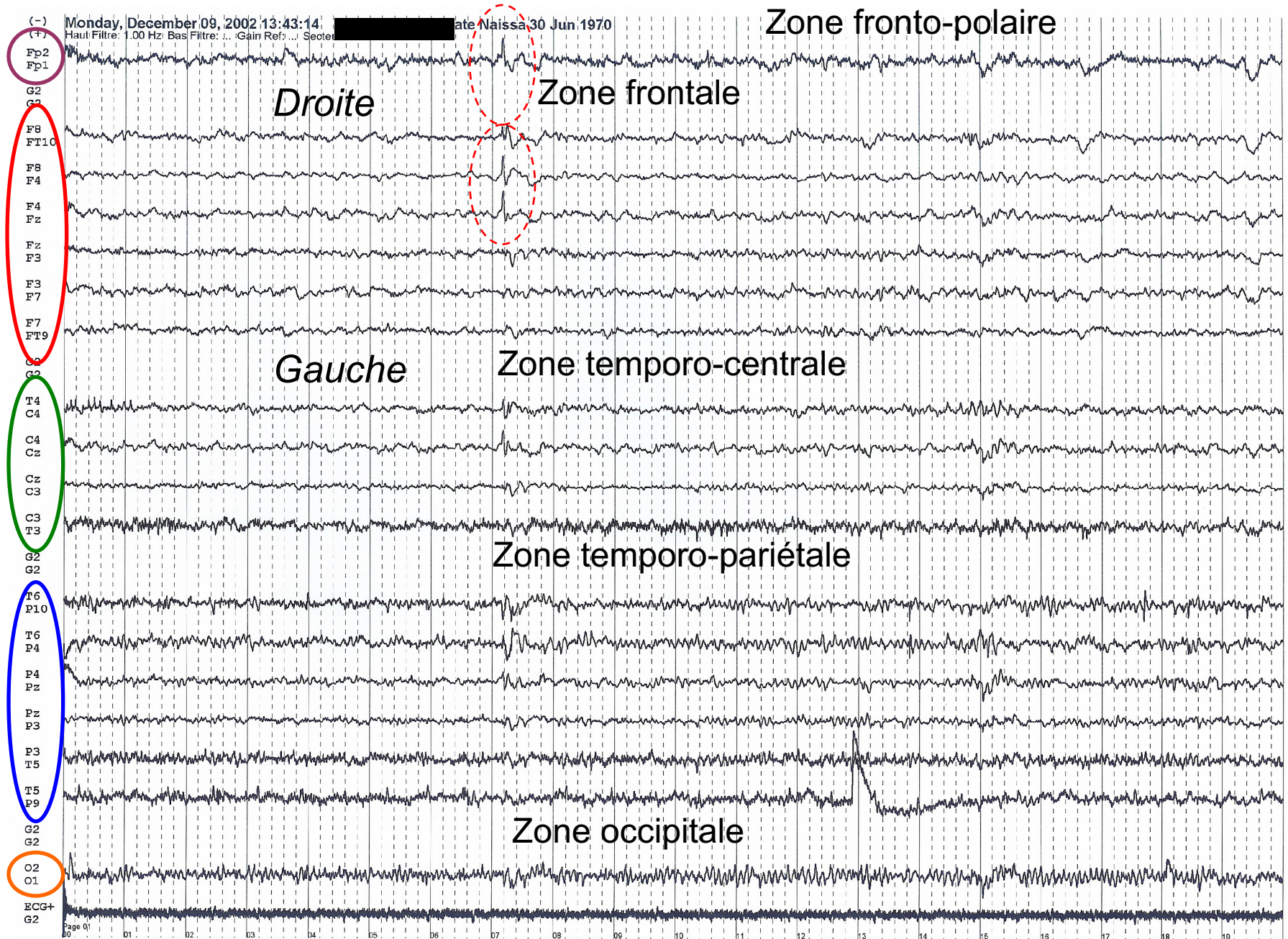


# Montage bipolaire longitudinal



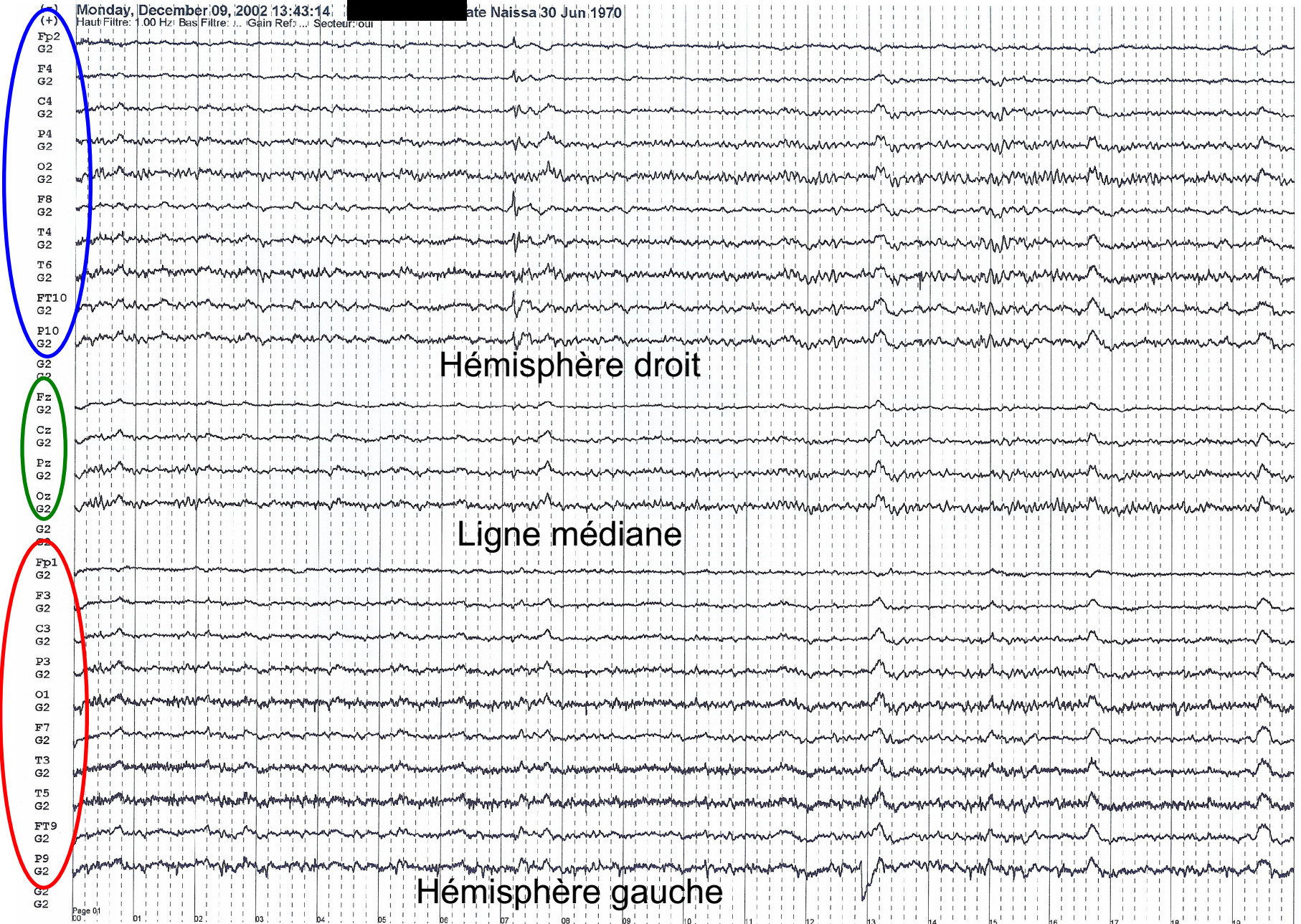


# Montage bipolaire transverse

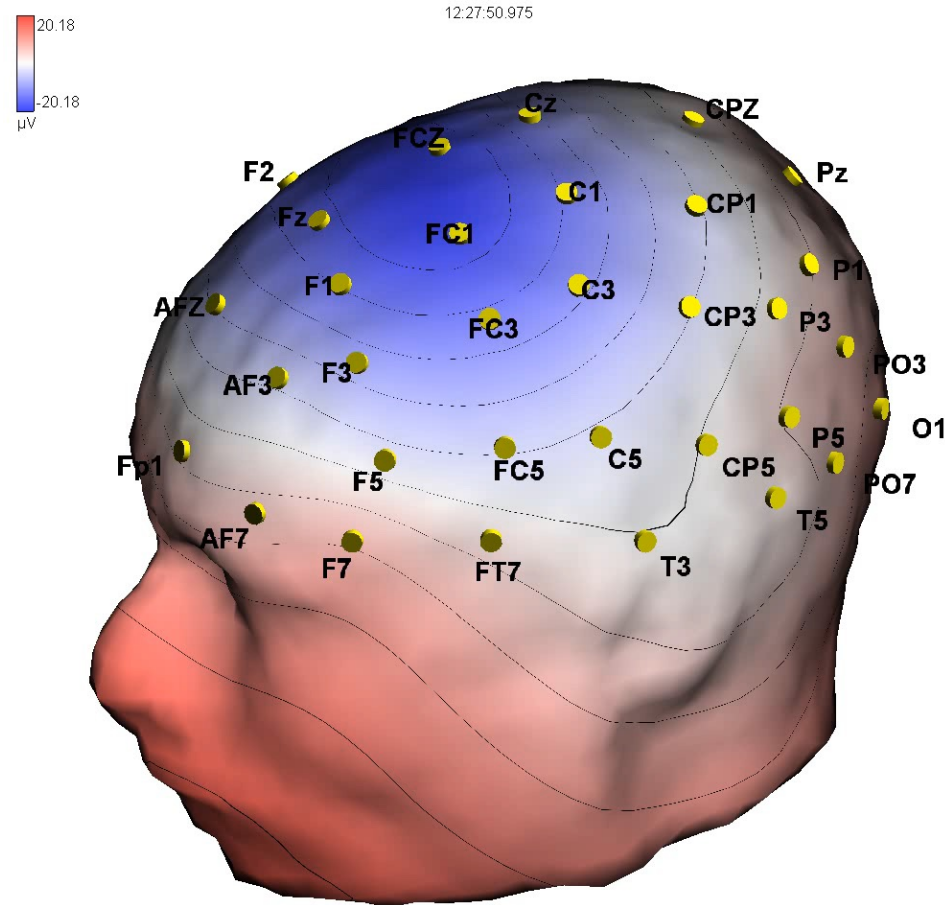




# Montage Référentiel



# Représentation des champs électriques à la surface du cuir chevelu au cours du temps



# Grande dynamique spatiale et temporelle !!!

# Montages EEG

Interprétation du neurologue sur les différents types de montages. Intérêt +++ de l'EEG numérisé.

Il faut savoir que la référence n'est pas parfaitement nulle car il existe toujours une contamination bioélectrique non cérébrale.

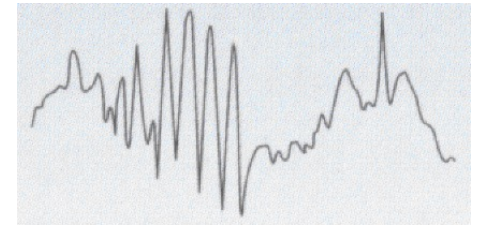
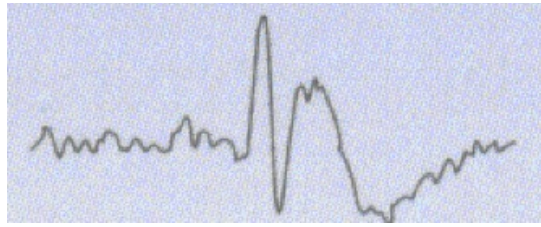
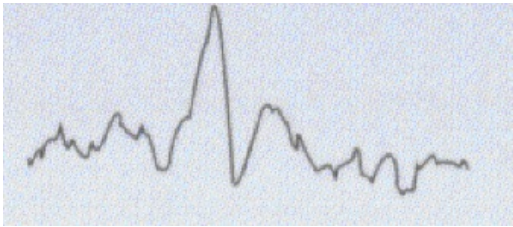
Très généralement, la référence est représentée par le potentiel moyen de l'ensemble des électrodes : référence moyenne (AVG) : référence « virtuelle »

$$AVG = \Sigma \text{Pot(électrodes)} / (\text{nbr électrodes})$$

# Signaux EEG

Comme tous les signaux électroneurophysiologiques, les signaux EEG sont caractérisées par :

- Une forme : monophasique, biphasique, polyphasique



- Une amplitude : qq  $\mu V$  à qq centaines  $\mu V$
- Une répartition spatiale
- Une fréquence : 4 grandes catégories

*Rappel* : Fréquence = nbr cycle / unité de temps (sec)



# Fréquences EEG

Il existe 4 grandes bandes de fréquences en EEG :

- Bande Delta :  $< 3,5$  Hz (généralement 0,1 à 3,5 Hz)
- Bande Theta : 4 à 7,5 Hz
- Bande Alpha : 8 à 13 Hz
- Bande Beta :  $> 13$  Hz

Actuellement Beta : 13 à 30 Hz

- Bande Gamma :  $> 30$  Hz (1990)

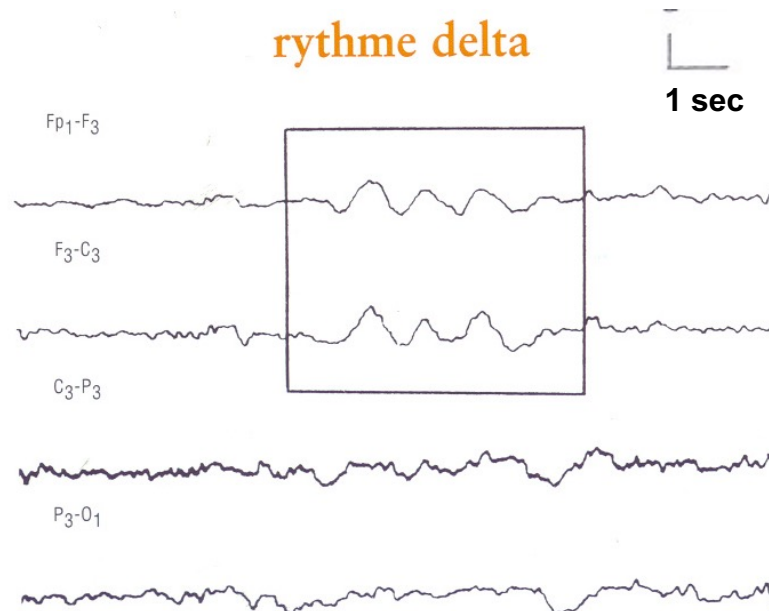
# Signaux EEG

## Rythmes (fréquences) EEG

4 bandes de fréquences :

- **Delta ( $\delta$ )** :  $< 3,5$  c/s (Hz)

Sa présence de manière diffuse ou focale chez un adulte éveillé a toujours une valeur pathologique.



# Signaux EEG

- **Thêta ( $\theta$ )** : 4 à 7 c/s

Très peu abondant, localisation bitemporale, symétrique et synchrone.

Remarque: un rythme  $\theta$  abondant ou asymétrique chez l'adulte éveillé est anormal

rythme thêta

1 sec

F4-T4

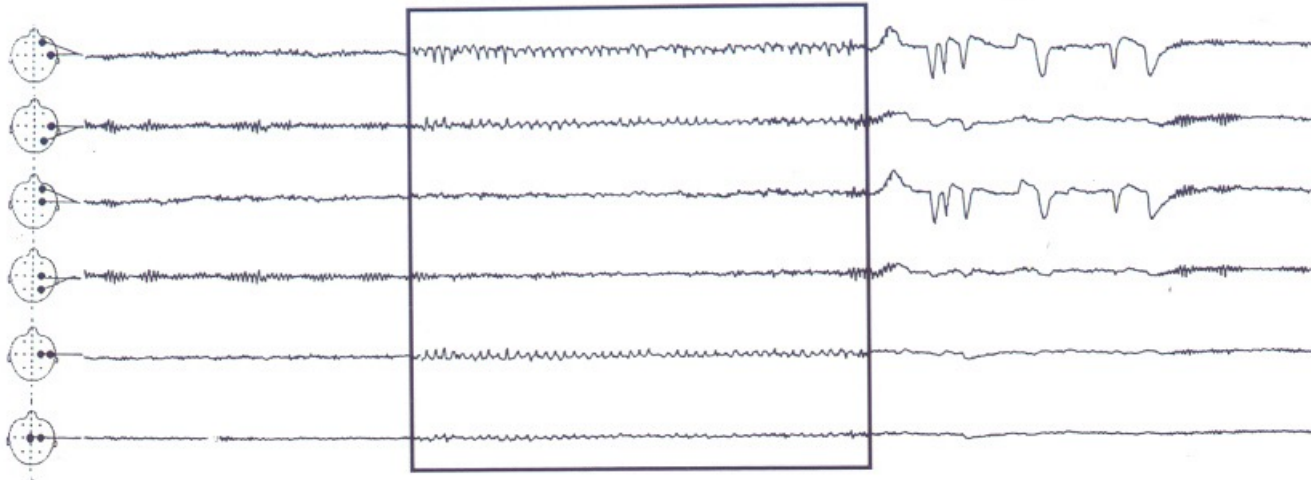
T4-T6

F4-C4

C4-P4

C4-T4

C4-Cz



# Signaux EEG

- **Alpha ( $\alpha$ )** : 8 à 13 c/s (Hz)

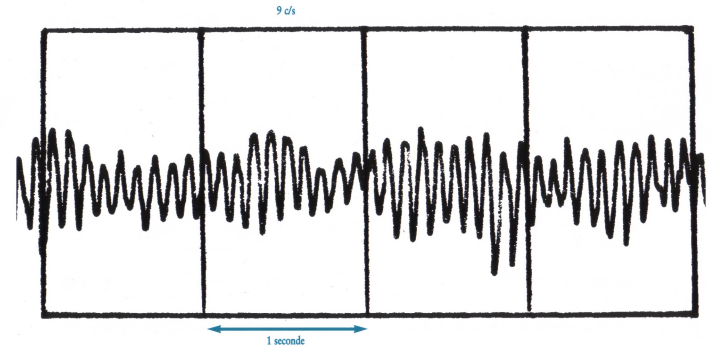
Topographie postérieure (en arrière du vertex (Cz),

Répartition bilatérale et symétrique,

Amplitude voisine de 50 $\mu$ V (max en occipitale),

Morphologie sinusoïdale,

Modulé en fuseaux,



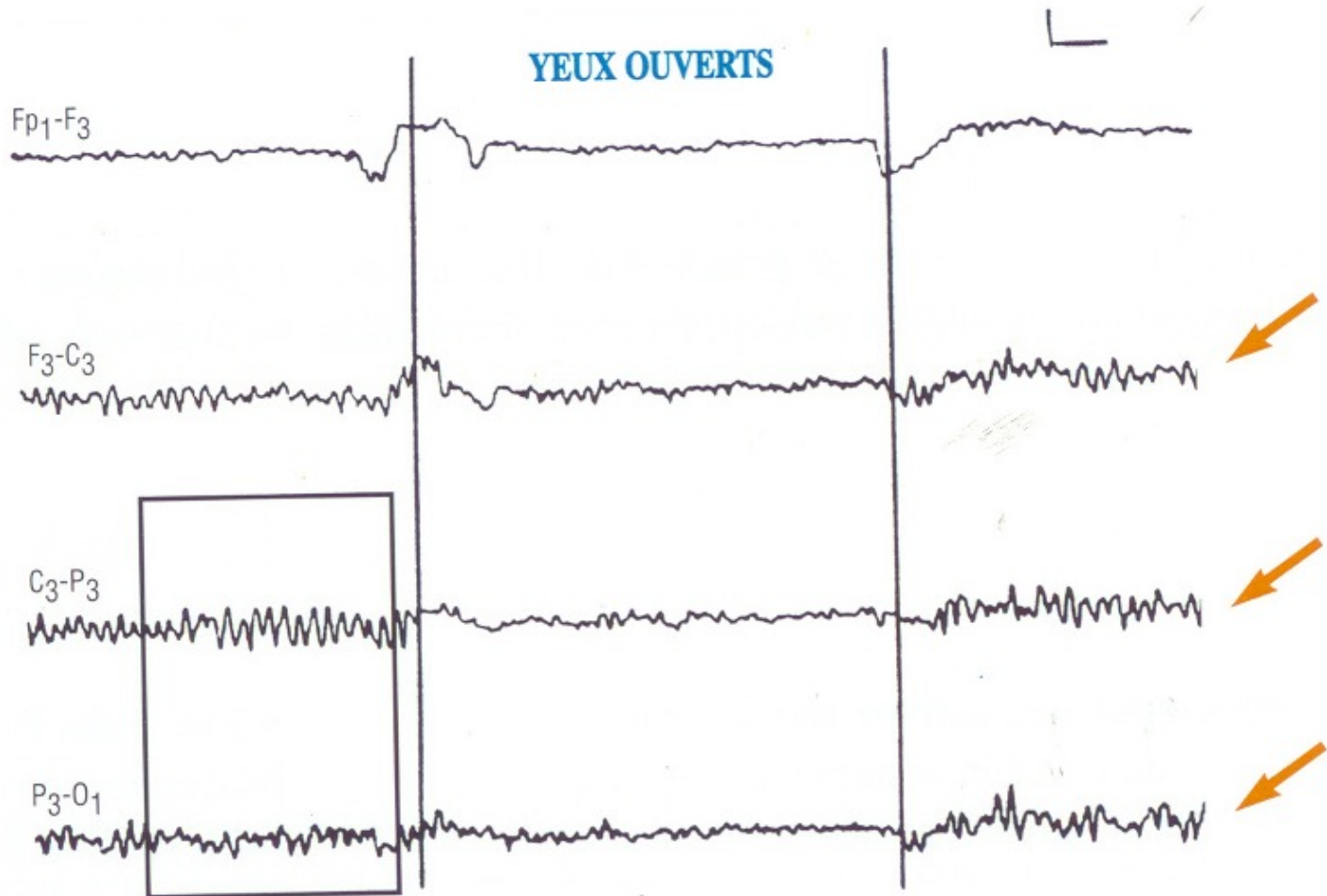
Bloqué par l'ouverture des yeux (réactivité)

Peut être atténué par l'augmentation de la vigilance, de l'attention, et peut disparaître lors d'une activité mentale



# Signaux EEG

rythme alpha



# Signaux EEG

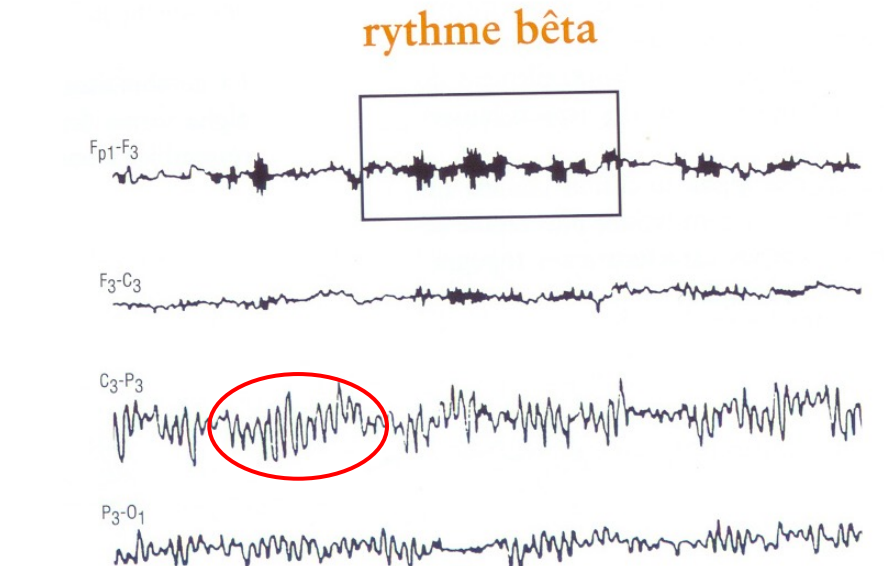
- Bêta ( $\beta$ ) :  $> 13$  c/s

Occupe les régions moyennes des deux hémisphères

Souvent asynchrone

Amplitude très faible ( $< 20\mu\text{V}$ )

Bloqué ou atténué par le mouvement contralatéral (réaction d'arrêt motrice)



catégories :

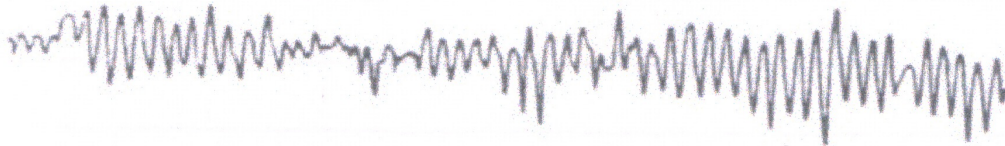
Le rythme BÊTA rapide : Fréquence 25 Hz et Amplitude  $20\mu V$  et le rythme BÊTA lent : Fréquence 16 Hz et Amplitude  $20\mu V$ ,

$\beta$



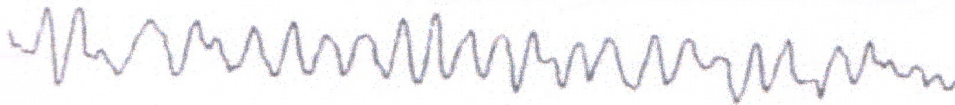
Le rythme ALPHA rapide : Fréquence 12 Hz et Amplitude  $50\mu V$  et le rythme ALPHA lent : Fréquence 9 Hz et Amplitude  $50\mu V$ ,

$\alpha$



Le rythme THÊTA rapide : Fréquence 7 Hz et Amplitude  $50\mu V$  et le rythme THÊTA lent : Fréquence 5 Hz et Amplitude  $50\mu V$ ,

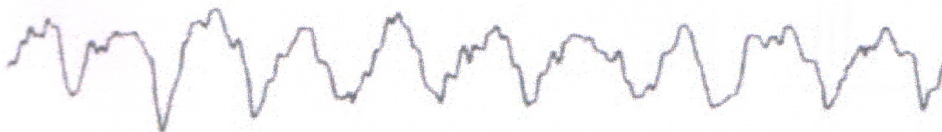
$\theta$



Le rythme DELTA : Fréquence 3 Hz et Amplitude  $50\mu V$ ,

1 sec

$\Delta$



# Les artéfacts

Artéfacts : activités d'origine non cérébrale

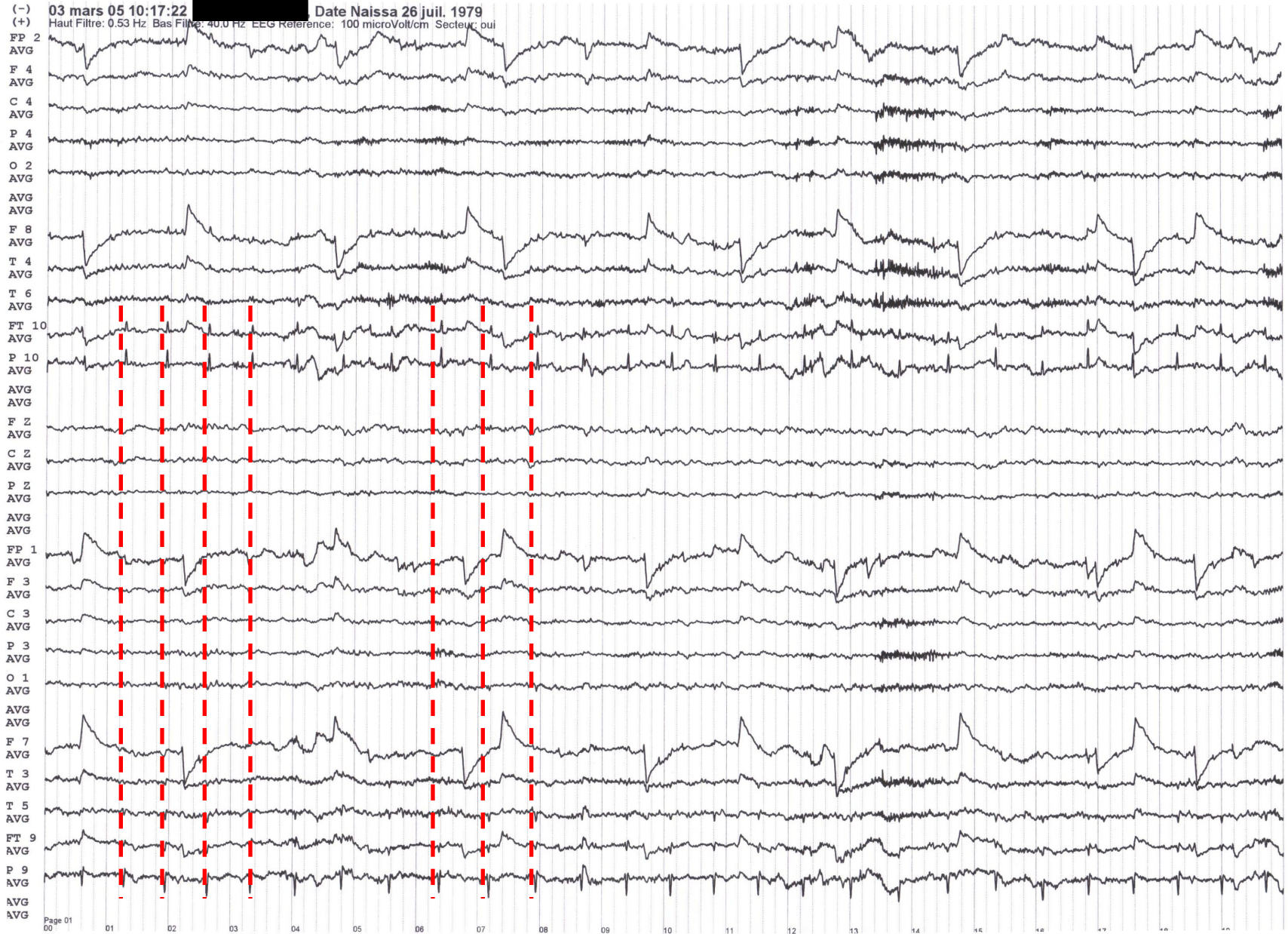
Soit d'origine corporelle: mouvements oculaires, activités musculaires, respiratoires, vasculaires, mâchonnement, toux, ...

Soit d'origine extra-corporelle en rapport avec l'environnement immédiat, l'isolement électrique, le secteur, ...

Attention : certains artéfacts peuvent faire croire à une origine pathologique



# Artéfacts cardiaques





# Artéfacts oculaires





# Artéfacts musculaires



# Réactivité électrophysiologique à la pensée







# Les potentiels évoqués cérébraux

## Electroencephalographie



Images versus objets

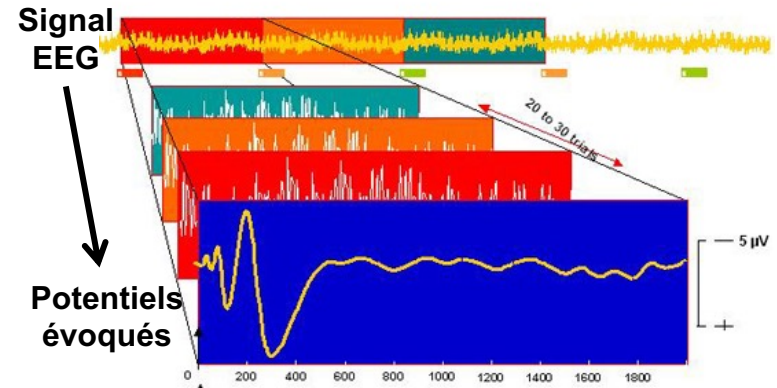


sons versus mots



Sensibilité versus motricité

⚡ Stimulations répétitives ⚡

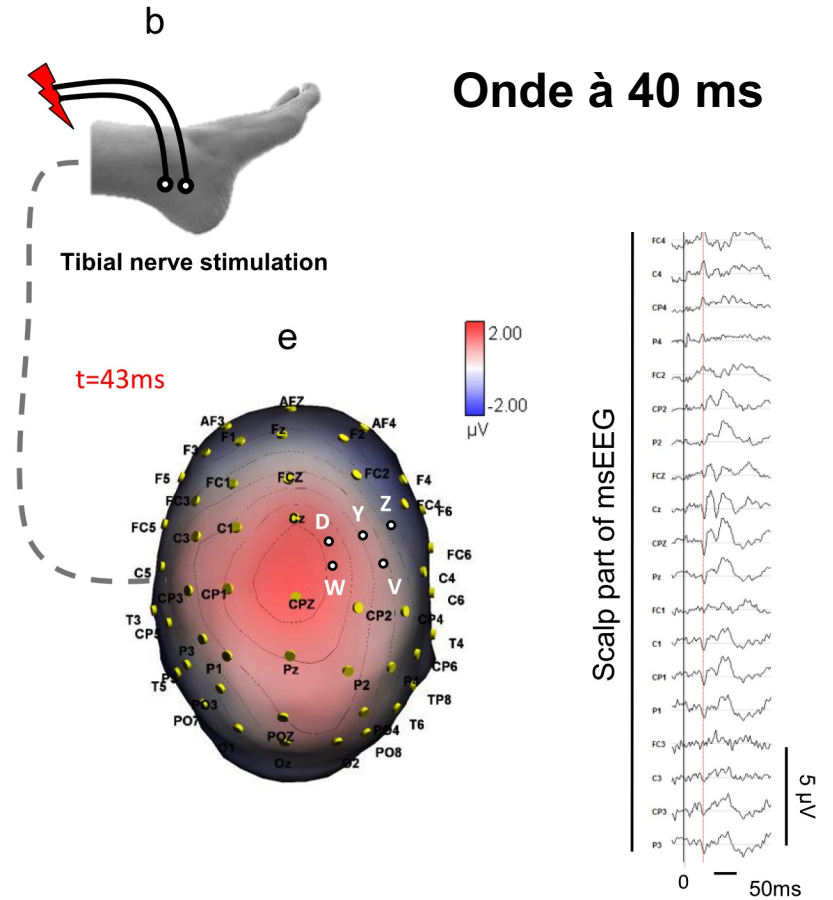
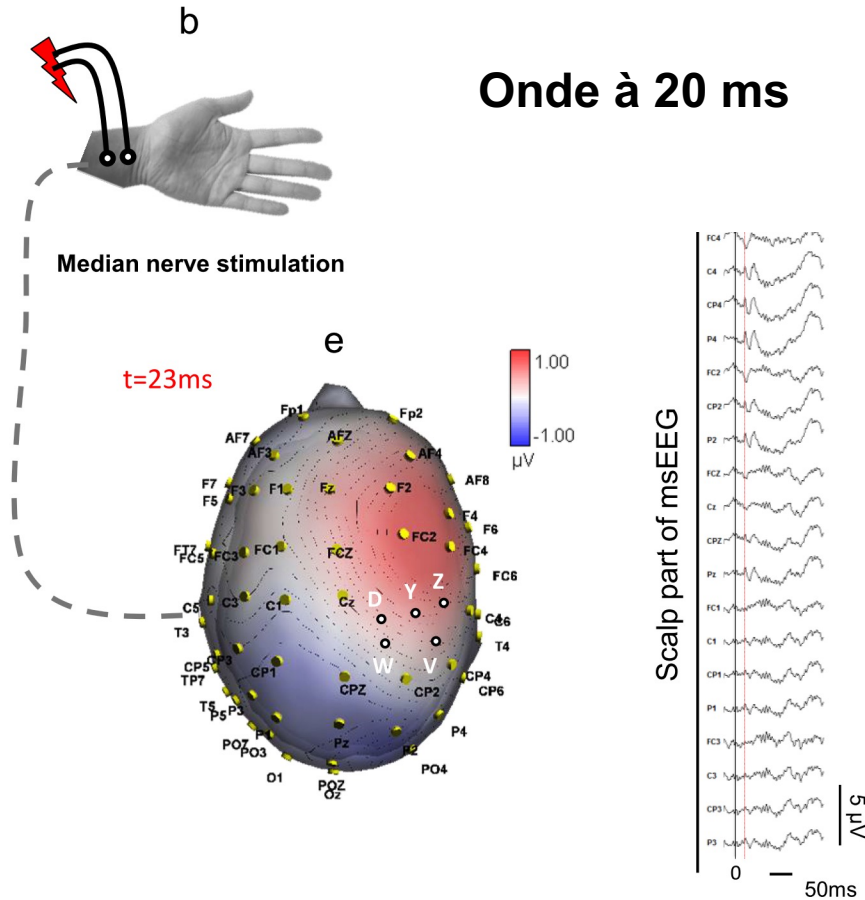


Onde électrique **spécifique** à la stimulation

- Délai : ex = 300 ms
- Polarité : Négative ou Positive
- Localisation / Topographie
- Amplitude (nombre de neurones activés)

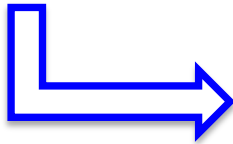
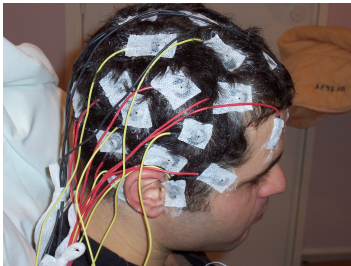
Exemple : P300

# Potentiels évoqués

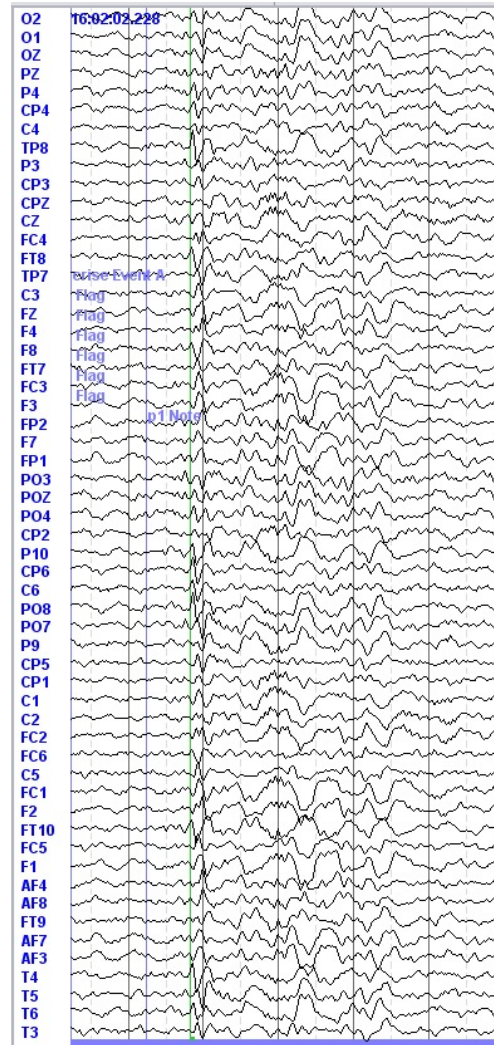


# Comment cartographier le cerveau de manière non invasive

## Electroencéphalographie de surface



Non invasif  
Echelle temporelle  
Activité global  
Mise en œuvre



Distance  
Os  
Mélange de sources

# StéréoElectroEncephaloGraphie (SEEG) :

## Implantation des électrodes intracérébrales

QUI : épilepsie **partielle réfractaires aux traitements médicamenteux**

POURQUOI : localiser la zone de départ des crises et les aires fonctionnelles environnantes

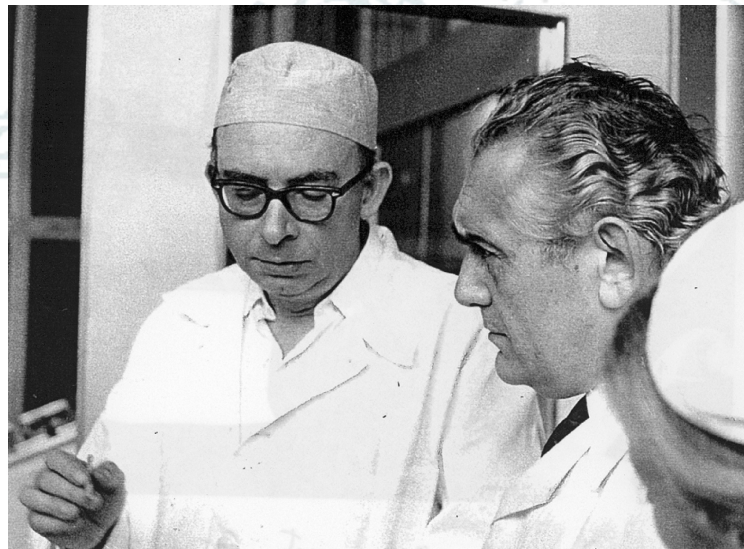
FINALITE : retrait chirurgical de la zone malade (guérison 80%)



# Contexte Historique

Années 1950 : Explorations intracrâniennes (ECoG), Jasper et Penfield, MNI Montréal, Canada.

Années 1960 : Explorations intracérébrales (SEEG), Talairach et Bancaud, Hôpital St Anne, France.



*Jean Bancaud (Neurologue, à gauche) & Jean Talairach (Neurochirurgien, à droite)*

## Objectifs :

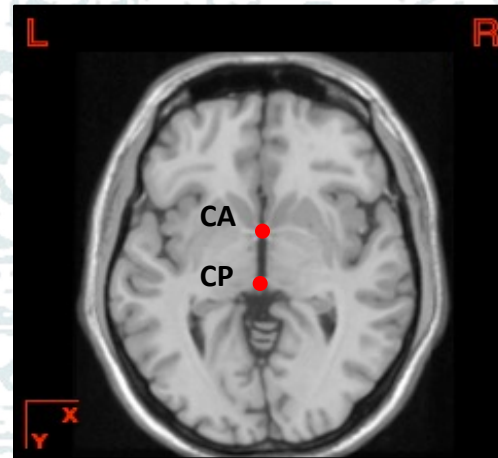
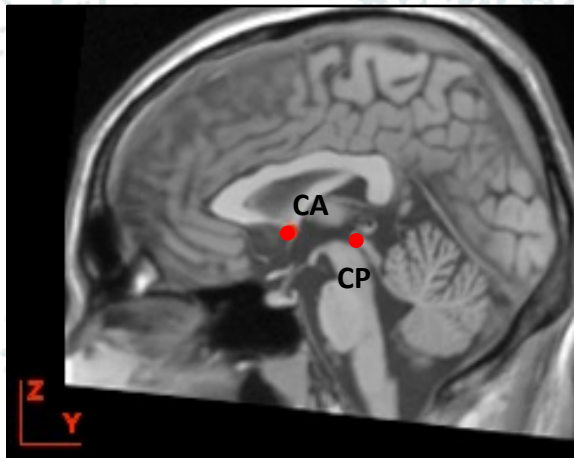
L'investigation pré-chirurgicale des crises d'épilepsie et la chirurgie de l'épilepsie

# Atlas de Talairach

Création d'un système de coordonnées stéréotaxiques tridimensionnel pour l'exploration de cibles anatomiques précises : référentiel de Talairach

Ce système **normalisé** permet de repérer n'importe quelle structure cérébrale d'un individu donné indépendamment de la taille et de la forme de son cerveau.

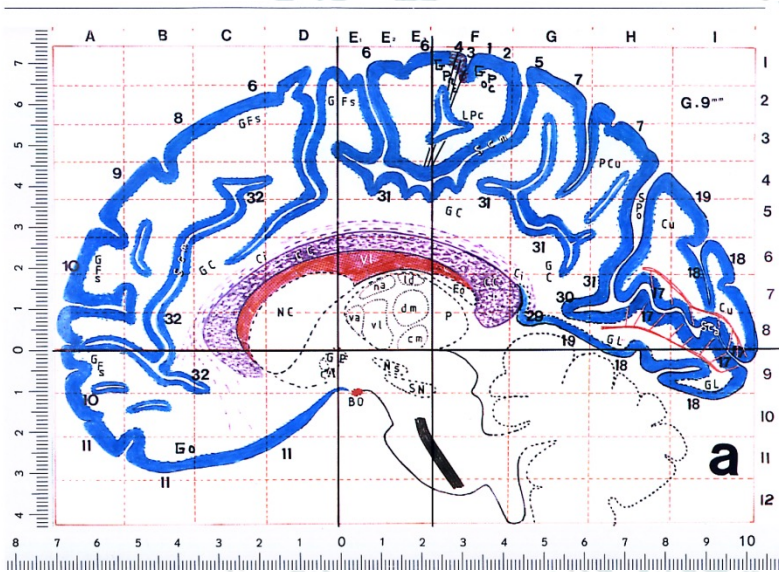
Repères anatomiques utilisés (à l'époque par ventriculographie) :  
commissure blanche antérieure & commissure blanche postérieure



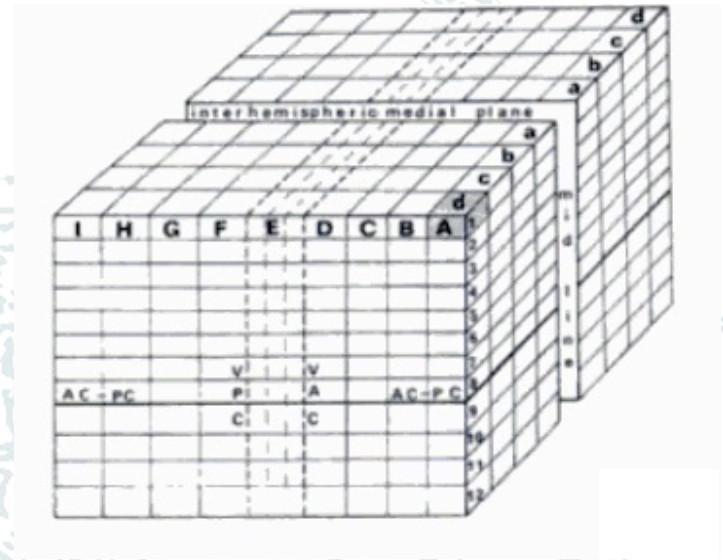


# Atlas de Talairach

Le cerveau normalisé est alors découpé selon une grille et des planches



## Exemple de planche



*Volume 3d de l'Atlas de Talairach*

Nomenclature : lettres majuscules selon axe y d'avant vers l'arrière  
lettres minuscules selon axe x du centre vers l'extérieur  
chiffres selon axe z du haut en bas

Centre du repère : Commissure blanche antérieure

## Face interne



# Procédure d'implantation (2/8)

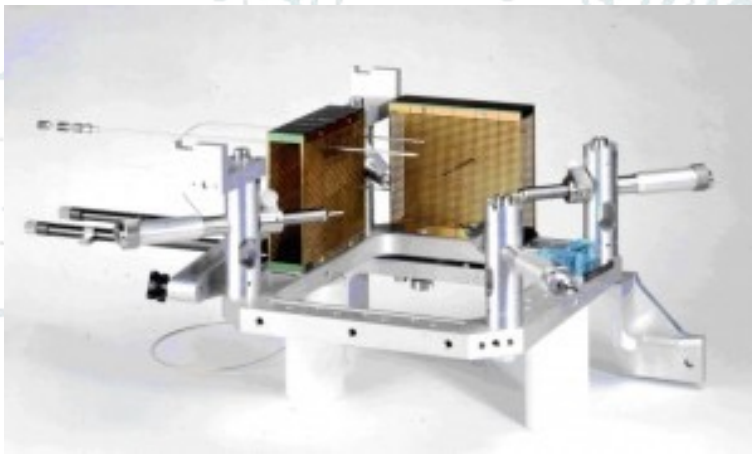
Le nombre d'électrodes et leurs emplacements sont définis

En moyenne 10 électrodes sont implantées (5 à 15). Implantation bilatérale possible

Les cibles et les trajectoires d'électrodes sont étudiés à l'avance sur une console IRM avec une séquence anatomique **3D** en contraste **T1** avec ép. coupe de **1,2mm**

Implantation des électrodes dépend du type de cadre de stéréotaxie :

Cadre de Talairach



Implantation orthogonale

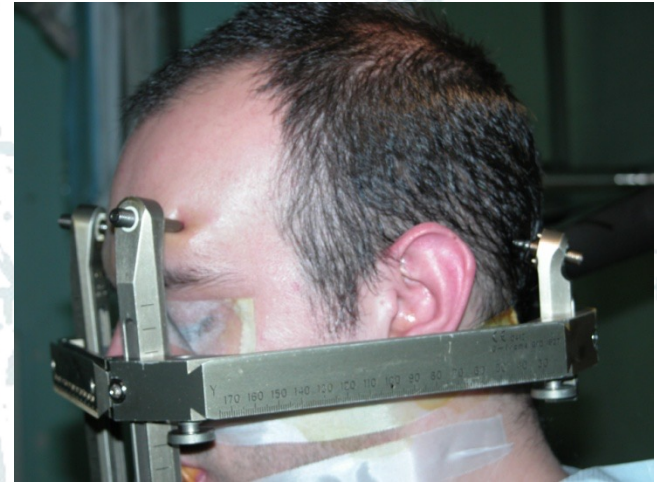
Cadre de Leksell (mixte)



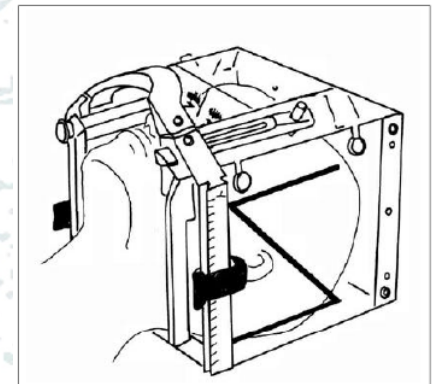
Implantation orthogonale et oblique

# Procédure d'implantation (3/8)

2. Fixation du cadre stéréotaxique sous AG : 4 vis dans table externe de l'os (2 antérieurs et 2 postérieurs)



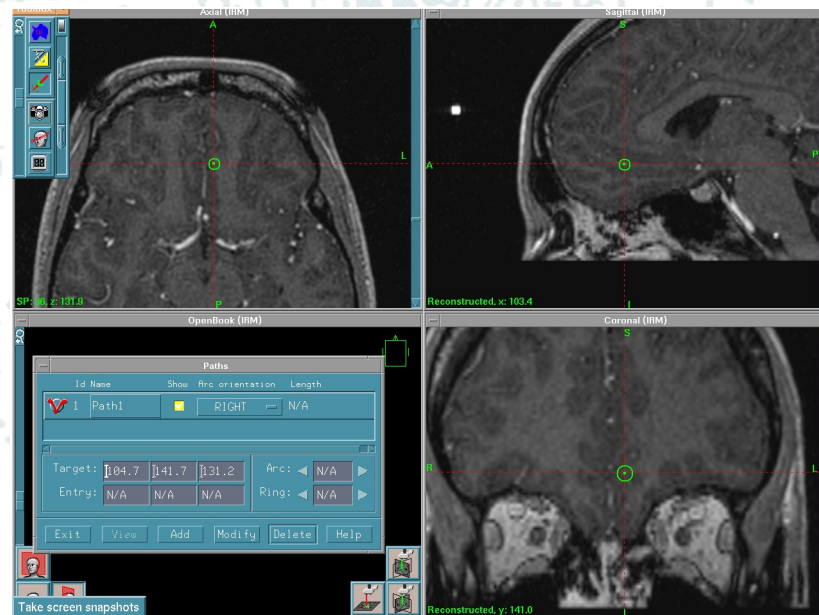
3. Imagerie IRM avec cadre en place + boîtier de repérage  
→ Gadolinium (mise en évidence du réseau artériel et veineux)



# Procédure d'implantation (4/8)

## 4. Réalisation du schéma d'implantation définitif à partir de l'IRM cadre en place (Logiciel Surgiplan, Elekta®)

- repérage 3D de la cible anatomique
- choix de la trajectoire en fonction des structures anatomiques et des vaisseaux sanguins
- choix du point d'entrée sur le scalp



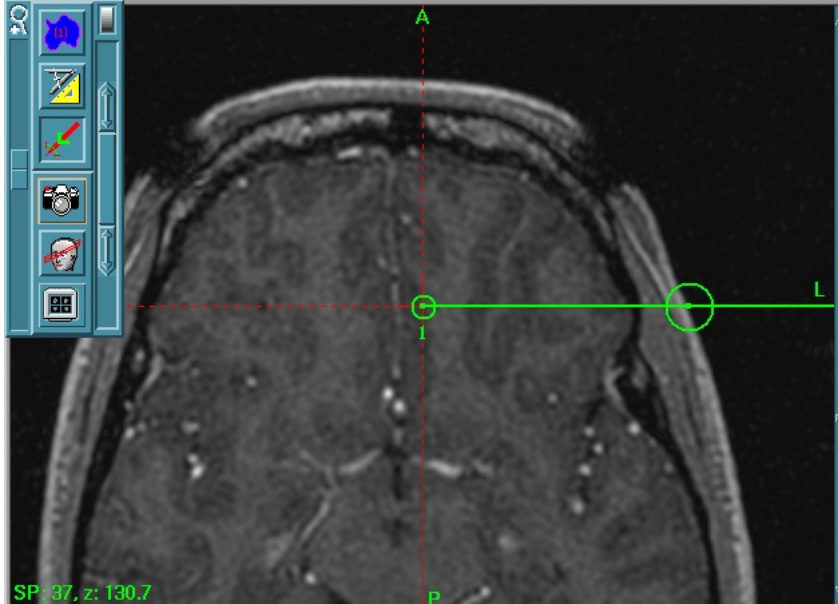




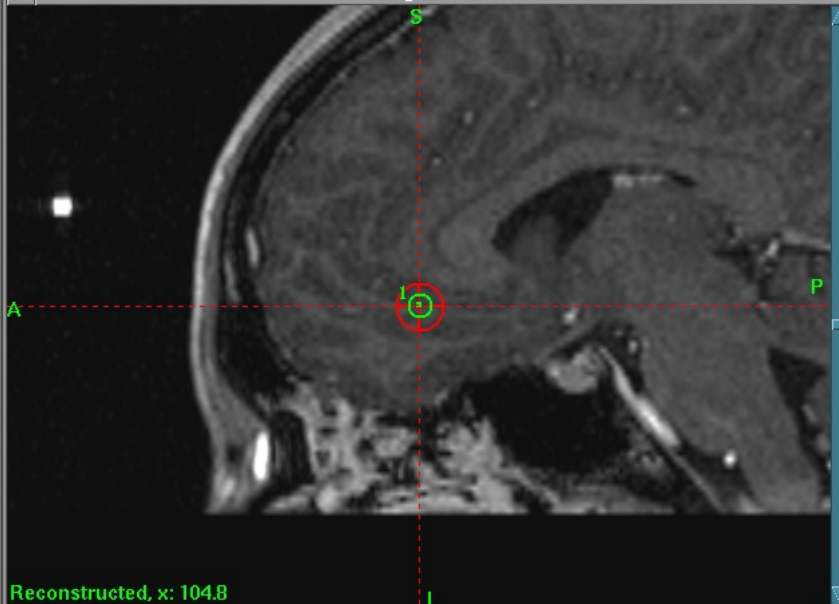
Toolbox



Axial (IRM)



Sagittal (IRM)

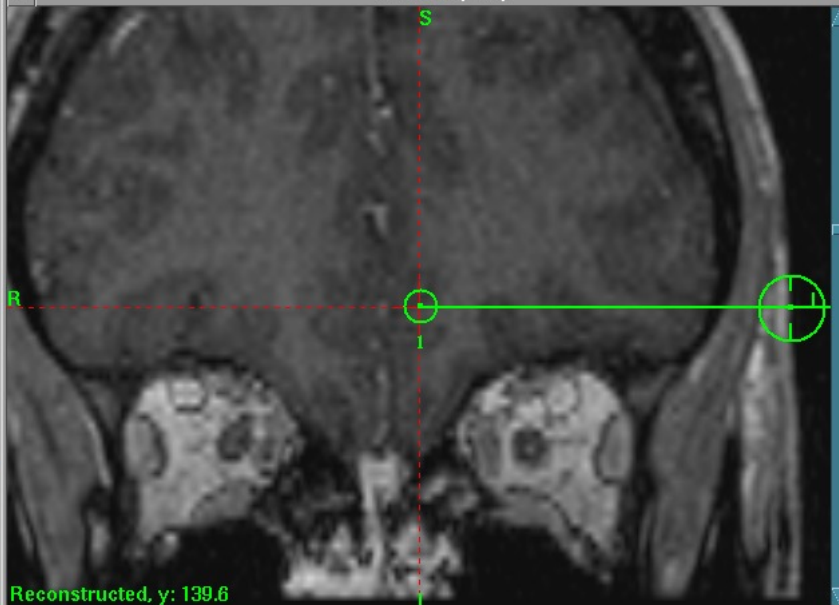


OpenBook (IRM)

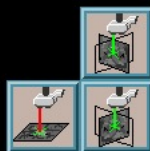
Paths

| Id                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Name  | Show                                | Arc orientation | Length  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------|---------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Path1 | <input checked="" type="checkbox"/> | ANT             | 55.7 mm |
| <div> <div>Target: <input type="text" value="106.0"/> <input type="text" value="140.3"/> <input type="text" value="129.5"/></div> <div>Entry: <input type="text" value="161.7"/> <input type="text" value="139.1"/> <input type="text" value="129.4"/></div> <div>Arc: <input type="text" value="91.2"/></div> <div>Ring: <input type="text" value="0.1"/></div> </div> |       |                                     |                 |         |
| <div> <div>Exit</div> <div>View</div> <div>Add</div> <div>Modify</div> <div>Delete</div> <div>Help</div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                         |       |                                     |                 |         |

Coronal (IRM)



Take screen snapshots



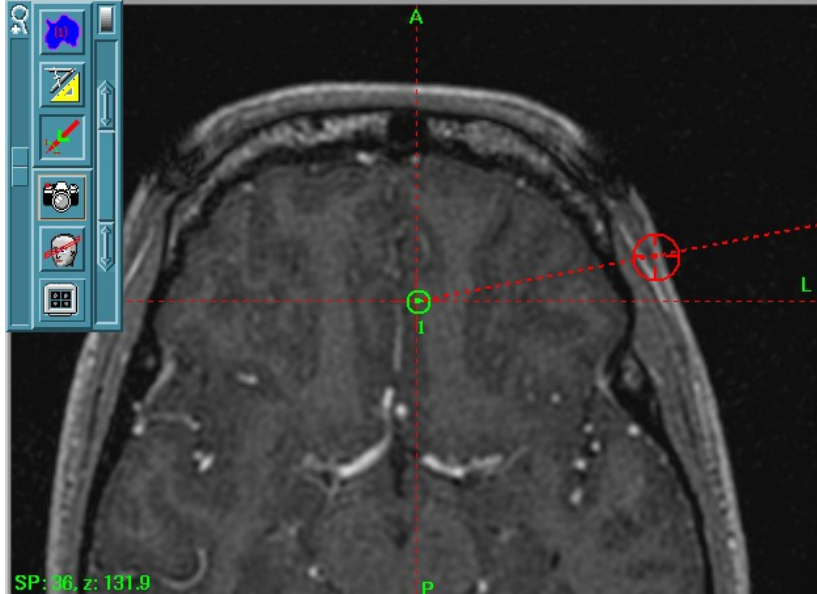




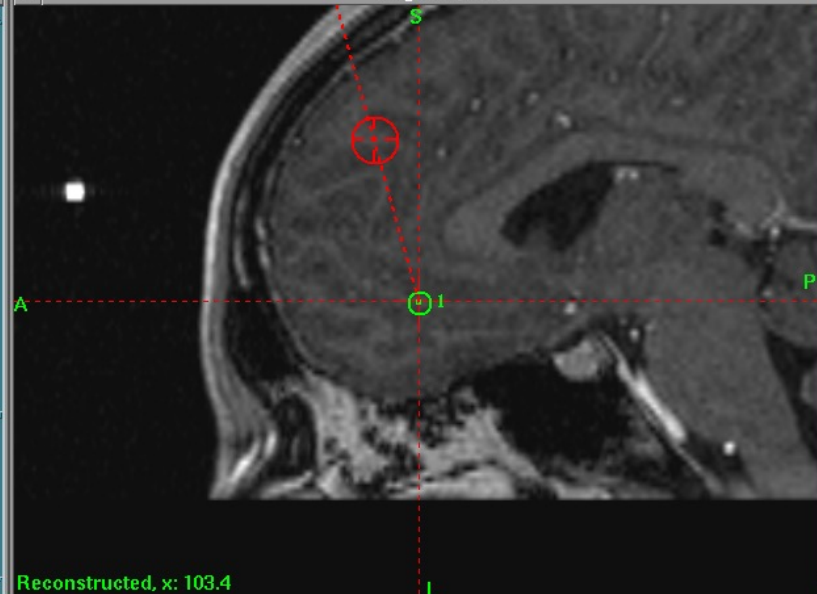
Toolbox



Axial (IRM)



Sagittal (IRM)



OpenBook (IRM)

Paths

| Id | Name  | Show                                | Arc orientation | Length  |
|----|-------|-------------------------------------|-----------------|---------|
| 1  | Path1 | <input checked="" type="checkbox"/> | RIGHT           | 62.5 mm |

Target:

Entry:

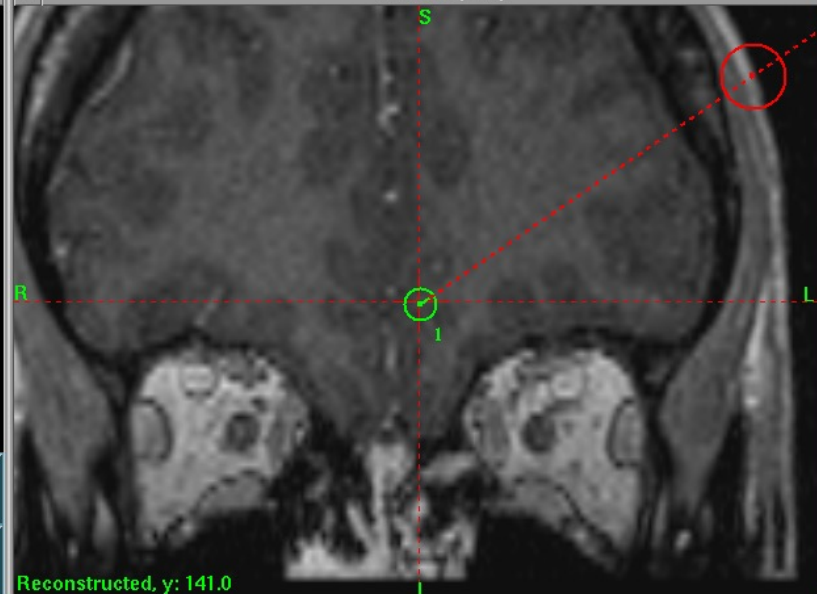
Arc:

Ring:

Exit View Add Modify Delete Help

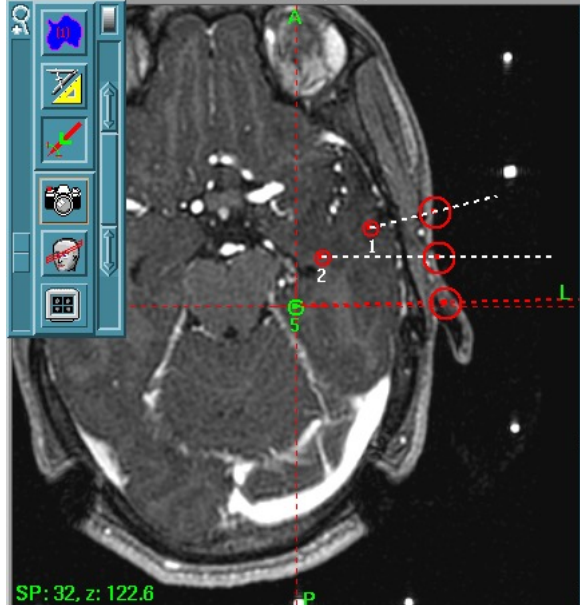
Take screen snapshots

Coronal (IRM)



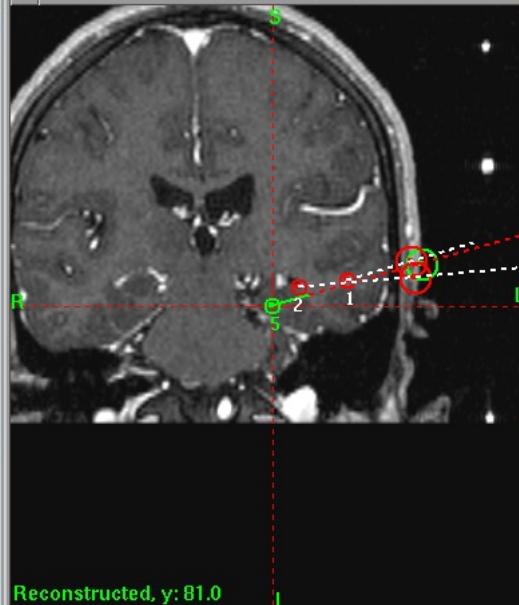


Axial (IRM)



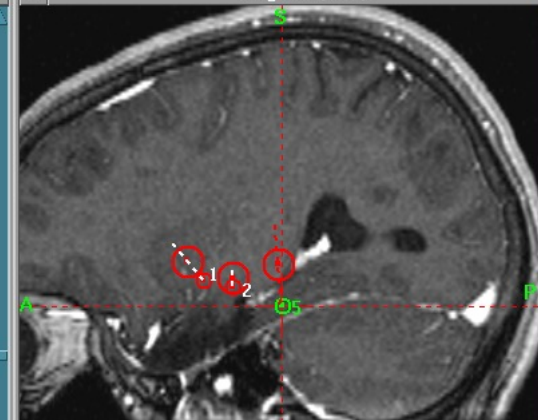
SP: 32, z: 122.6

Coronal (IRM)



Reconstructed, y: 81.0

Sagittal (IRM)



Paths

| Id | Name | Show                                | Arc orientation |      | Length |
|----|------|-------------------------------------|-----------------|------|--------|
|    |      |                                     | ANT             | POST |        |
| 5  | C'   | <input checked="" type="checkbox"/> | ANT             |      | 50.1   |

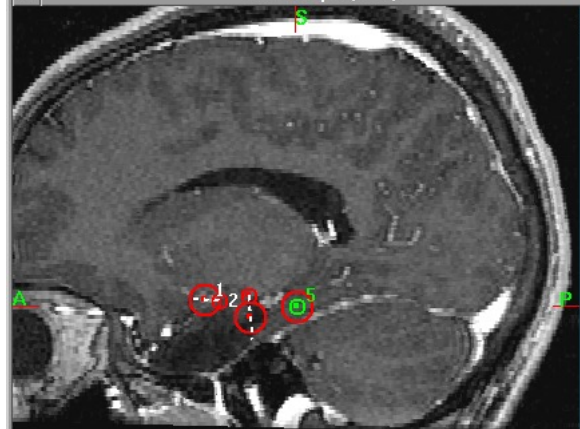
  

|         |       |      |       |         |
|---------|-------|------|-------|---------|
| Target: | 125.3 | 81.3 | 123.3 | Arc: ◀  |
| Entry:  | 173.7 | 81.0 | 110.2 | Ring: ◀ |

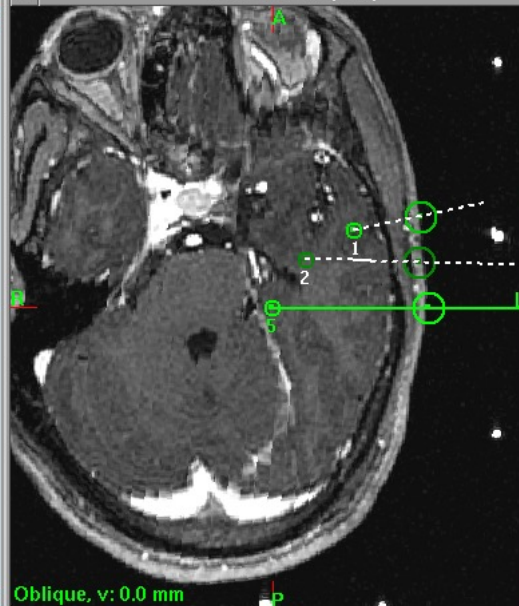
  

|      |      |     |        |        |
|------|------|-----|--------|--------|
| Exit | View | Add | Modify | Delete |
|------|------|-----|--------|--------|

Path's Eye (IRM)

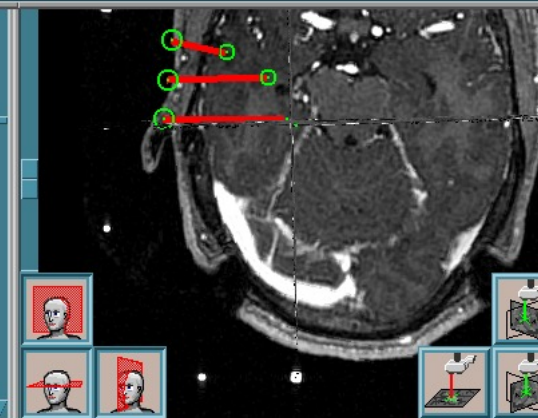


Arc Parallel (IRM)



Oblique, v: 0.0 mm

Take screen snapshots





# Procédure d'implantation (5/8)

Pour chaque électrode implantée, le logiciel fournit :

- Les coordonnées x, y, z du cadre
- Les angles de la trajectoire (arc et ring)
- La distance (d) entre cible & point d'entrée (utile pour le choix de l'électrode)

## 5. Réglages et positionnement de l'arceau sur le cadre stéréotaxique

[Vidéo cadre](#)

# Procédure d'implantation (6/8)

**6.** Forage de la boîte crânienne et fixation d'une embase au point d'entrée sur le scalp

L'embase (percée) permet le passage de l'électrode et le blocage de celle-ci pendant la durée de l'examen SEEG

**7.** Calcul de la profondeur d'implantation ( $p$ ) =  $190 - d$  (cadre  $\rightarrow$  embase)

190 = distance fixe entre l'origine 0 du cadre et la cible

**8.** Introduction d'une guide de longueur ( $p$ ) dans le cortex cérébral pour réaliser le passage de l'électrode

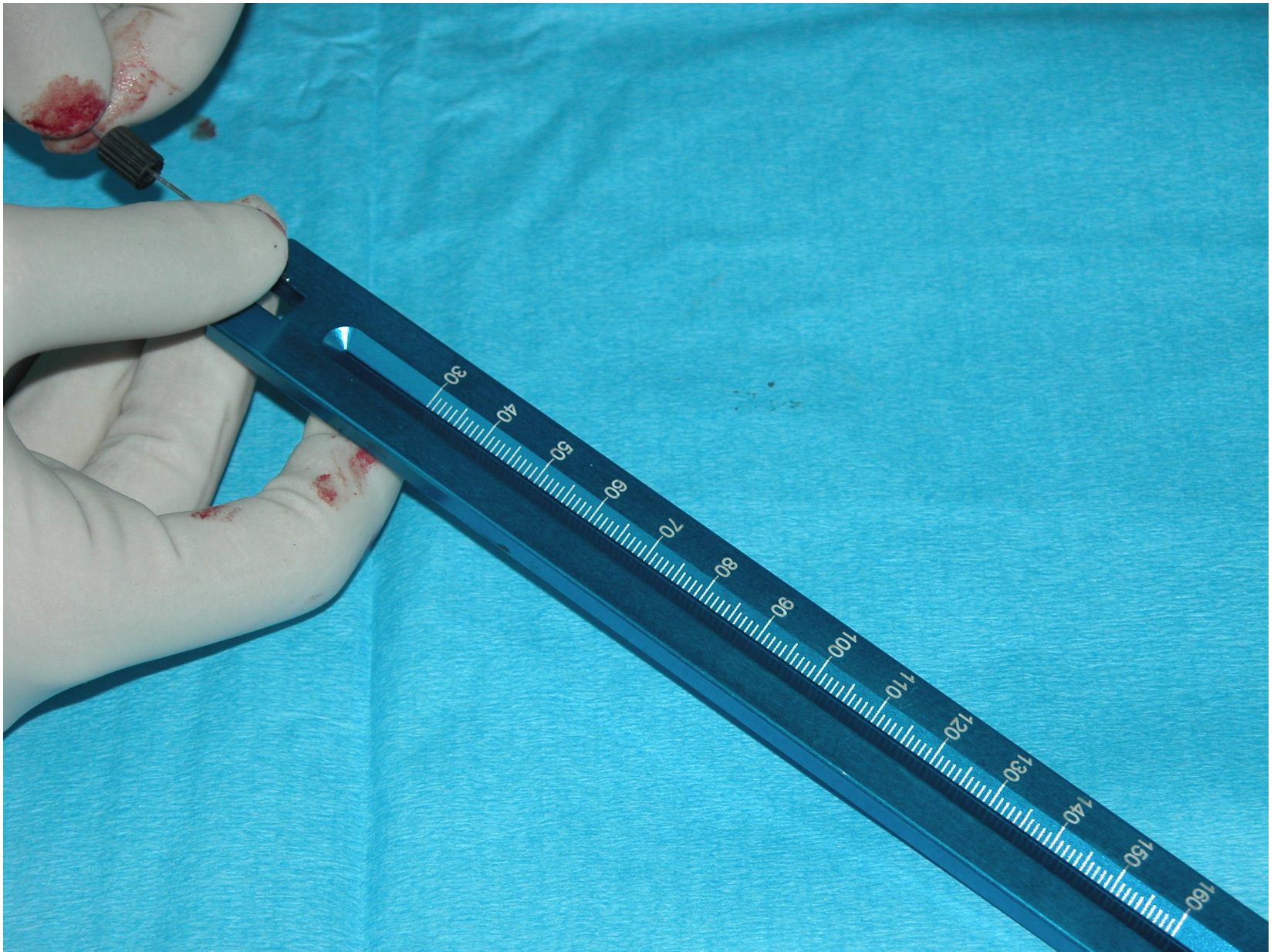


**9.** Mise en place de l'électrode stérile au travers de l'embase et fixation par un bouchon hermétique





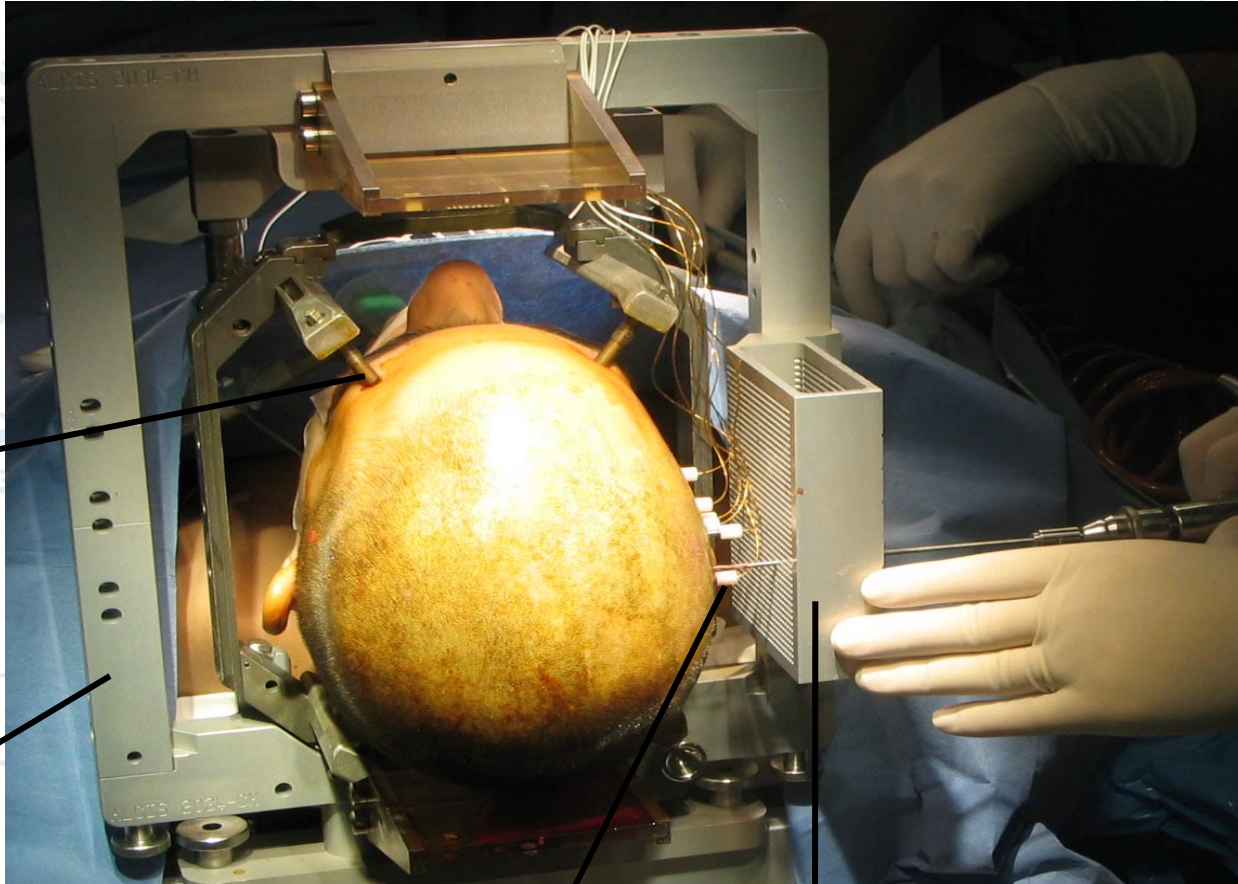






# Procédure d'implantation (7/8)

Exemple de la fixation d'une embase avec un cadre de Talairach



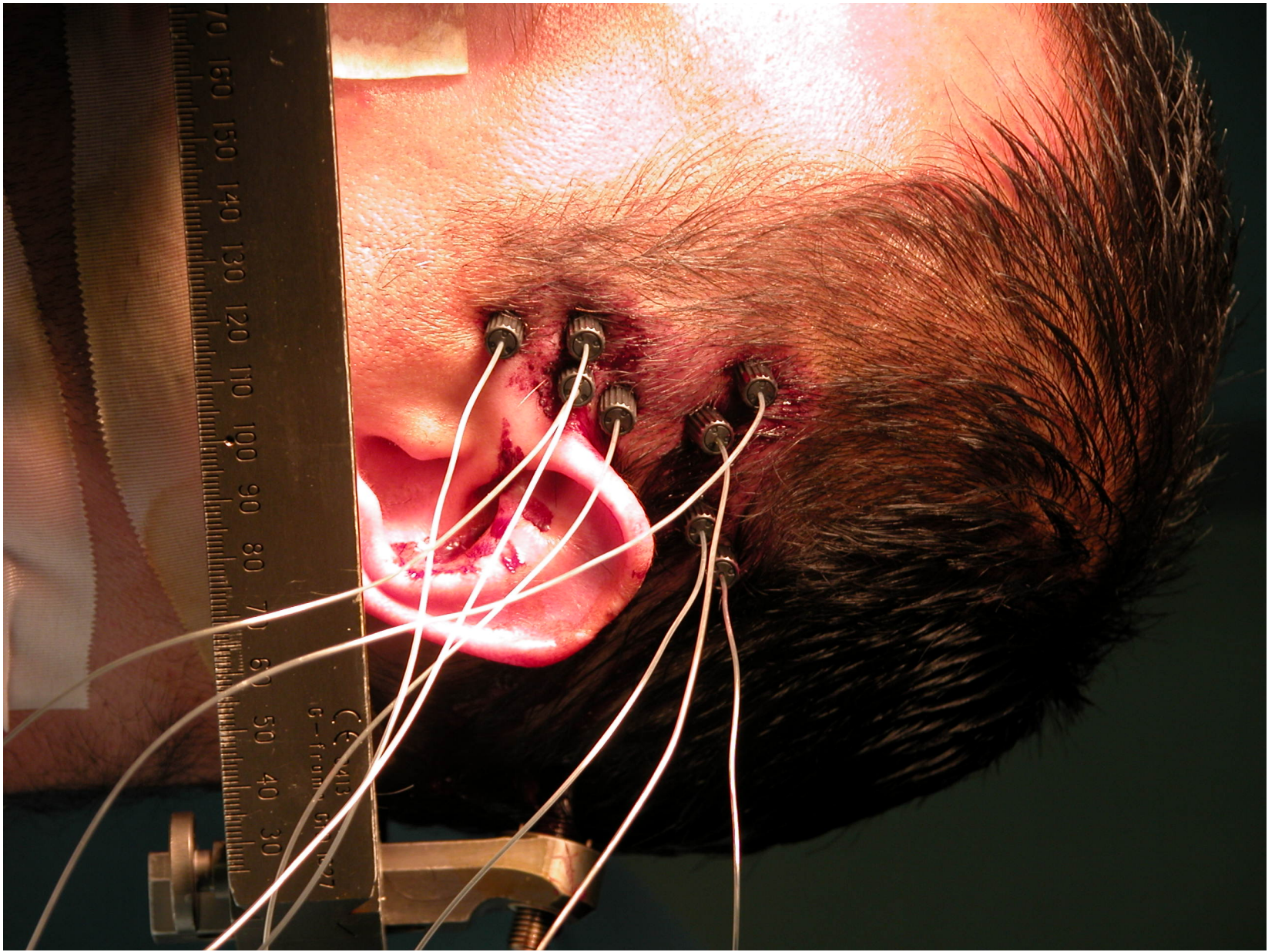
Vis de fixation

cadre

Bouchon hermétique

Grille de Talairach







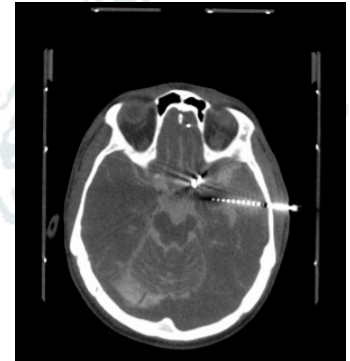
# Procédure d'implantation (8/8)

**10.** Une fois toutes les électrodes implantées, l'arceau est retiré. Le boîtier de repérage est repositionné sur le cadre



**11.** Réalisation d'un scanner cadre en place pour :

- repérer la position des électrodes (identification des structures)
- vérifier l'absence d'hémorragies
- contrôler les trajectoires réelles



**12.** Retrait du cadre

Pose de compresses imbibées de betadine en gel autour des embases

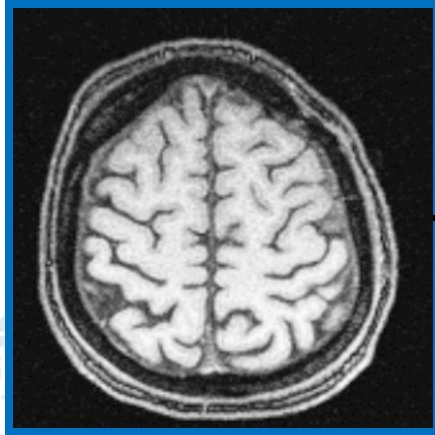
Réalisation d'une capeline



Fin de l'Anesthésie Générale (durée = 6h00)

# Fusion d'images

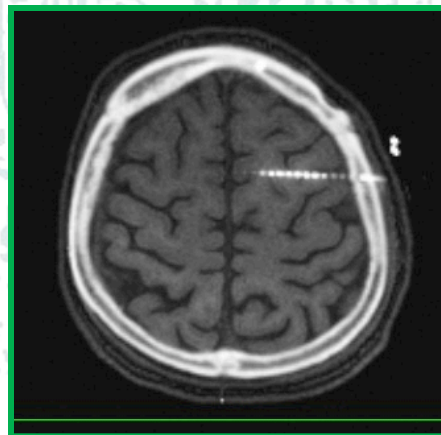
IRM pré-implantatoire



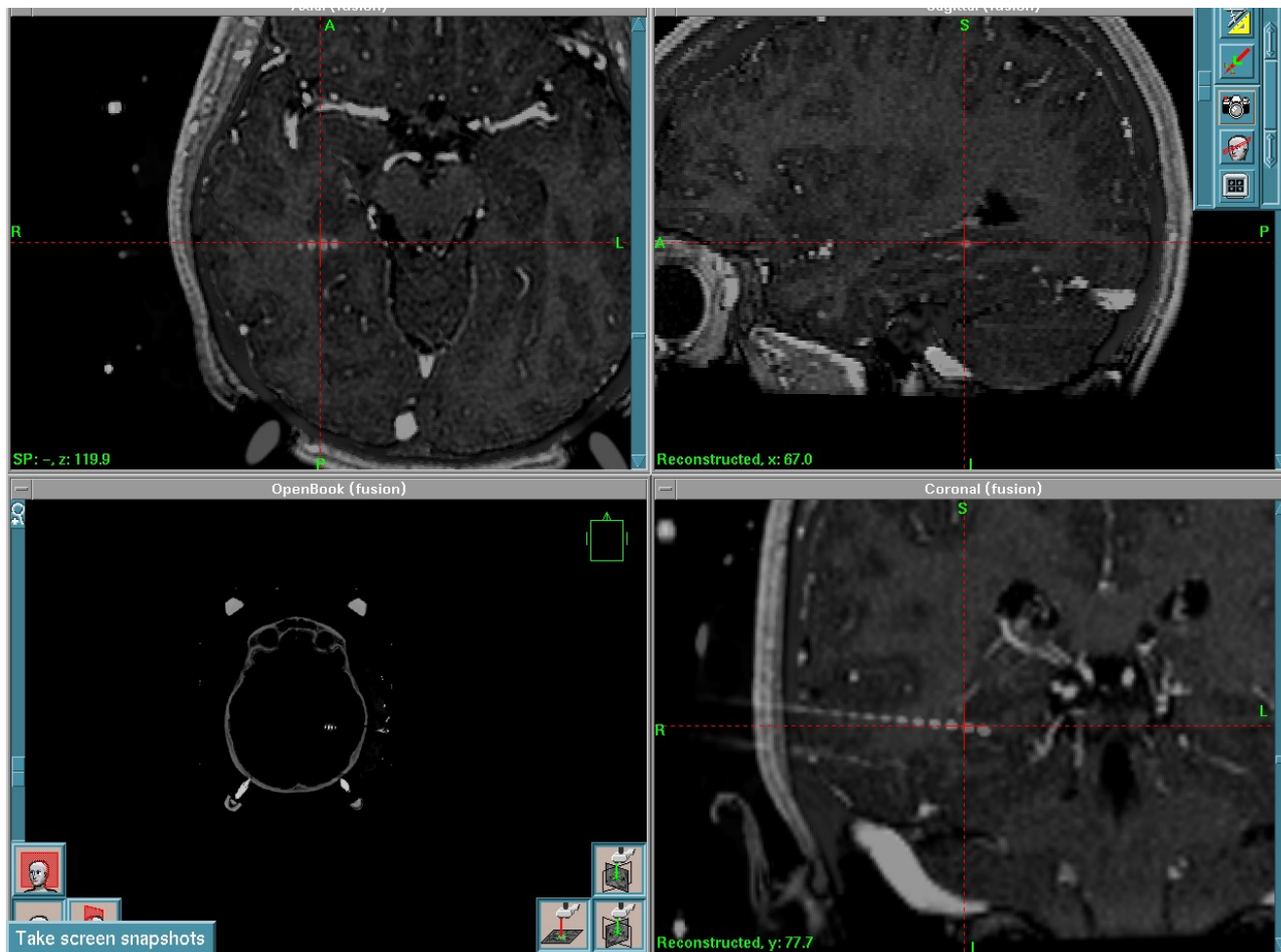
Scan post-implantatoire



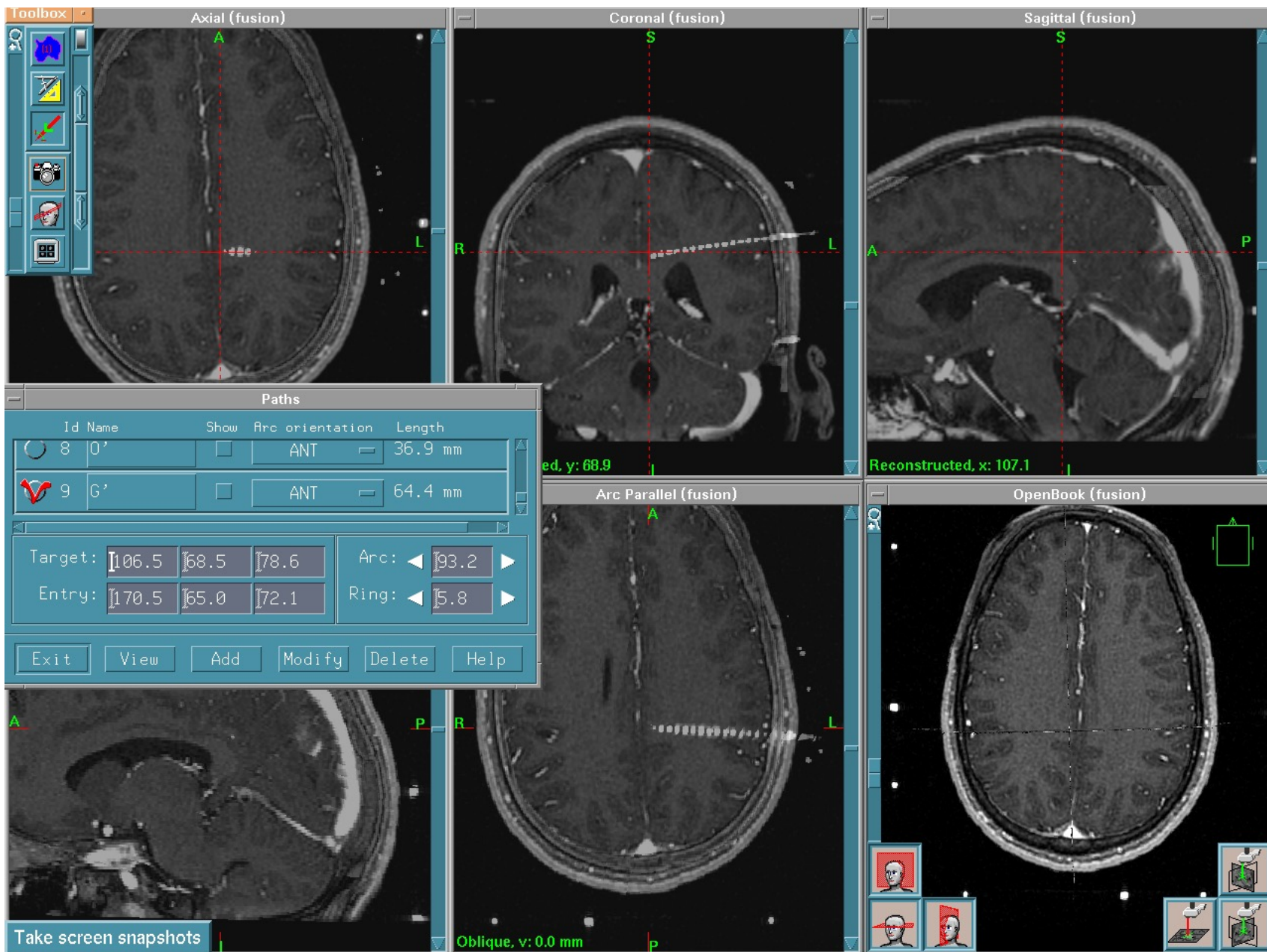
Fusion Scan-IRM



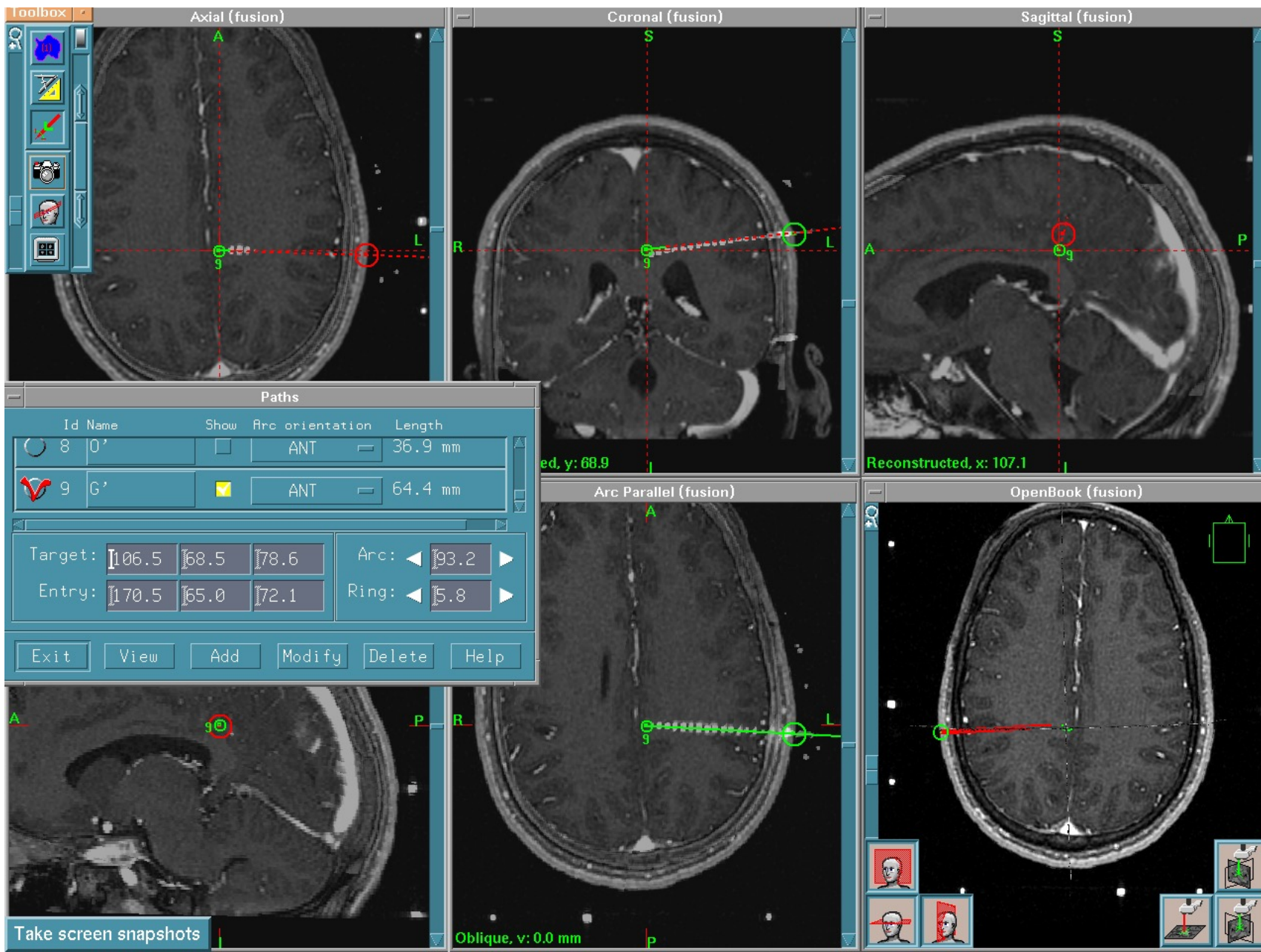
# Fusion d'images

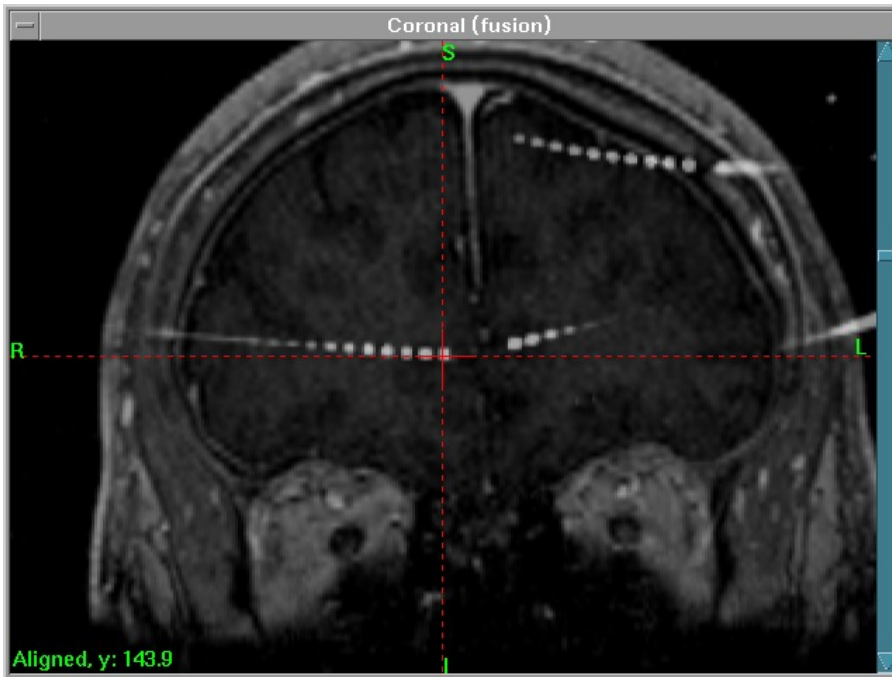








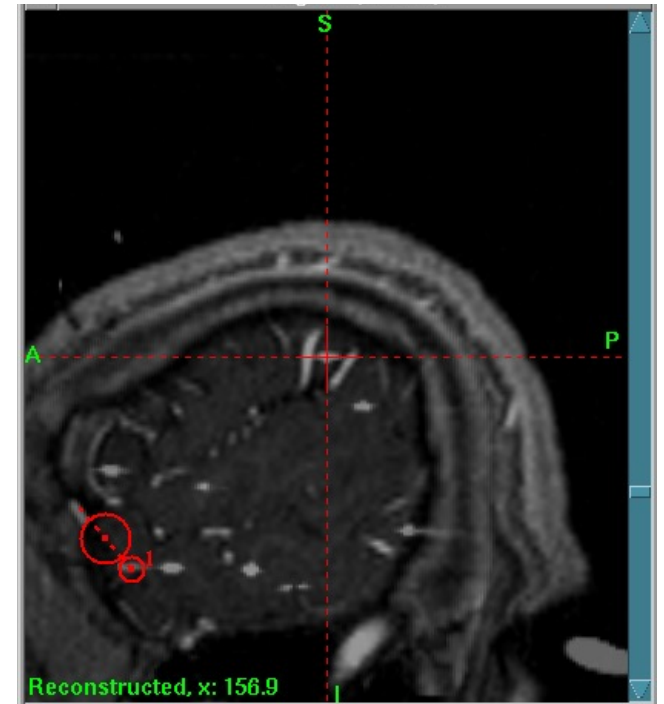




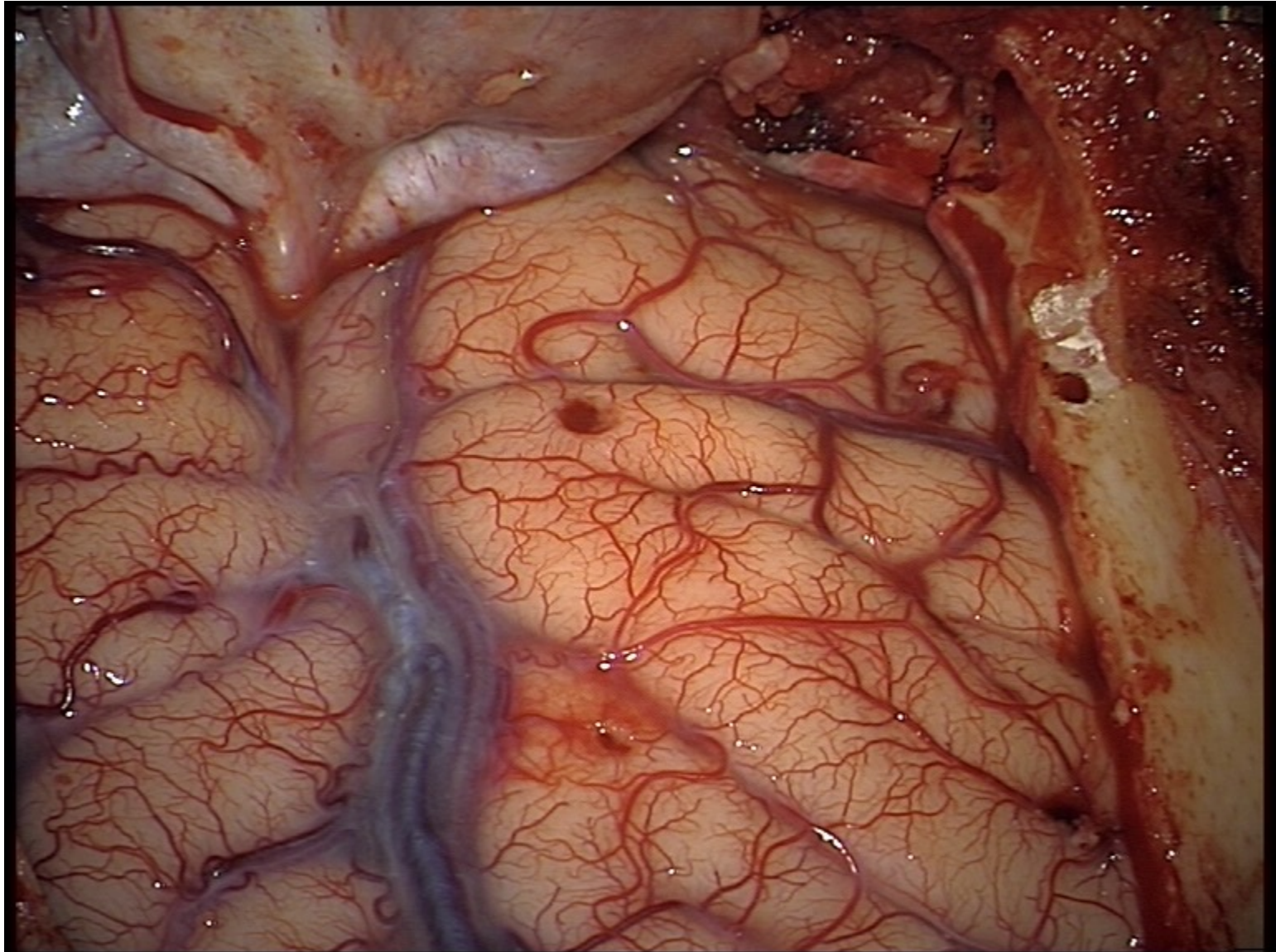
➡ Déviation de trajectoire

### Sécurité vasculaire :

- Qualité de la définition vasculaire sur la séquence IRM
- Précision du logiciel
- Précision du cadre



# Traces des électrodes



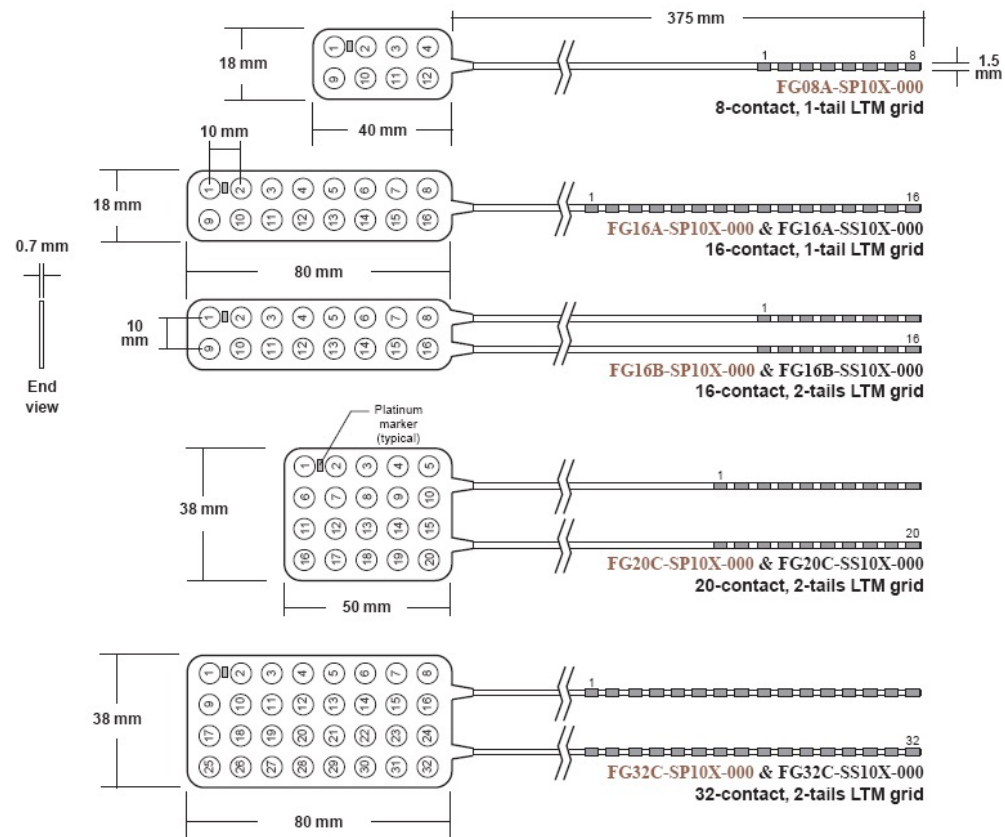
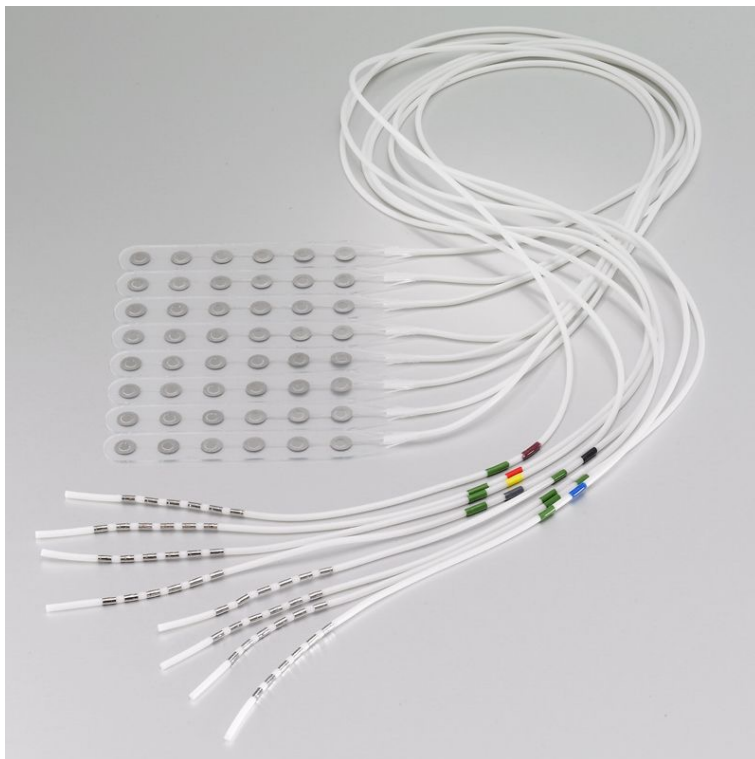


# SEEG $\neq$ ECoG

ECoG : électrocorticographie

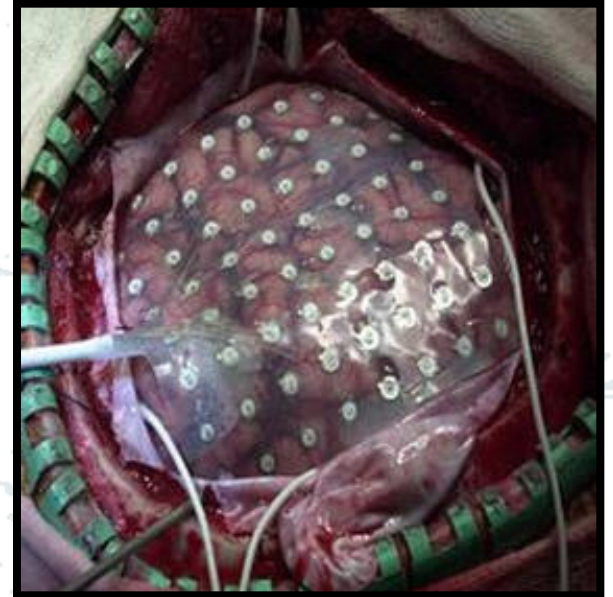
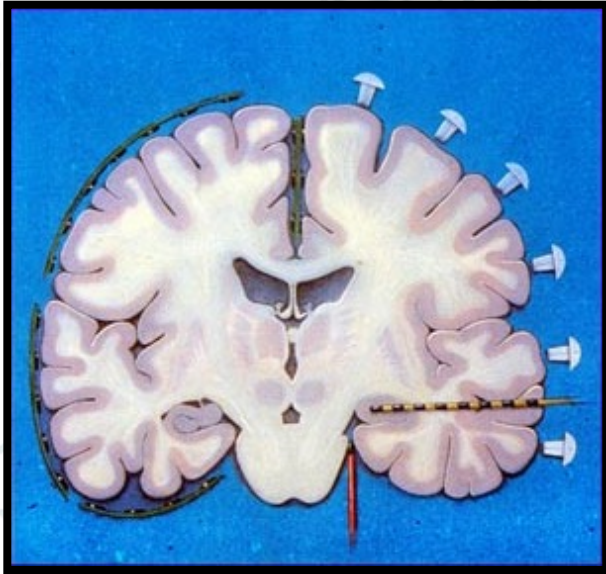
Méthode intra-crânienne ( $\neq$  intra-cérébrale)

Capteurs = grille (Grids en Anglais) ou bandes (Strips)





# SEEG $\neq$ ECoG



- (+) : Mapping fonctionnel  
Pas d'atténuation due au crâne (conductivité très faible)
- (-) : Risques infectieux  
Profondeur  
Sillons

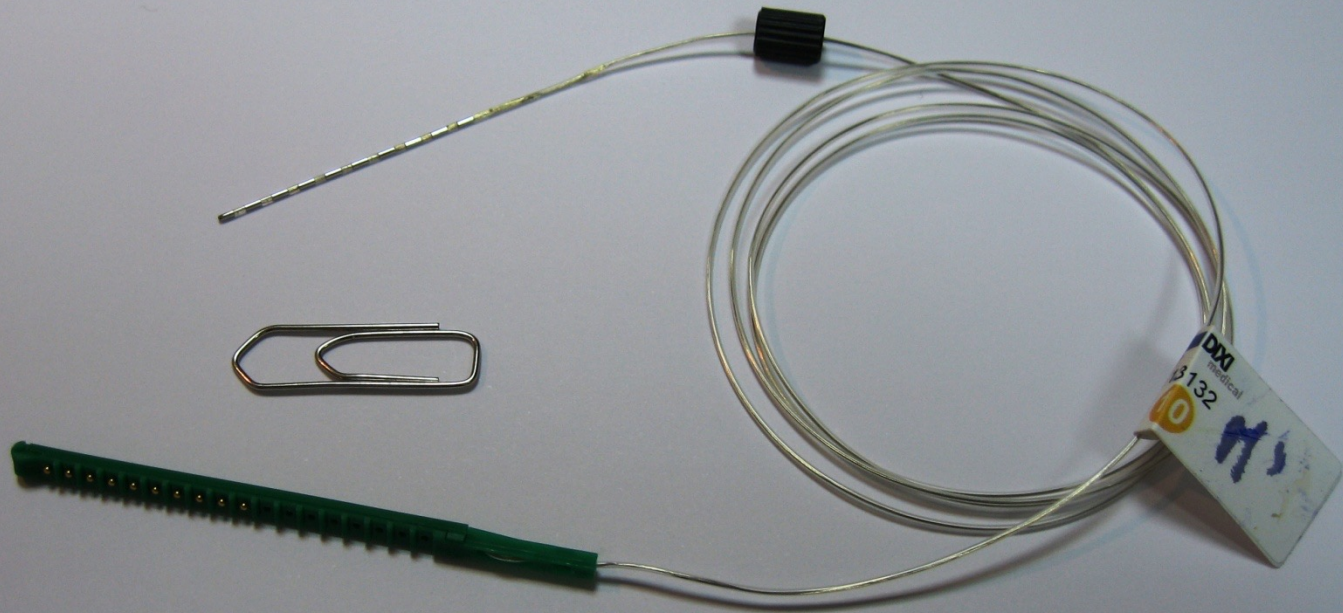
# StéréoElectroEncephaloGraphie (SEEG) :

**Electrodes, Matériels et Infrastructures**

# 1. Electrodes de SEEG

Electrode de type aiguille

L'électrode est constituée de plusieurs points de mesure appelés « plots »



Acier inox ou Platine

Stérile

Usage unique



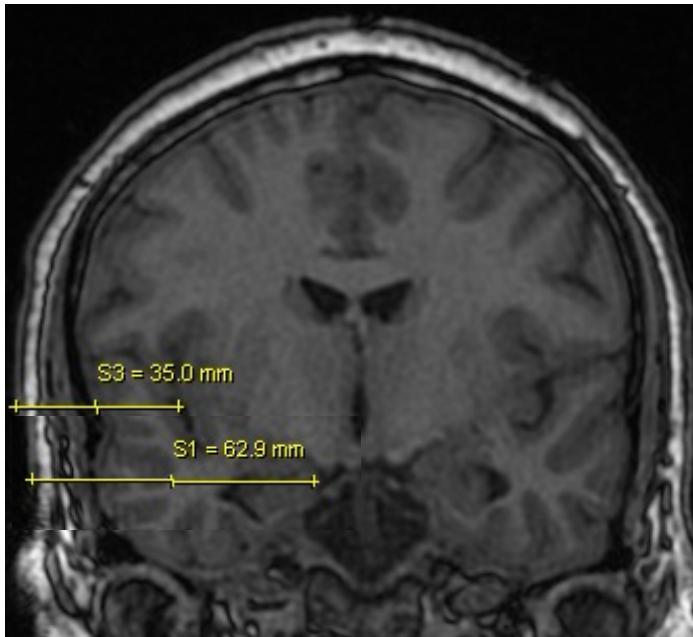


# Choix des électrodes

Le choix des électrodes dépend :

De la distance entre la cible et le point d'entrée sur le scalp et donc de la structure à explorer

Il existe ensuite une relation entre la longueur de l'électrode et le nombre de plots

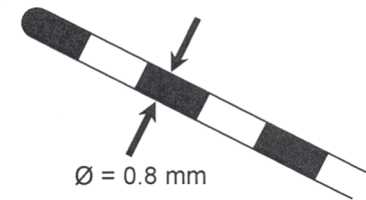
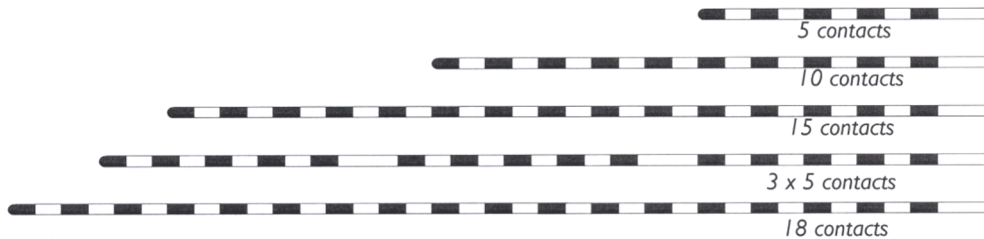


| contacts | $L_t$ |
|----------|-------|
| 5        | 16    |
| 10       | 33,5  |
| 15       | 51    |
| 15 (3x5) | 62    |
| 15 (3x5) | 70    |
| 18       | 61,5  |



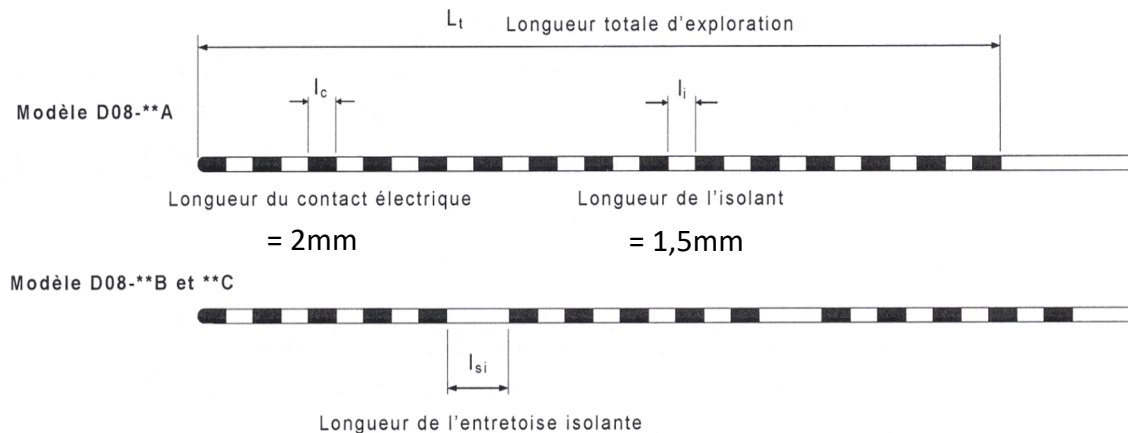
# Caractéristiques des électrodes

Les électrodes 15 plots sont les plus utilisées



## ◆ Nombreuses configurations de 5 à 18 contacts

| Nb. de contacts | Dimensions (mm) |       |       |          |
|-----------------|-----------------|-------|-------|----------|
|                 | $L_t$           | $l_c$ | $l_i$ | $l_{si}$ |
| 5               | 16              | 2     | 1.5   | -        |
| 10              | 33,5            | 2     | 1.5   | -        |
| 15              | 51              | 2     | 1.5   | -        |
| 15 (3x5)        | 62              | 2     | 1.5   | 7        |
| 15 (3x5)        | 70              | 2     | 1.5   | 11       |
| 18              | 61,5            | 2     | 1.5   | -        |



# Caractéristiques des électrodes

Angle max de  
pliure = 90°

Utilisation des électrodes SEEG :

- \* Enregistrement
- \* Stimulations brèves
- \* Thermo-coagulation (signaux Radio-Fréquence)



Chaque plot est relié : soit par une piste soudé au laser (qq micron) au connecteur de l'électrode,

soit par un fil de platine soudé électriquement (contact ↑)

Si un seul plot endommagé, cela n'affecte pas l'enregistrement sur les autres plots

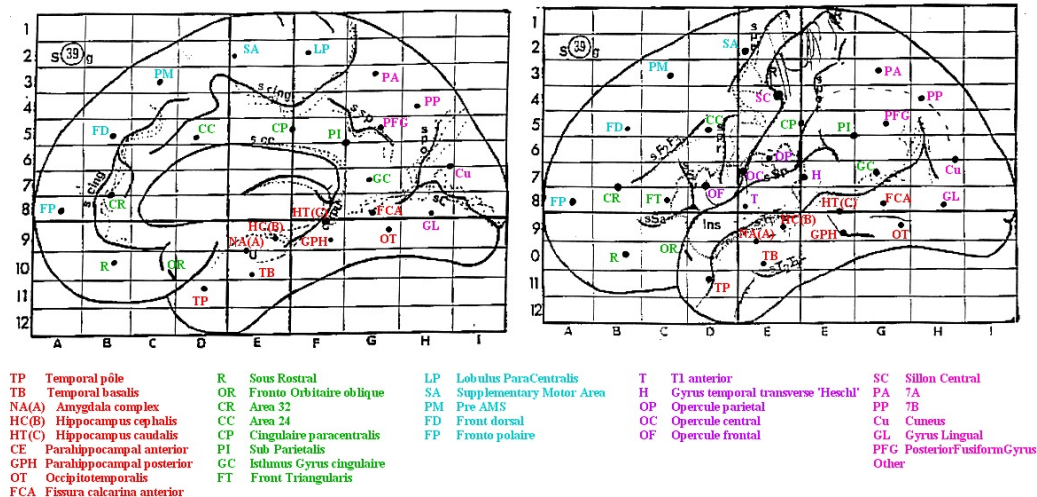
Coût élevé : 300 à 500€ l'unité

# Nomenclature des électrodes

Électrodes situées dans l'hémisphère gauche porte une « ' »

Choix du nom est arbitraire : exemple : L pour lésion

→ Pas de convention comme pour l'EEG



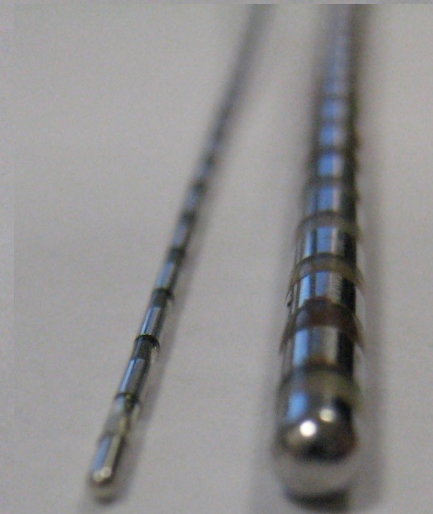
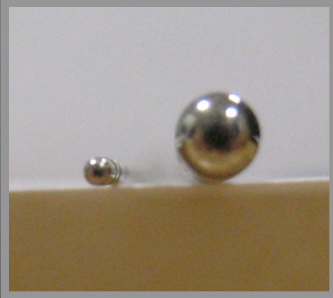
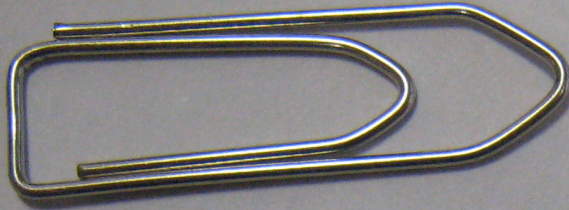
Numérotation : 1 pour le plot le plus distant donc le plus profond

## Ordre croissant vers la surface





# Un peu d'histoire....



Électrode 15 plots,  $l_c = 2\text{mm}$ ,  $l_i = 1,5\text{mm}$   
 $\varnothing = 2\text{mm}$  (avant)  $\varnothing = 0,8\text{mm}$  (maintenant)





# Fabricants

Domaine de la micromécanique

En France (Besançon):

DIXI Medical « <http://www.diximicrotechniques.com/> »



ALCIS « <http://www.alcis.net/> »



Aux Etats-Unis :

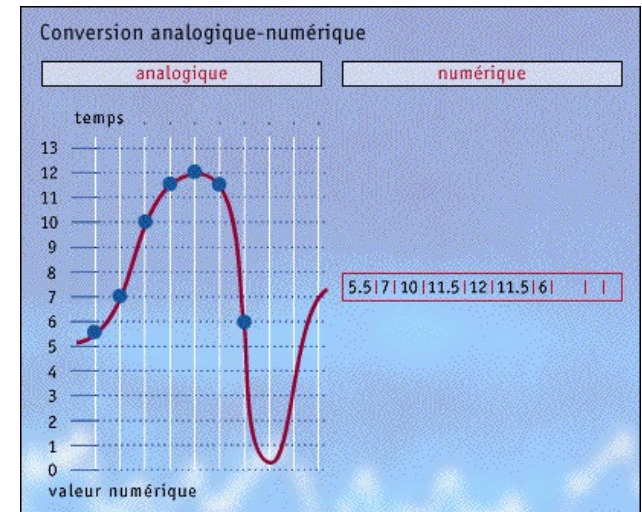
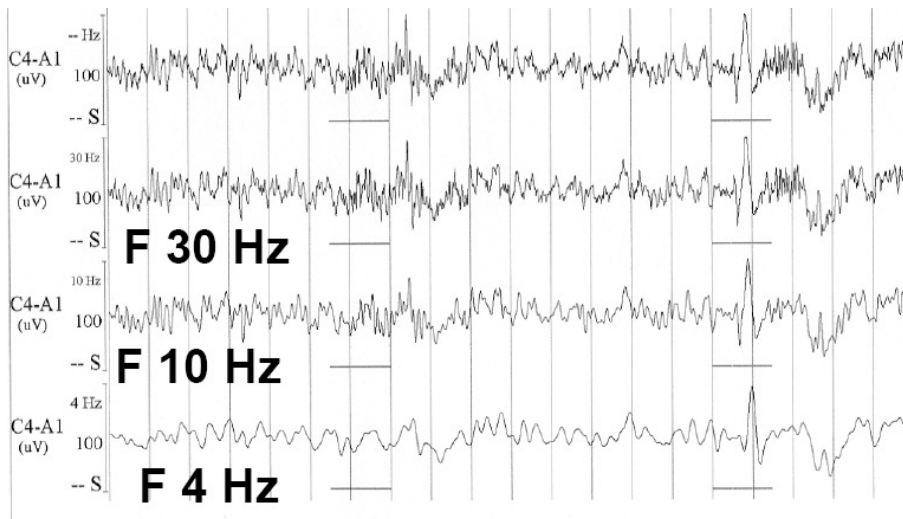
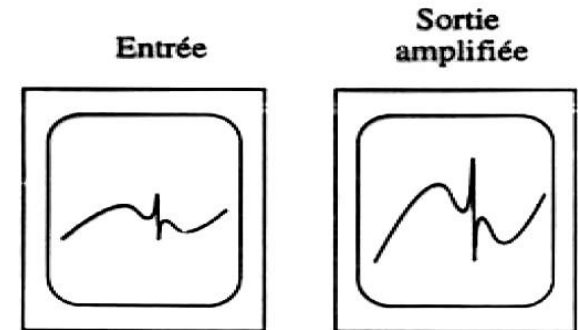
Ad-Tech Medical « <http://www.adtechmedical.com> » ou « <http://cormedica.fr/> »



# 2. Matériels d'enregistrement

Principe général d'acquisition des signaux identiques à l'EEG vidéo :

- Amplification (Gain  $\neq$  Sensibilité)
- Filtrage
- Echantillonnage
- Conversion Analogique-Numérique



# Conversion Analogique Digitale

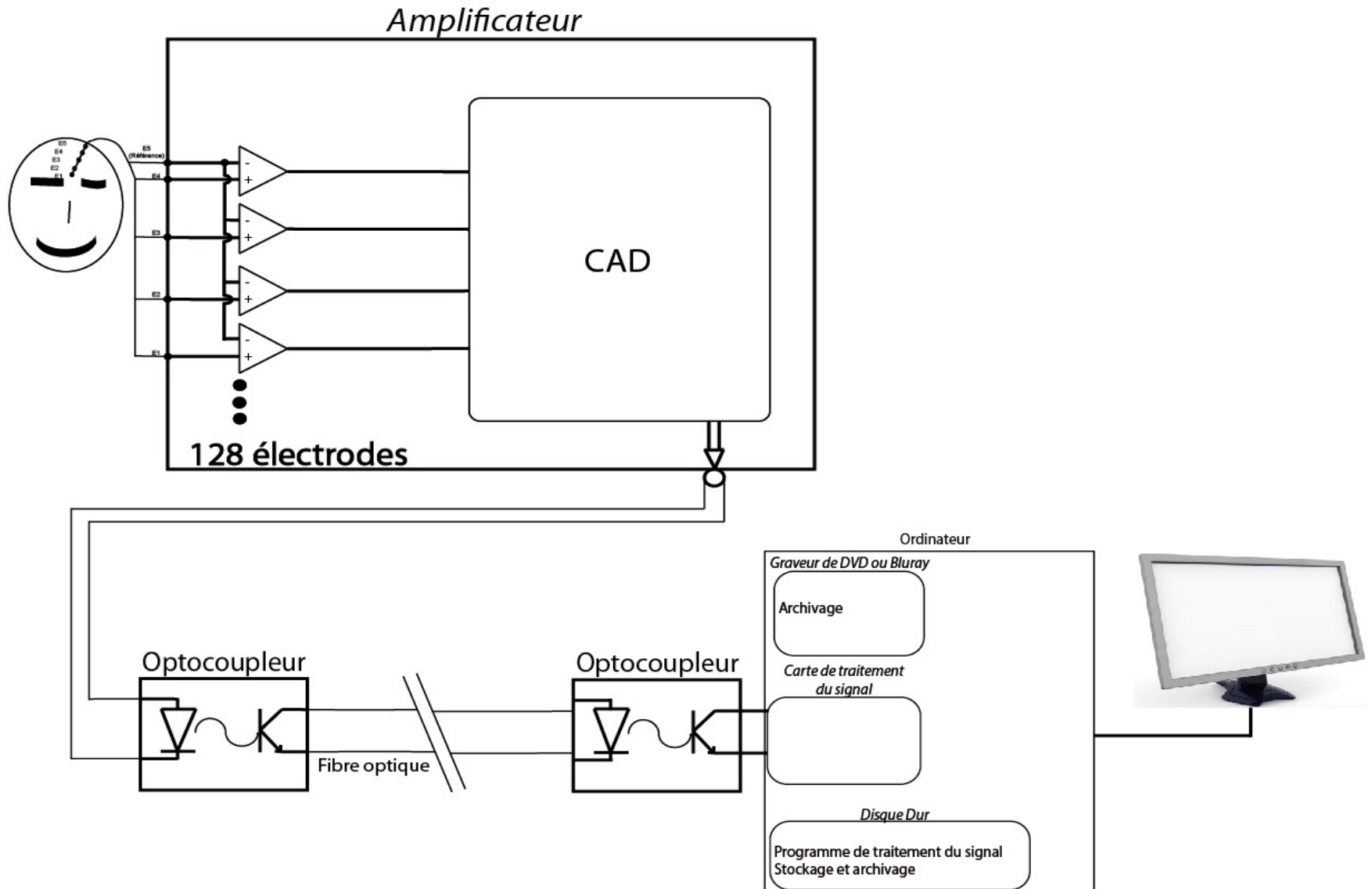
- Un système EEG numérique convertit le signal analogique en une série de valeurs numériques. Ce procédé s'appelle la conversion analogique digitale ( CAD ou ADC en anglais).
- Les données numériques obtenues par le CAD sont stockées dans l'ordinateur pour ensuite être analysées et affichées à l'écran.
- Théorème de Shannon :  $F_{\text{éch}} \geq F_{\text{max}} * 2$   
Bande fréquence EEG (0,5Hz – 100 Hz) donc  $F_{\text{éch}} = 256\text{Hz}$

# Avantages de CAD

- Précision des analyses statistiques (décomposition du signal en bandes de fréquences)
- Meilleure identification des artefacts
- Possibilité de remonter les signaux entre eux pour une meilleure localisation des différentes activités.
- Possibilité de filtrer et « d'amplifier » le signal à tout moment.



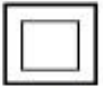
# Numérisation SEEG



# Classification du matériel d'acquisition SEEG



- **Classe I** : dispositifs ayant un faible degré de vulnérabilité (pinces, ciseaux, objets de pansements 1<sup>er</sup> degré, etc.).



- **Classe IIa** : dispositifs à risques potentiels modérés (classe I stérile ou ayant une fonction de mesure, lentilles de contact, implants dentaires, instruments chirurgicaux à usage unique, etc.).

- **Classe IIb** : dispositifs dont le risque est élevé en cas de dysfonctionnement (instruments chirurgicaux implantables, dispositifs anti-MST, anticonceptionnels, objets de pansement brûlure 3<sup>ème</sup> degré, etc.).



- **Classe III** : dispositifs les plus critiques (dispositif invasif ou implantable en contact avec le système nerveux ou circulatoire, dispositif incorporant un médicament, dispositif implantable délivrant de l'énergie, etc.).

# Classification du matériel d'acquisition SEEG

Les **systèmes EEG basiques** (EEG standard, EEG vidéo, Holter EEG, ...) peuvent être classifiés en **IIa** à partir du moment où ils sont utilisés avec des électrodes de surface.

Nous devons préciser que la classification **IIb** devient nécessaire sur les appareils EEG utilisant des dispositifs invasifs ou implantés tels que les électrodes de **SEEG** ou les électrodes aiguilles utilisées avec les appareils EEG standard dans le service de réanimation, néonatalogie etc...

# Têteières



Nécessite en général plusieurs têteières

Raccordement en série des têteières

Actuellement de 128 à 256 voies ( $x * 64$ )

Les « x » têteières sont vu comme un seul ensemble par le système d'acquisition  
On ne peut raccorder ensemble n'importe quelle têteière!



# Matériels d'enregistrement

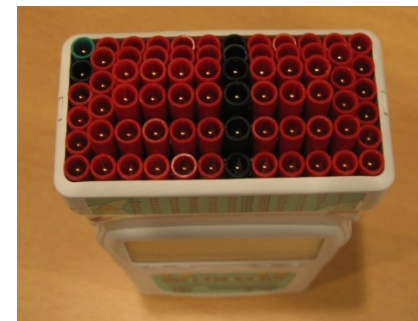
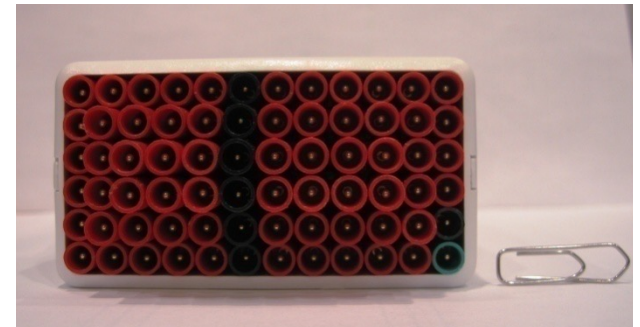
Ergonomie du système pour le branchement des électrodes (beaucoup de câbles)

Avec la miniaturisation des têtes, possibilité de mise en holter

Tête en autonomie électrique (batterie)

Stockage par mémoire interne (carte ou autre)

Transfert sans fil des données (wifi)



# Matériel de stimulation

## Stimulateur indépendant



Vers la tête



Vers le boîtier d'électrodes



Vue latérale du stimulateur



Boîtier électrodes

Stimulateur

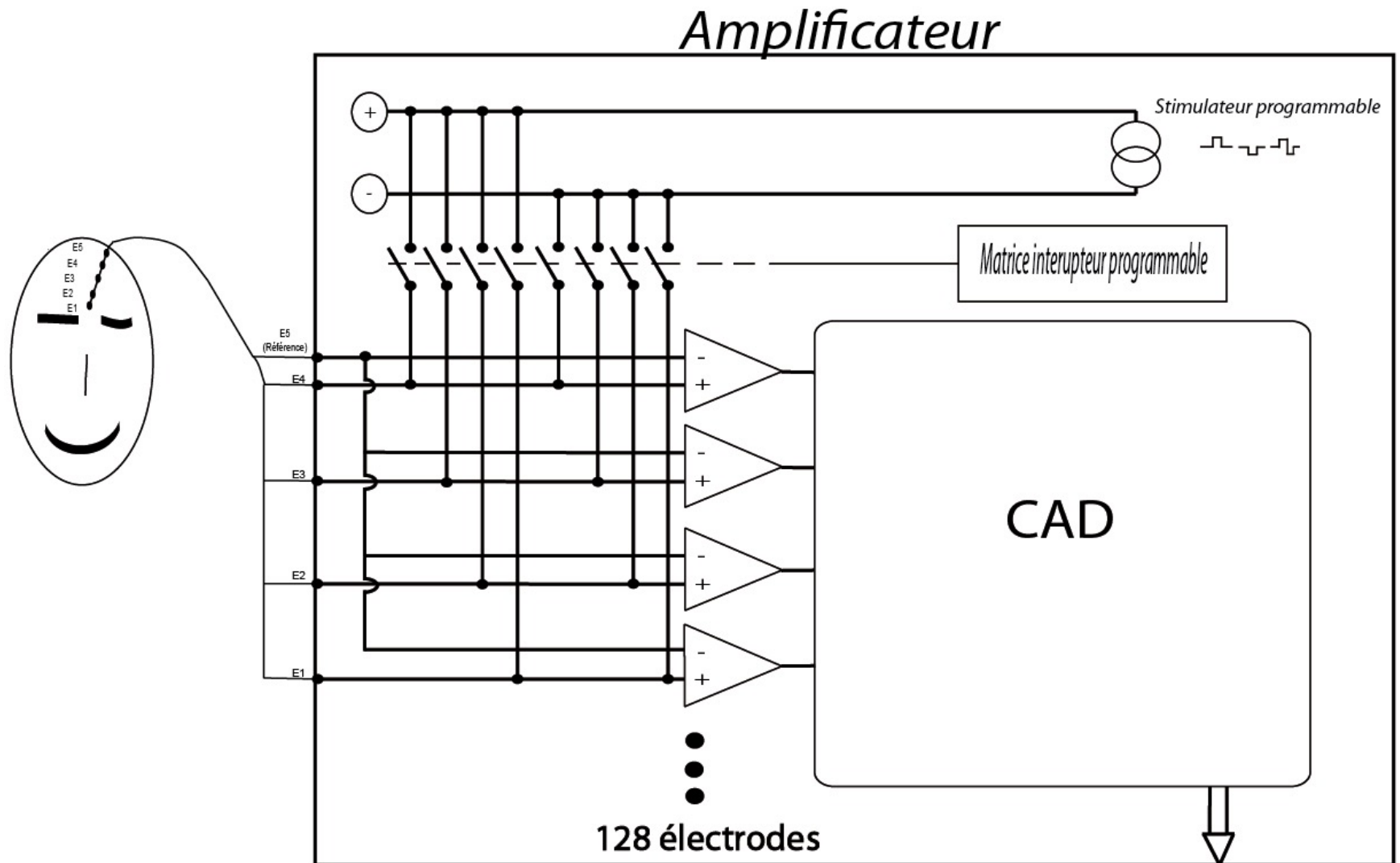
Tête

Pilotable uniquement à distance

Fonctionne sur batterie

S'intercale entre la tête et le boîtier de connexion des électrodes

# Stimulation S EEG



# Matériels de stimulation

2 grands types de stimulation :

- Par train : fréquence de 50Hz pendant 3 à 5 sec avec des largeurs de stim. = 0,1msec

Fréq. de stim. < 100Hz (excitateur) > 125-130Hz (inhibiteur)

(-) : artefact de stimulation (important) qui peut masquer la post-décharge

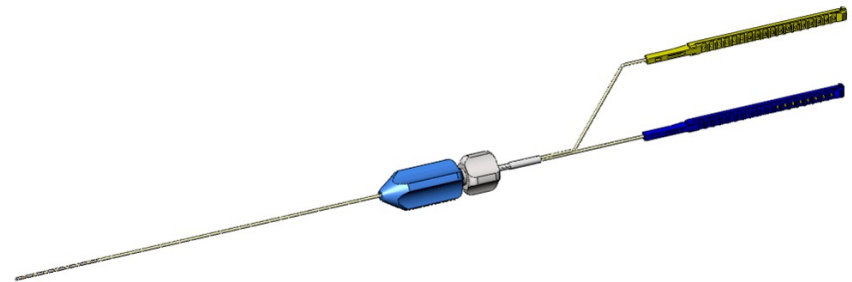
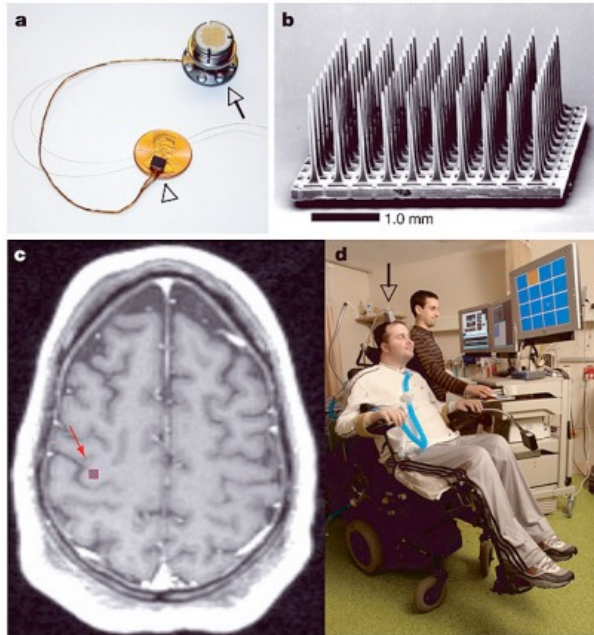
Par choc : Fréquence aléatoire (1Hz à ...), Larg. Stim = 0,2 msec

(+) pas d'artefact de stimulation, ZE hyperexcitable très sensible au choc

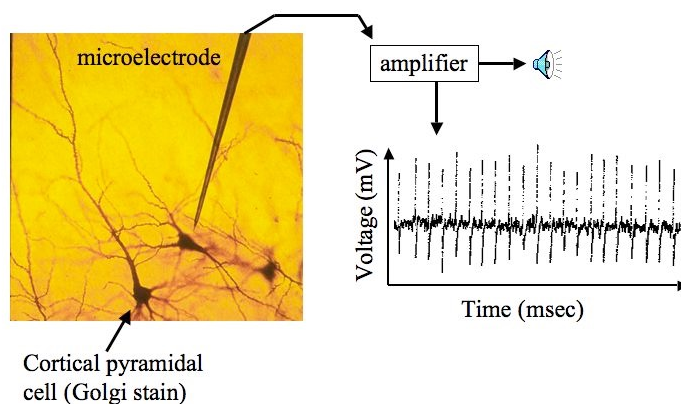
Polarité des stimulations : positive et négative pour éviter de polariser les plots de SEEG et préserver les tissus ([charges])



# Enregistrements unitaires

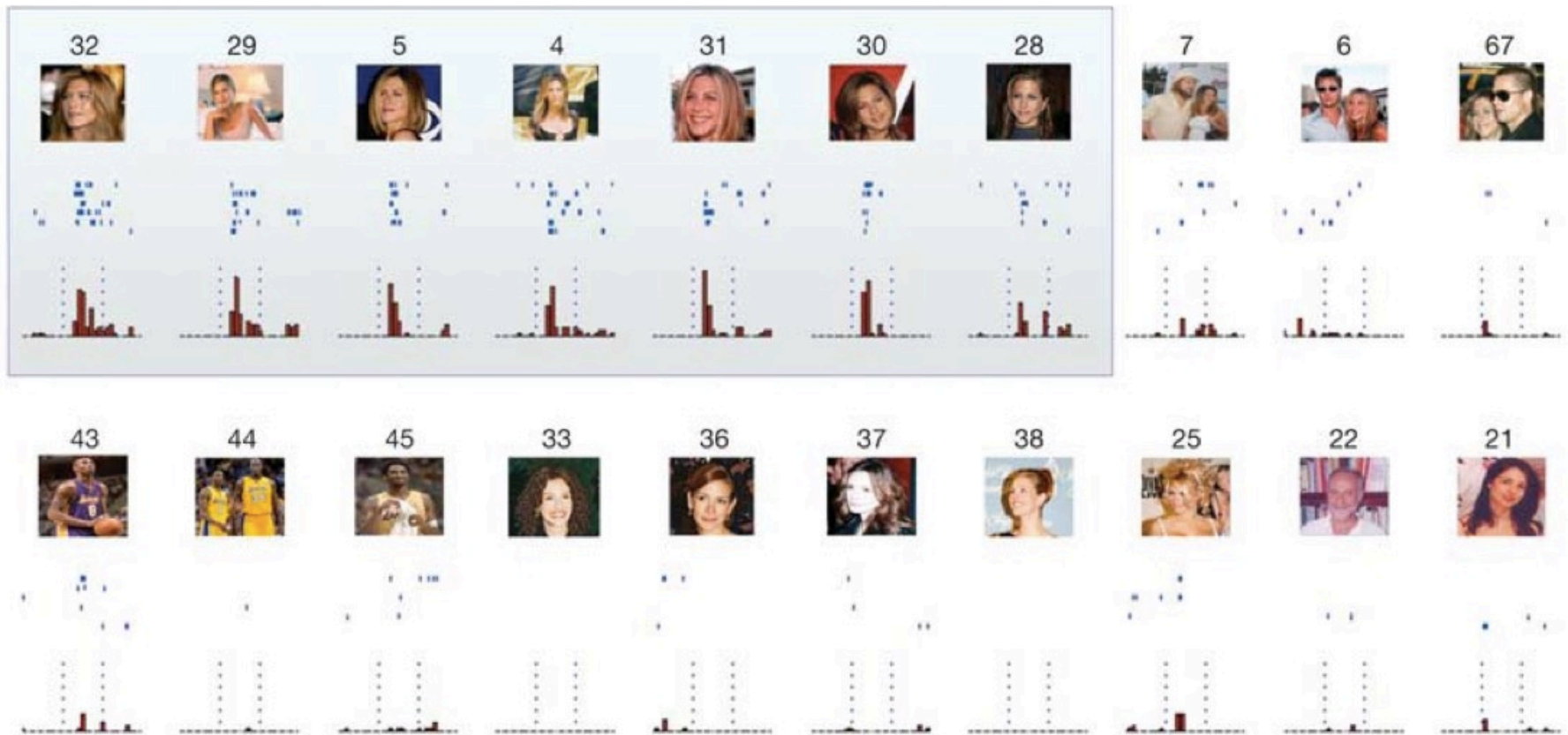


## Single-cell electrophysiology

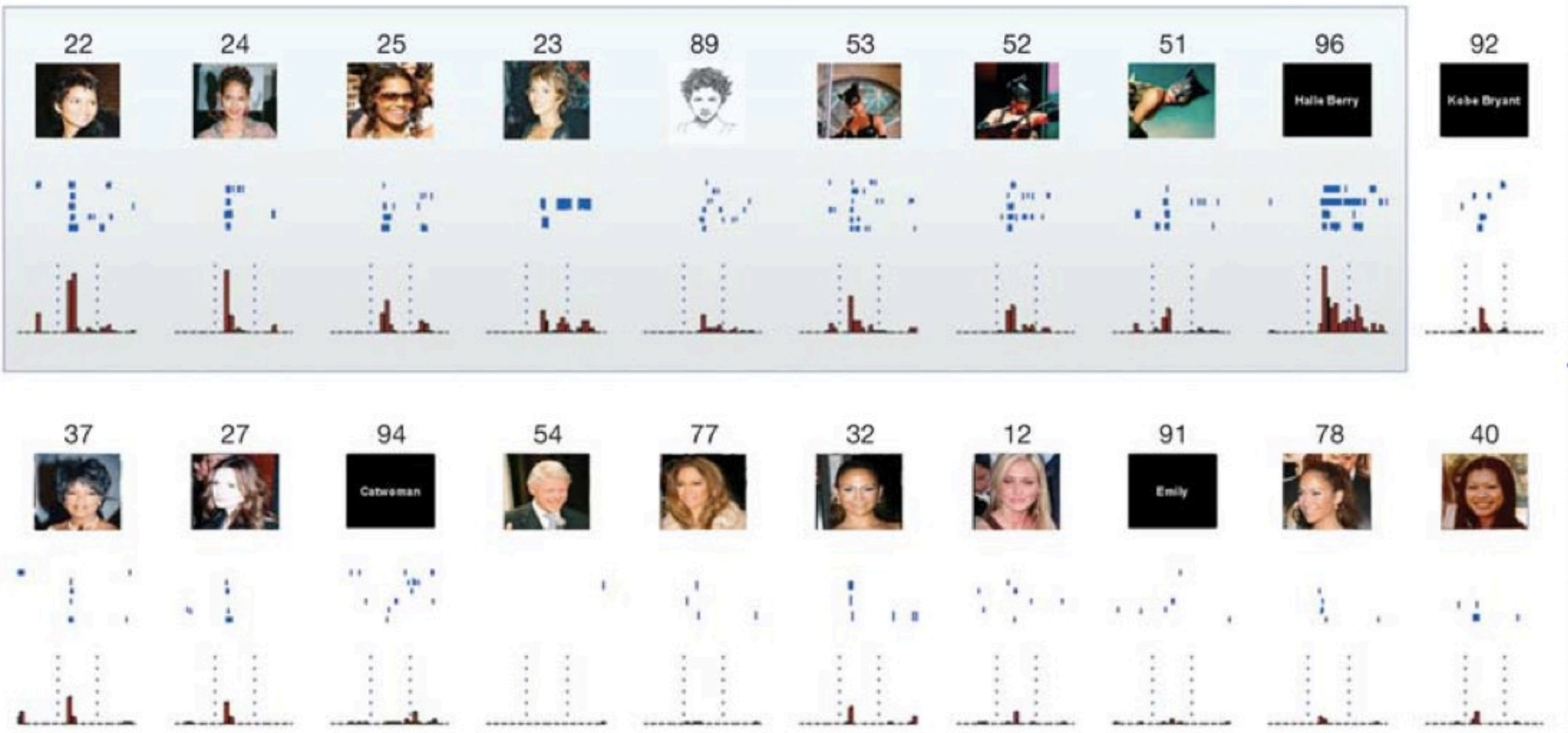


- 3 groups of tetrodes on 120°
- On the distal part
- Ø25µm per wires

# Le neurone Jennifer Aniston



# Pas uniquement visuel ...



Supplementary Movie S1a  
viewing session

accompanying  
demonstration for Fig. 1

# Firing of a single entorhinal cortex neuron while watching short video episodes

Beeps represent single spikes

H. Gelbard-Sagiv, R. Mukamel, M. Harel, R. Malach, I. Fried, *Science* (2008)



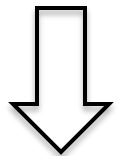
# Interface cerveau-ordinateur



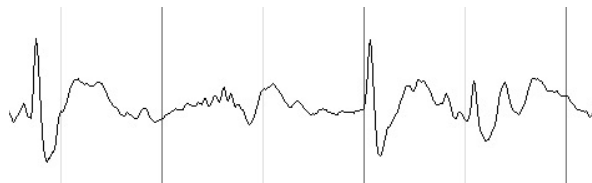
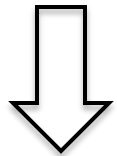
# Comment localiser de façon non invasive ???

Fonctionnement du cerveau

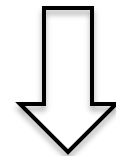
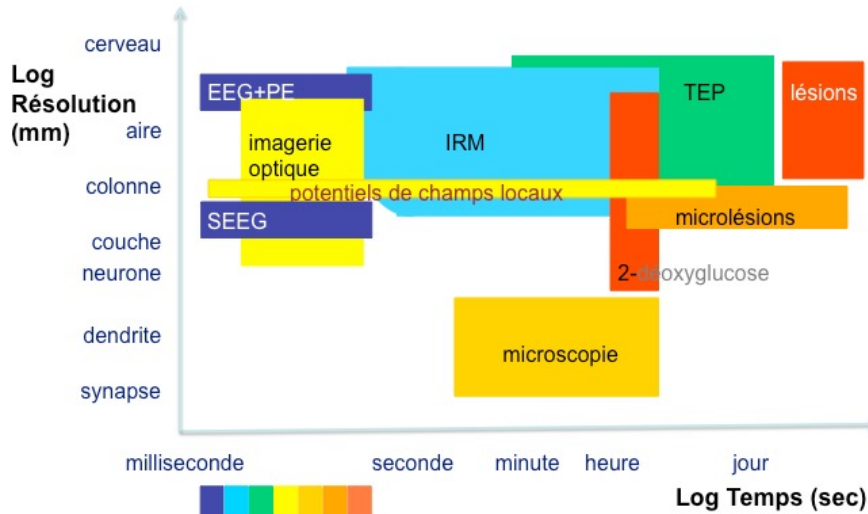
Anatomie du cerveau



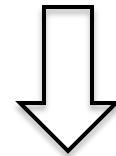
EEG



Échelle : milliseconde



IRM



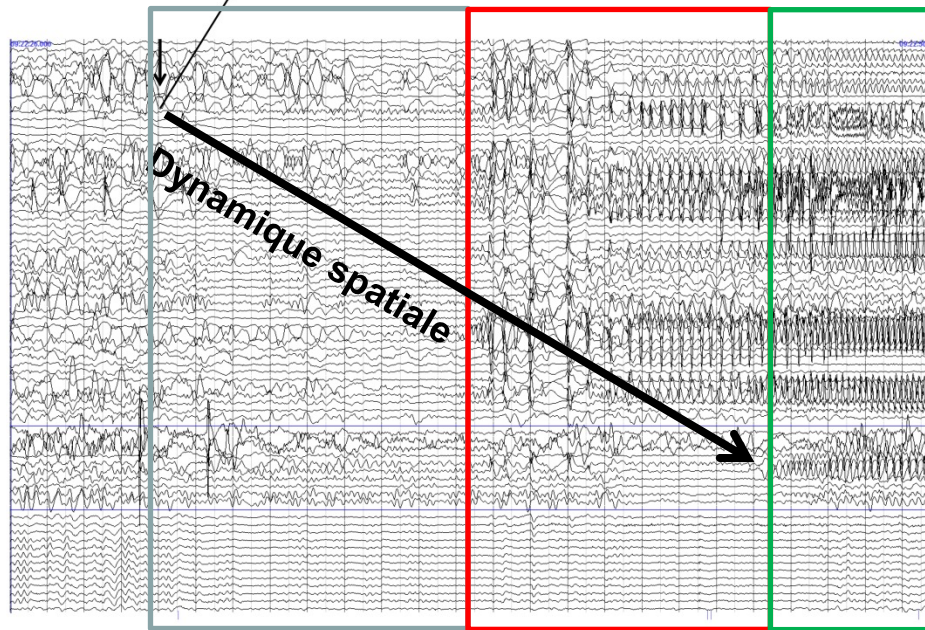
Échelle : millimètre



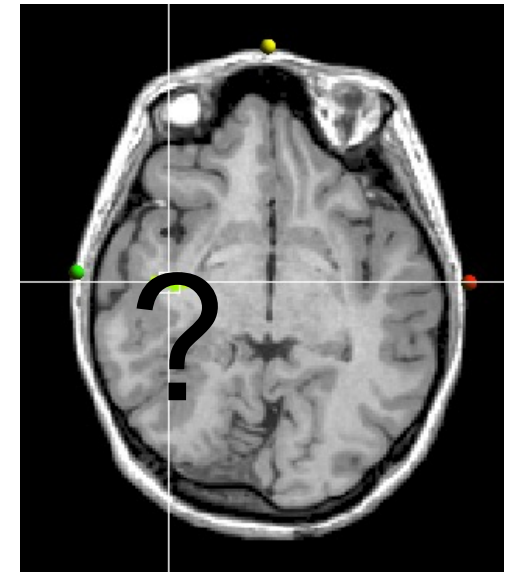
Dynamique temporelle →

**A: EEG**

25 sec



**B: IRM**



**ENJEUX :**

- 1) identifier sources électriques cérébrales
- 2) localiser/délimiter spatialement ces sources dans le cerveau

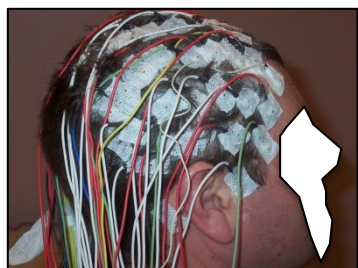




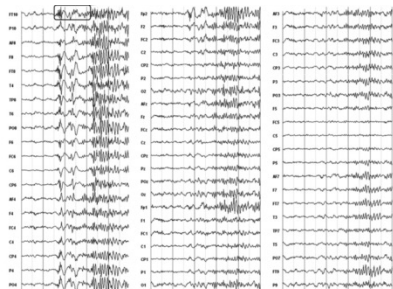
## AIRES CÉRÉBRALES

### NON INVASIF

EEG de surface  
Haute Résolution



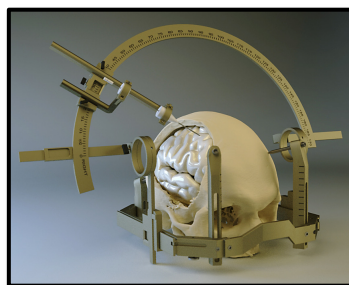
Vision globale de  
l'ensemble du cortex



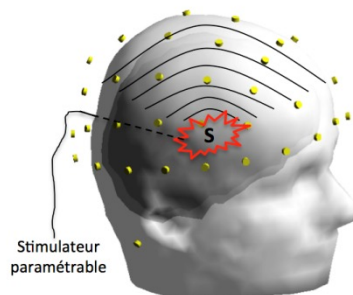
**ETUDE PROSPECTIVE  
(PHRC NATIONAL 17-05)  
120 PATIENTS EXPLORÉS**

## POPULATION DE NEURONES

EEG de profondeur  
(SEEG)



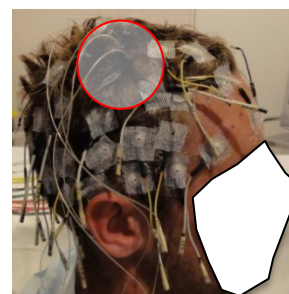
Vision focale de  
régions d'intérêts



**3ÈME CENTRE EN TERME  
D'INCLUSION EN FRANCE (30/AN)  
EXPERTISE INTERNATIONALE**

## MIXTE

EEG multi-échelle  
simultanés



Vision globale et  
focale synchrone



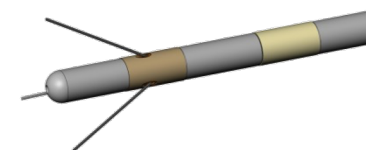
**4 ÉQUIPES AU NIV. INTERNATIONAL  
30 PATIENTS EXPLORÉS**

## NEURONES

### INVASIF

Enregistrements  
unitaires

3\*4 microélectrodes  
 $\varnothing = 25\mu\text{m}$



Vision focale des  
neurones



**3 ÉQUIPES AU NIV. NATIONAL  
(RÉGION LORRAINE  
– ESPOIR EN TÊTE)**